

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Formular una estrategia de producción de sensores para el sector industrial colombiano

Angélica Mercedes Nivia Vargas

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2018

Formular una estrategia de producción de sensores para el sector industrial colombiano

Angélica Mercedes Nivia Vargas

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería Electrónica

Director:
MSc. Iván Jaramillo Jaramillo

Línea de Investigación:
Desarrollo Electrónico

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá D.C., Colombia
2018

A mis padres, mis abuelitos y a mi hermana

Agradecimientos

Aunque fueron muchos los retos para llevar a cabo esta maestría, agradezco muy especialmente a mi director de tesis, al profesor Iván Jaramillo Jaramillo, por su paciencia y acompañamiento, de igual manera agradezco de corazón a la Universidad Nacional de Colombia por permitirme crecer académica y profesionalmente.

Durante el desarrollo, también recibí colaboración de muchas personas, doy gracias a:

David González, Técnico En Mantenimiento de Industrias Eva Ltda; José Alberto Álvarez, Gerente de Proyectos de Sempertex S. A.; Rigoberto Ramírez Usma, Gerente de Ingeniería de Trimco S.A.; Juan Carlos Blanco, Jefe Mantenimiento de Cabarria Iqa S.A.S; Armando Arenas, Contador de Amoya S.A.; Juan Carlos Nieto; Gestor Técnico de Niver Sa; Alejandro Harris Osorio, Jefe Mantenimiento Eléctrico de Gelco S.A.S.; Bladimiro Arias V., Director Dpto. De Mantenimiento de Luis Eduardo Caicedo Lec SA; Diego Briceño, Ingeniero De Proyectos de Automatización de Gloria Colombia S.A.; José Cuello García, Ingeniero Electrónico de Acerías De Los Andes SAS; Jaime Espinosa, Jefe de Electrónica de Gilpa Impresores SA; José Alejandro Blandón Flórez, Líder de Automatización y Electricidad de Serviparamo S.A; Luis Vicente Coy, Gerente De Producción de Fábrica de Chocolates Triunfo S.A.; Luis Humberto Torres López, Jefe De Mantenimiento de Grupo Op Graficas; Fredy Alexander Suárez Cárdenas, Ingeniero Proyecto Art de CIAC; Bernardo Gómez, Ingeniero de Desarrollo de Magnetron, Luis Miguel Guzmán Pérez, Ingeniero de Fabricación de Partes de la Corporación de La Industria Aeronáutica Colombiana S.A.; Sandra Acevedo Beltrán, Prestadora de servicio al Cliente en Koyomad S.A.; Darío Rodríguez, Gerente de Arneses Y Gomas; Luis Carlos Reyes Izquierdo, Jefe de Planta de Plásticos Fayco Sa; Omar Dávila Nieto, Jefe Mantenimiento de Industrias Cannon de Colombia; Ernani Di Giulio, Gerente de Protecvolt Ltda.; José Luis Riveros Romero, Gerente General de Auros Copias S.A.; Alireza Ghaffarian, Program Implementer de ABB; Allan Mutis Forster, Gerente General de Colmallas S.A.; Nikolas Rodríguez, Comercial de Indutanpas Ltda; Gerardo Diaz Gómez, Director de Producción de Productora de Alambres S.A.; Alfredo Ayala, Gerente de Riorion S.A.; Diego López, Coordinador Depto. de Electrónica de Los Pinos S.A.; John Eastmond, Gerente de Operaciones de Producciones Químicas S.A.; Alexander Velasquez, Ingeniero de Desarrollo Comercial de Exco Colombiana S.A.; Isabel Rosero, Director Comercial de MGC; José U. Medina, Gerente de Planta de Pelikan Colombia SAS; Alejandro Cárdenas, Especialista en Ventas de Instrumentación de ABB Ltda; Esteban Hurtado, Coordinador de Mercadeo de Eduardili; Juan Camilo Gómez, Jefe De Proyectos de Colcafé; Juan Carlos González, Jefe Ingeniería de Procesos de Gabriel de Colombia SA; Evelio Molano Martínez, Jefe Asistencia Técnica de Centelsa; Miguel Moreno, Superintendente de Ingeniería de Procesos de Mexi-

chem Resinas Colombia ; Carlos Triana, Jefe de Mantenimiento de Multidimensionales; Ana Gloria Briceño Páez, Dir. De Talento Humano de Alambres Y Mallas S.A.; Cesar Leonardo Ramos Mora, Ingeniero De Mantenimiento Eléctrico de Detergentes Ltda; Hernando Vega, Jefe De Laboratorio de High Lights S.A; Juan Carlos Gómez, Jefe División Diseño de Red de Codensa S.A.; German González, Gerente de DCI Proyectos SAS; Andrés Felipe Claros Orozco, Ingeniero De Proyectos de Subestaciones SM& A Ltda ; Luis Carlos Botero, Director I+D+I de Induma; Rodrigo Urrego Malagón, Jefe De Contabilidad de Asitex SA; Diego Cuellar, Director Industrial de Disproel S.A; Ronyver Alexander Gómez, Ingeniero Electricista de C.I. Milpa; Gustavo Cely, Ingeniero De Automatización Y Control de C.I. Sigra S.A.; Víctor Ballesteros, Director Laboratorio de Pinzuar Ltda.; Luis Rodríguez, Jefe De Operaciones de Cordeles Y Extruidos de Colombia; Andrea Reales, Gerente de Línea de Oficaribe S.A.S.; Daniel Espitia, Jefe De Mantenimiento de Industrias Metálicas Asociadas Imal S.A.; Juan Alejandro Giraldo Vargas, Comercial de Solomoflex SAS; Sandra Gómez, Jefe Servicios Administrativos de Argos; Camilo Novoa, Sub-Gerente de VR Ingeniería; Juan David Giraldo, Gerente De Proyectos Y Mantenimiento Industrial de Fabricato; Daniel Moncada, Jefe Mantenimiento Eléctrico de Proteicol S.A; Wilman Nivia, Gerente de Altron Ingeniería; Alejandro Puerta, Ingeniero de Tekpro SAS; Miguel Angel Arrieta Duque, Gerente Comercial de K& V Ingeniería SAS; Daniel Vergara, Jefe De Sistemas de Gestión de Calderas Continental Ltda.; Holman Araque, Ingeniero Mantenimiento de CA Mejia & CIA SAS; Mery Tibaduiza Gómez, Coordinador Administrativo de Artecma SAS; José Luis Barajas Rangel, Gerente Técnico de Alfagres SAS; William Fonseca, Jefe Sistemas de Apoyo Crítico de Empresa Colombiana De Productos Veterinarios; Fredy Jaramillo Carvajal, Coordinador De Mantenimiento de Incolmotos Yamaha S.A.; Beatriz Elena Mendoza, Directora Comercial de BCI INGENIERIA SAS; Iván Joaquín, Asesor Industrial de Rodríguez y Urbina Ltda; José Ernesto Orjuela, Gerente de Sentronic; Fernando Sanabria Acosta, Director Comercial de Control y sensores SAS; Luis Ojeda, Coordinador de Ventas de Hanna Instruments; Brayan Sanchez González, Gerente de Ventas de Yokogawa Colombia SAS; Diana Mesa, Ingeniera de Soporte de Hernán Escobar Posada Representaciones Ltda; Sandra, Channel Manager de Omron; José Orjuela, Gerente Comercial de Sentronic; Licet Espitia, Colaboradora en ventas Internas de Multicontrol Ltda; Blas Romero López, Ingeniero De Soporte de Instrucontroles S.A.S; Monica Ardila Galvis, Industry Manager de Endress+Hauser Colombia SAS; Luis José Giraldo Arroyave, Gerente I+D de Basculas Prometalicos S.A.; Sandra Rodríguez, Ingeniera De Ventas de AJ& M Solución; Gustavo Pineda, Ingeniero De Soporte de Instrumatic, quienes dedicaron un poco de su tiempo y disposición en brindarme información, que fue muy importante en el desarrollo del proyecto.

Resumen

Colombia es un consumidor masivo de productos electrónicos y en especial de elementos primarios, como lo son los sensores, pero no posee las herramientas para la producción de estos. Los sensores, al ser los elementos necesarios para la realimentación de un proceso, se vuelven imprescindibles para la instauración de cualquier iniciativa de producción. Por esto se hace necesario generar una estrategia de producción de sensores. Se toma como punto de partida los más usados en el mercado colombiano, con el fin de proponer herramientas a una industria nacional que se adecue a las necesidades del país.

En este trabajo se identifican los sensores más utilizados en la industria Colombiana, a partir de los cuales se caracteriza el proceso productivo de estos, realizando el análisis de materiales, técnicas utilizadas y costos de fabricación, permitiendo así establecer su estrategia de producción. Además se logra identificar algunos aspectos distintivos de la industria y ofrecer un punto de partida para el establecimiento de esta industria a nivel nacional.

Palabras clave: Sensor, estrategia de producción, industria, producción, proceso productivo.

Abstract

Colombia is a massive consumer of electronic products and especially of primary elements, such as sensors, but it does not have the tools to produce them. The sensors, being the necessary elements that give the feedback for a process, make them essential for the establishment of any production initiative. Therefore, it is necessary to generate a sensor production strategy. The sensors most used in the Colombian market are taken as a starting point, with the objective of providing tools to a national industry that adapts to the needs of the country.

In this work the most used sensors in Colombian industry are identified, from which the productive process of these is characterized, making the analysis of materials, techniques used and manufacturing costs, thus allowing to establish its production strategy. It also manages to identify some distinctive aspects of the industry and offer a starting point for the establishment of this industry at national level.

Keywords:Sensor, production strategy, industry, production, productive process

Contenido

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Lista de símbolos	xii
1. Introducción	1
2. Análisis del mercado de sensores en Colombia	3
3. Medición de Temperatura	14
3.1. RTD (Resistance Temperature Detector)	14
3.1.1. Dimensionamiento	17
3.1.2. Normatividad	18
3.2. Termopar	20
4. Presión	26
4.1. Galga Extensiométrica	27
4.1.1. Celda de carga	36
4.1.2. Dimensionamiento	37
5. Proceso de fabricación de sensores de película fina	41
5.1. Tratamiento de la superficie	41
5.1.1. Fundición centrifugada	42
5.1.2. Deposición al vacío	42
5.1.3. Pulverización catódica	43
5.1.4. Deposición química de vapor	44
5.1.5. Galvanoplastia	44
5.2. Microtecnología	45
5.3. Materias primas	51
5.3.1. RTD	53
5.3.2. Termopar	54
5.3.3. Galga	57
5.4. Maquinaria	58

5.5. Análisis de costos para la fabricación de sensores de película fina	68
6. Conclusiones y recomendaciones	72
6.1. Conclusiones	72
6.2. Recomendaciones	73
A. Anexo A: Sensores utilizados en la industria Colombiana	74
B. Anexo B: Sensores vendidos a la industria Colombiana	82
Bibliografía	85

Lista de símbolos

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
A	Área	m^2	$\int \int dx dy$
c	Espesor	m	Ecuación 3-2
D	Diámetro	m	
E_{AB}	Relación entre f.t.e.m y diferencia de las uniones de A y B		
I	Intensidad de Corriente Eléctrica	A	DF
L	Longitud	m	DF
m	Masa	kg	DF
P	Presión	Pa	$\frac{\vec{F} \cdot \vec{n}}{A}$
Q	Calor	kJ	1. LT
R	Resistencia Eléctrica	Ω	$\frac{V}{I}$
S	Coefficiente de Seebeck	$\frac{V}{K}$	$-\frac{\Delta V}{\Delta T}$
S_e	Factor de galga		
T	Temperatura	K	DF
t	Tiempo	s	DF
V	Voltaje o tensión	V	$\frac{kgm^2}{As^3}$
w	Ancho	m	Ecuación 3-2

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
α	Coefficiente de variación	1	Ecuación 3-1

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
ρ	Resistividad Eléctrica	Ωm	$\frac{1}{\sigma}$
σ	Conductividad Eléctrica	$\frac{1}{\Omega\text{m}}$	
τ	Tiempo adimensional	1	

Subíndices

Subíndice	Término
AB	Metal A-Metal B

Superíndices

Superíndice	Término
n	Coefficiente x

Abreviaturas

Abreviatura	Término
1.LT	Primera ley de la termodinámica
DF	Dimensión fundamental
RTD	Resistance Temperature Detector
PRT	Platinum Resistance Thermometer
<i>f.t.e.m</i>	Fuerza termo-electromotriz
TM	Trademark (marca)
ANSI	American National Standards Institute
IEC	International Electrotechnical Commission
AC	Corriente Alterna
DC	Corriente Directa
RF	Radio frecuencia

1. Introducción

En los últimos años, el desarrollo de sistemas automatizados que realicen diferentes operaciones ha tenido un progreso importante, y es de resaltar que los sensores están presentes como parte fundamental en el conocimiento del estado actual de los sistemas y juegan un papel fundamental en su funcionamiento. El sensor está tomando un lugar más importante en las interacciones diarias que cualquier otro dispositivo. Además, se está convirtiendo en parte integral del crecimiento y desarrollo tecnológico.

Específicamente cada aplicación en el campo de la automatización demanda de varios requerimientos, dentro de los cuales existe por lo menos un sensor que hace parte del sistema. Sin embargo, independientemente del tipo de aplicación todos los sensores tienen el mismo objetivo: lograr una lectura precisa y estable del mesurando objetivo, es así como, la tecnología de sensores ha tenido un crecimiento considerable en las industrias de producción o manufactura.

La industria e investigación en sensorica y en instrumentación, tiene una influencia demasiado grande, ya que existen una gran cantidad de campos en los cuales se requiere la medición de variables, como lo es la automatización, por lo cual uno de los grandes factores de la productividad empresarial depende de esta industria.

En Colombia se requiere desarrollar de una infraestructura de conocimiento de los sensores, para que en un futuro cercano, se dé origen a una industria nueva y tener las herramientas necesarias para competir a nivel mundial. Y para llegar a transformar el entorno industrial, se requiere tener el control de cómo se mide y la confianza de los datos obtenidos. Para lograr conseguir esto es necesario conocer la particularidad del funcionamiento de los elementos de medición, como los son los sensores, y de esta manera estar en la capacidad de aplicar un desarrollo a las necesidades puntuales de cada industria, provocando así una mejora considerable en los procesos industriales desarrollados.

A nivel nacional, se están produciendo cambios de conceptos simultáneos en numerosos campos del conocimiento, que están generando modelos epistemológicos renovados permitiendo comprender diferentes fenómenos, a su vez una nueva evolución de tecnologías que surgen a partir del conocimiento amplían las posibilidades de aplicación. Los avances en campos como la microelectrónica, las telecomunicaciones, la informática, la biotecnología, y la robótica,

entre otros, están transformando las estrategias de producción concebidas hasta el momento, generando así, valor agregado en la producción de bienes y servicios [33].

Pensar en incursionar en una industria propia como es la de fabricación sensores puede ser más factible de lo pensado. El presente trabajo realiza un análisis del estado actual de la industria de sensores en Colombia, identificando las variables más medidas y cuantificadas en los procesos productivos. Concluyendo de esta manera, los sensores con mayor demanda a nivel nacional, a partir de los cuales se realiza el análisis de los materiales, técnicas utilizadas y costos de fabricación.

La industria de la electrónica, particularmente la sensorica, debe propender por fortalecer su investigación en el área de la medición y de la fabricación de instrumentos, de tal manera que se pueda apropiar la tecnología de fabricación de estos e innovar constantemente de acuerdo con las características particulares del mercado. Por lo cual este trabajo permite dar un primer paso en este objetivo, en el cual se proporciona un panorama de la potencialidad de crecimiento de esta industria logrando establecer los elementos esenciales para la fabricación de sensores y así establecer su respectiva estrategia de producción.

Como metodología de trabajo; la obtención de la información se realizó por medio de una investigación mediante encuestas [21], empleando un método de muestreo no probabilístico, éste es una técnica donde las muestras se recogen en un proceso que no brinda a todos los individuos de la población iguales oportunidades de ser seleccionados [66], por lo cual la selección de las compañías fueron en función de su accesibilidad o a criterio personal e intencional del investigador a partir de un Universo que son las industrias en Colombia que usan sensores, teniendo en cuenta que la confiabilidad de los resultados de una encuesta no depende del tamaño de la población encuestada [65]. Posteriormente se realiza una búsqueda rigurosa de información para poder caracterizar los principales materiales utilizados en el proceso productivo de los sensores identificados como más demandados, al igual que sus procesos, metodologías y costos de fabricación. A partir del estudio realizado se define un diagrama de flujo del proceso de producción, determinando así un camino factible para la fabricación de sensores.

Hoy en día los sensores están encontrando un rol más prominente, la necesidad del desarrollo de dispositivos para hacer la vida mejor, más fácil y segura es demasiado latente. Los sensores están siendo utilizados en aplicaciones como: monitoreo ambiental, diagnóstico y atención médica, industria manufacturera y automotriz, electrodomésticos, defensa y seguridad, entre otros. Por lo cual se espera contribuir para que la empresa tenga contacto directo con la dinámica de la investigación, que esté dispuesta a innovar, a tomar riesgos y al emprendimiento a largo plazo.

2. Análisis del mercado de sensores en Colombia

El panorama de los sensores está evolucionando, hoy en día se habla de sensores inteligentes y toda una tecnología de sensado se está fortaleciendo a través de los desarrollos investigativos, por lo cual la necesidad de inversión tanto en calidad como en el desarrollo de sensores está creciendo. Es por esto que el pensamiento de los empresarios a la hora de invertir está cambiando y esto se ve reflejado en los productos que hoy se encuentran en el mercado.

La acelerada evolución de la electrónica, las telecomunicaciones y la informática, su convergencia, el cambio del entorno nacional y mundial y el gran impacto que su aplicación ha tenido en Colombia y el mundo, hace necesario adelantar constantemente nuevos estudios sobre sus tendencias, desde el punto de vista tecnológico y de mercados, y sobre esta base, reflexionar respecto a las oportunidades que tiene el país de ponerse a tono con la globalización y los retos que debe enfrentar para lograr una adecuada competitividad.

El Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Industria Electro Electrónica y TIC CIDEL, en alianza con la Asociación Colombiana de Empresas del Sector Electrónico y TIC (ASESEL) realizaron un estudio acerca de la prospectiva Tecnológica de la Industria Electro Electrónica de Bogotá y Cundinamarca, en el cual se hace una revisión del contexto empresarial y científico mundial y se integra con el componente tecnológico, científico, académico e institucional colombiano, en donde se pudo identificar que las principales líneas de investigación y tendencias tecnológicas en cuanto a electro electrónica son: nuevos materiales semiconductores, micro y nanoelectrónica, sistemas micro y nanoelectrónicos, magnetoelectrónica, bioelectrónica y electromedicina e integración electrónica fotónica [72].

Dentro de la industria electrónica mundial se pueden identificar tres tipos de compañías: empresas guía, fabricantes por contrato y líderes en plataforma. Son la interacción entre ellas las que determinan la evolución de la industria. Las empresas guía son las dueñas de marcas reconocidas, que venden sus productos y/o sistemas a los consumidores finales u otros negocios; los fabricantes por contrato hacen productos para las empresas guía y los líderes de plataforma son empresas exitosas en la implantación de tecnología como hardware y/o software en los productos de otras compañías, un ejemplo es el fabricante de chips Intel. Dentro de las empresas guía se pueden distinguir empresas como: Diebold, Siemens,

Rockwell, Phlios, Omron y Dover.

Para hacer la identificación de aquellas empresas que lideran el mercado de la sensorica en Colombia, se realizó una indagación a grandes y medianas empresas ubicadas en el sector C, D y E del CIU (Clasificación Industrial Internacional Uniforme) (Industrias manufactureras, de suministro de electricidad, gas, vapor y aire acondicionado y de distribución de agua; evacuación y tratamiento de aguas residuales), con el propósito de analizar las variables que más se ocupan en medir a lo largo de los procesos de producción y a su vez las principales proveedores de los sensores que utilizan, los resultados de la encuesta aplicada se presentan en el Anexo A.

En este ejercicio se tuvo en cuenta una base de datos de 500 empresas suministrada por la Cámara de Comercio de Bogotá y de 673 empresas por el Ministerio de Industria y Comercio. El 30 % de las empresas participantes se ubican en el sector manufacturero, seguido por un 10 % en el sector de minería, áridos y cemento y un 8 % en el sector de plásticos y cauchos, tal como se describe en la Figura 2-1.

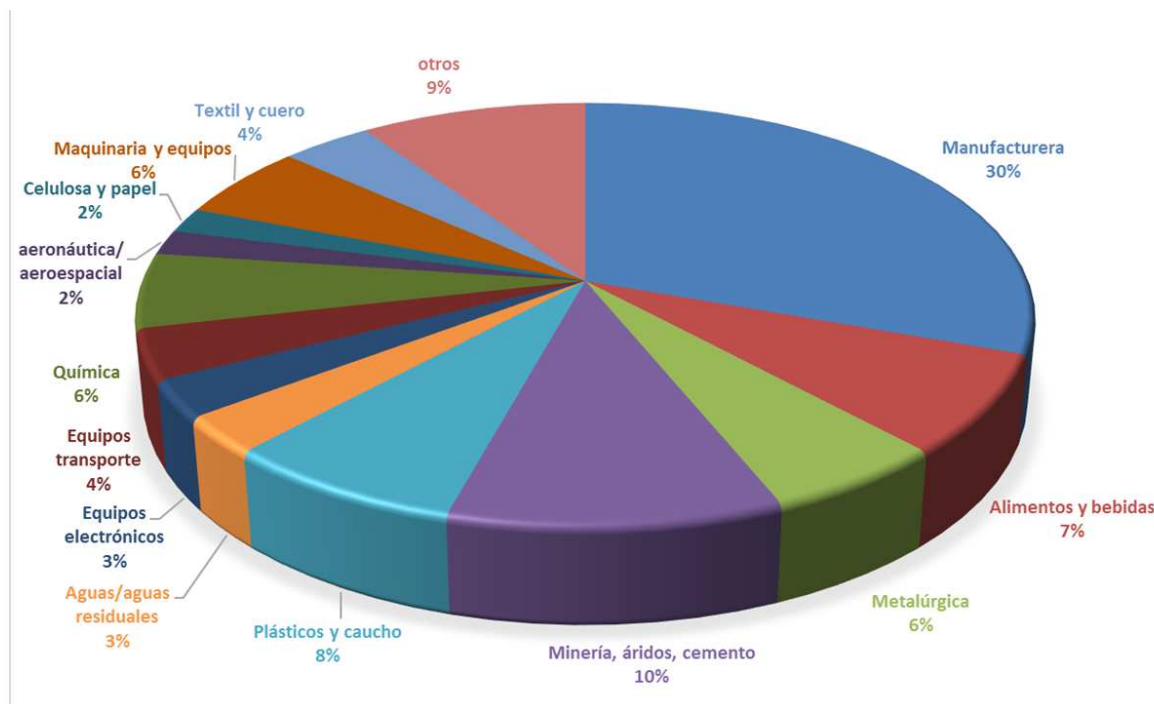


Figura 2-1.: Sectores de la industria de las empresas parte de la muestra

Teniendo en cuenta que la confiabilidad de los resultados de una encuesta no depende del tamaño de la población encuestada [65]; a partir de la respuestas dadas a la pregunta ¿Cuál(es) variable(s) requiere(n) ser medida(s) en los principales procesos de producción que tiene su

empresa? se puede afirmar que las variables más requeridas para ser medidas en un proceso productivo en la industria Colombiana son: 1. Temperatura, 2. Presión, 3. Nivel, tal como se muestra en la Figura **2-2**.

Las variables que reportan con más equipos medidores en un proceso productivo son: 1. Temperatura, 2. Presión, 3. Nivel tal como se muestra en la Figura **2-3**.

De igual manera se indagó acerca de las empresas proveedoras de la mayor cantidad de sensores para cada caso, teniendo como resultado Siemens en primer lugar, seguido por Instrumentatic, tal como se puede apreciar en la Figura**2-4**.

Adicionalmente al preguntar a las empresas vendedoras de sensores, indican que los sensores de temperatura son los más vendidos, seguido por los sensores de presión, tal como se evidencia en la Figura**2-5**. Los resultados de esta encuesta se presentan en el Anexo B.

En Colombia el desarrollo tecnológico está a cargo de la empresa extranjera, la cual tiene gran participación en nuestra industria a través de la manufactura. Debido a la diversidad de líneas y a los mercados estrechos que posee la industria colombiana, avanzar tecnológicamente no resulta ser fácil. Desarrollar o asimilar tecnología con esfuerzo colombiano, es el gran reto por mantener, esto a través del fortalecimiento de las áreas de investigación y desarrollo al interior de las empresas [10].

Es de gran importancia fortalecer la actividad investigadora dentro de las empresas en desarrollo o con prospección innovadora, en donde muchas veces se requiere una fuerte inversión en el departamento de electrónica. Y a pesar del nacimiento de departamentos de investigación y desarrollo, es uno de los campos más abandonados por las industrias colombianas, ya que sus impactos resultan ser a mediano y largo plazo.

A esto se suma la debilidad financiera de los centros especializados – órganos de creación, difusión y transferencia de conocimiento y tecnología al sector productivo– creados desde principios de los noventa, que no ha permitido garantizar su normal operación dadas las fluctuaciones de apoyo financiero generadas por el Estado, por lo que requieren el desarrollo de una industria que demande y produzca conocimiento [13].

Hoy en día Colombia se limita a propiciar las exportaciones de productos naturales, una serie de insumos de poco valor agregado y mucha inversión de capital. Los requerimientos de inversión tecnológica que se necesitan en las empresas requieren de dos aspectos fundamentales: la automatización de procesos y la incorporación de tecnología al producto mismo. Y en términos generales resulta ser más costoso comprar tecnología que desarrollarla, pero lastimosamente muchas veces se hace necesario hacerlo por falta de disponibilidad de recursos.

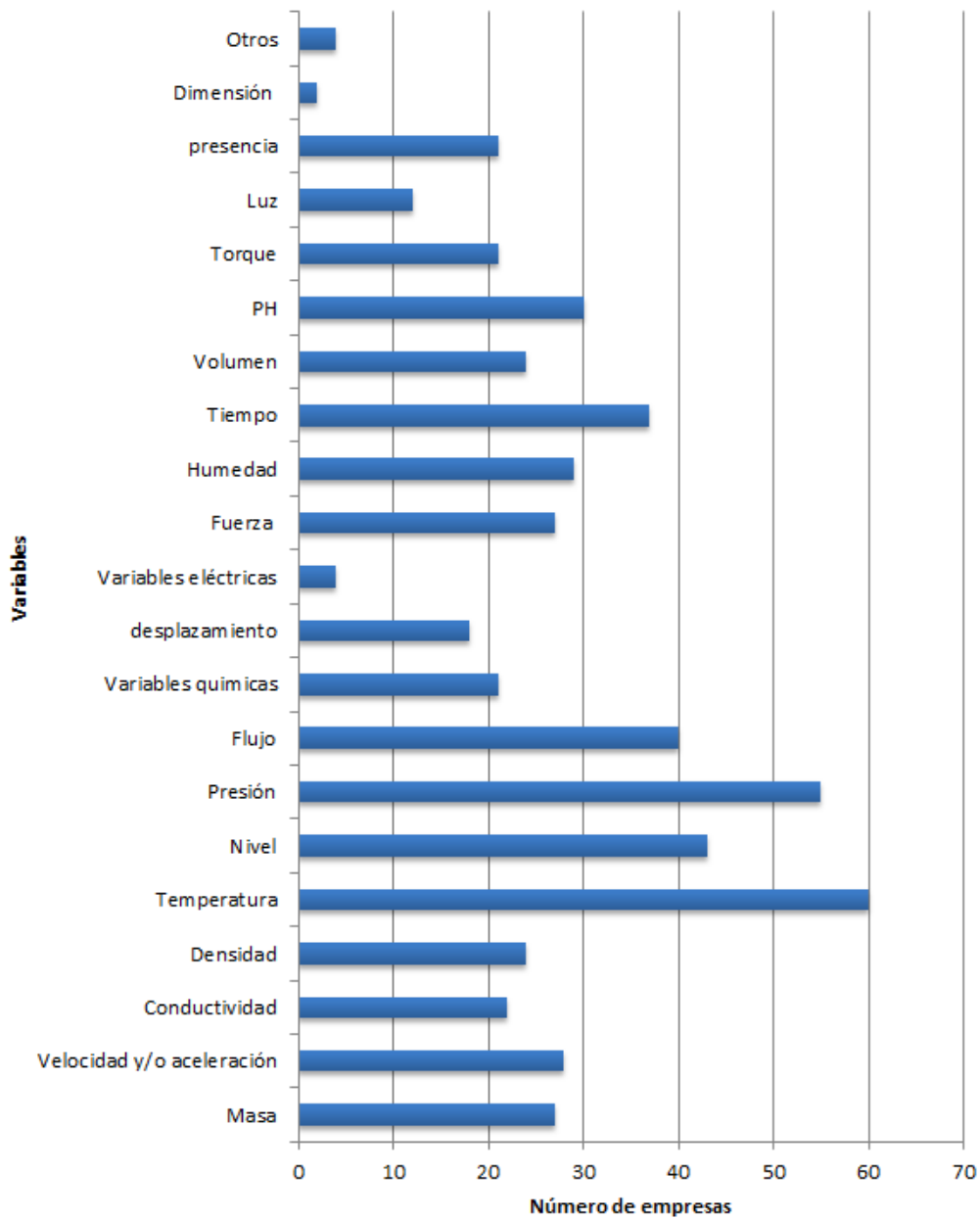


Figura 2-2.: Variables más medidas en un proceso productivo

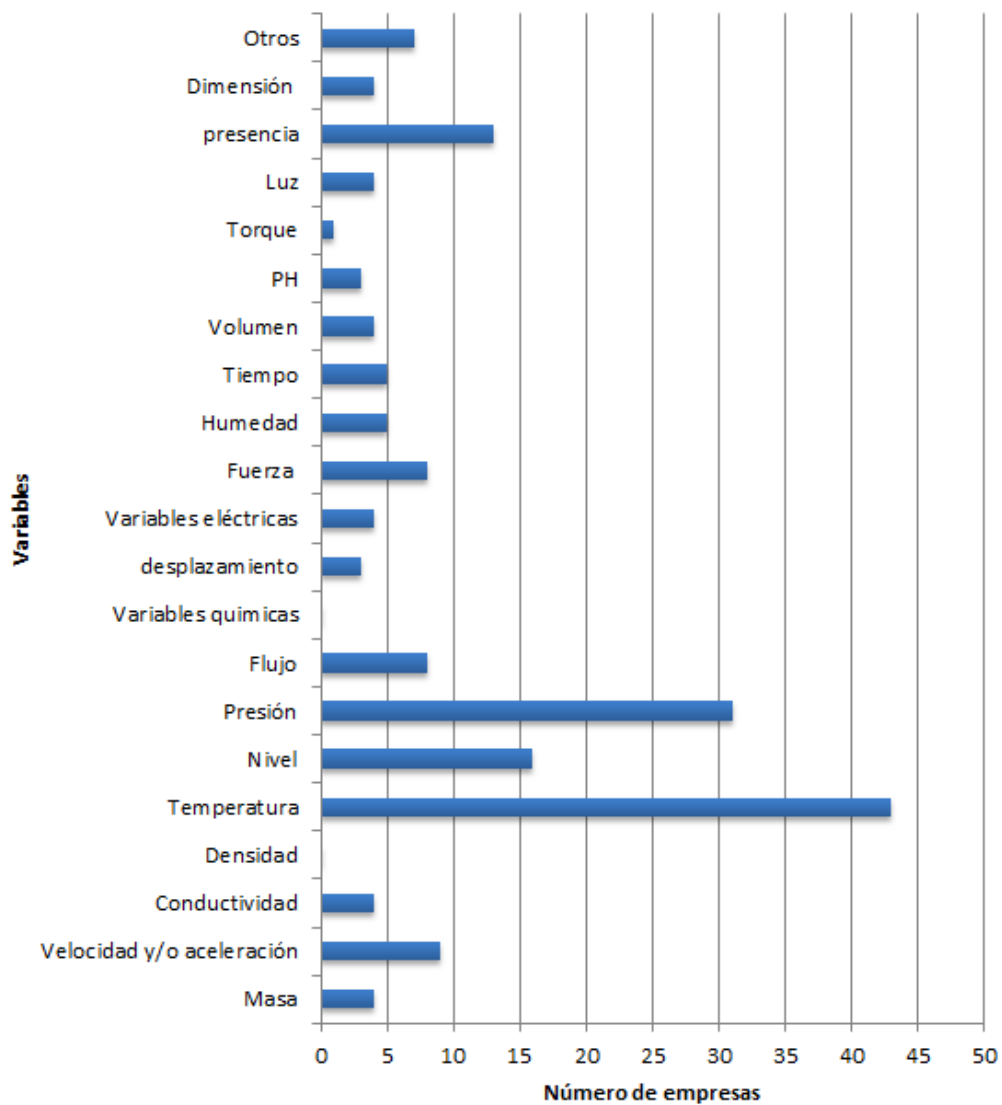


Figura 2-3.: Número de respuestas dadas por empresas del mayor número de sensores por variable que la empresa compra

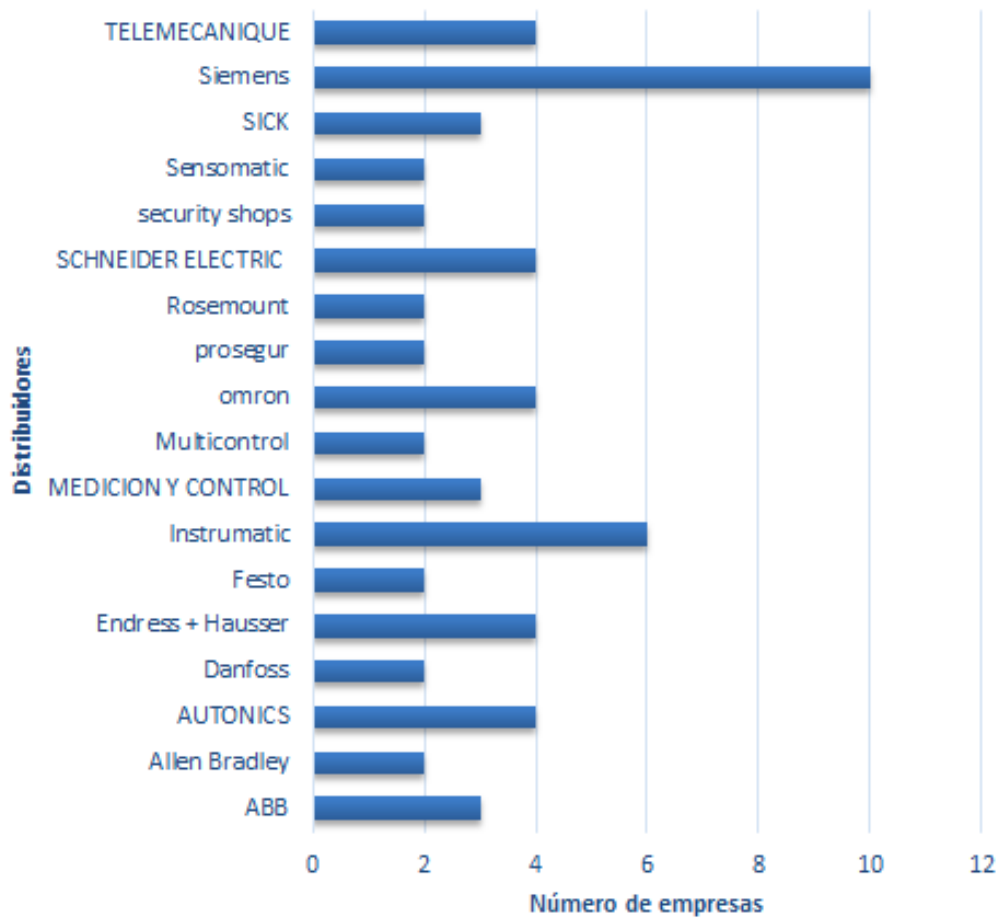


Figura 2-4.: Número de respuestas dadas por empresas de sus distribuidores de sensores más frecuentes

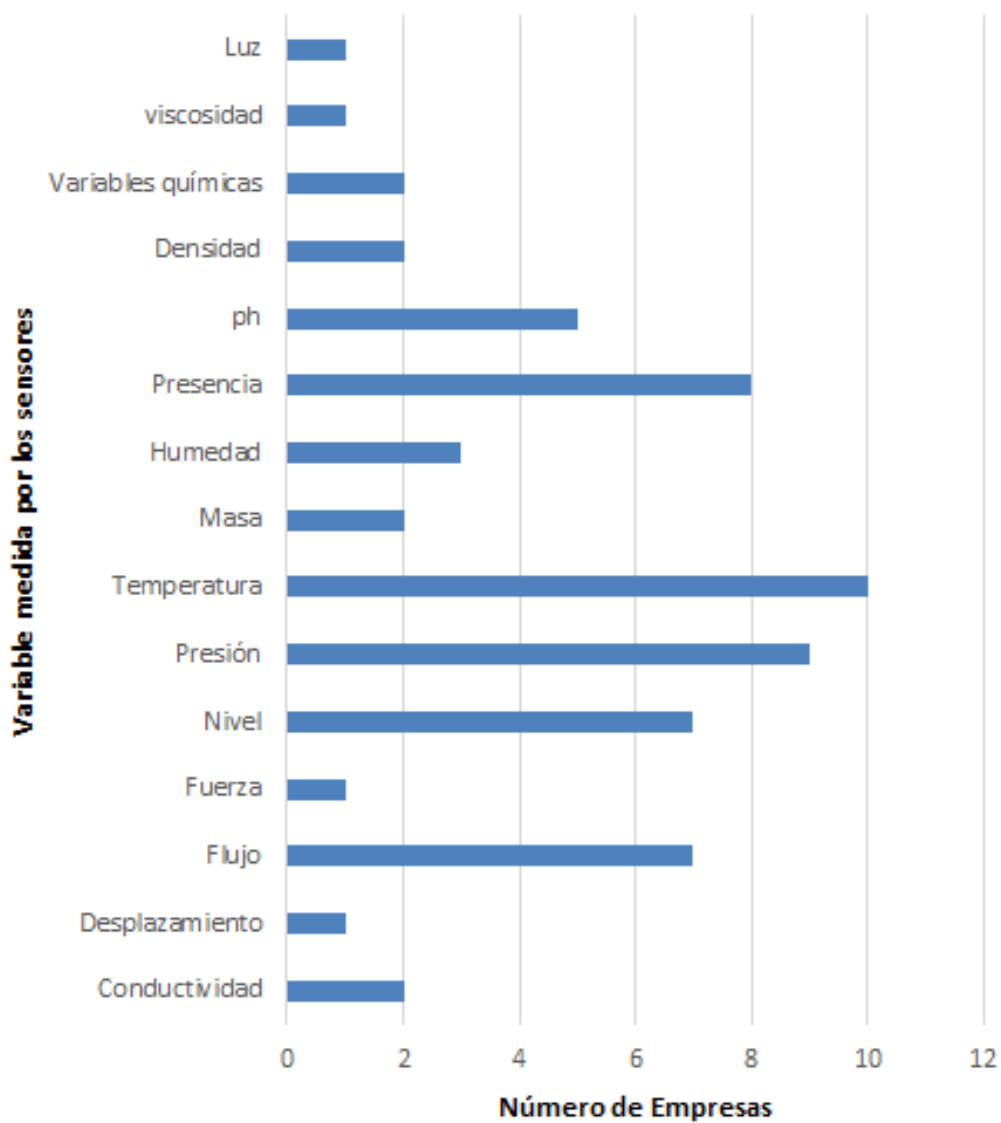


Figura 2-5.: Número de respuestas dadas por empresas vendedoras de los sensores por variable más vendidos.

Colombia requiere tener empresas con alto valor agregado, de mano de obra y de ingeniería nacional, en la cual se aproveche a los tecnólogos e ingenieros de las ramas especializadas, para que aporten sus conocimientos en la creación de industrias con alto componente tecnológico.

Existe la necesidad de innovación tecnológica, diversificando productos y manteniendo precios competitivos para no dedicarse solamente al ensamble de productos. Sin embargo, existe una serie de paradigmas acerca de la innovación que no permiten iniciar una inversión fuerte en el desarrollo tecnológico, como lo es; la seguridad que ofrece al comprar tecnología, los países desarrollados son los que pueden desarrollar tecnología, el mercado nacional no es suficiente, hay deficiencia de insumos e infraestructura en Colombia, poco personal calificado, entre otros. Sin embargo, puede que sea más rápido el retorno de inversión al comprar tecnología, pero al no tener el conocimiento profundo del porqué de cada concepto de diseño, no es posible evolucionar a largo plazo [12].

Sin embargo, como aspecto a resaltar en el transcurso del periodo enero a octubre de 2016, las exportaciones no mineroenergéticas representaron el 46.1 % de las exportaciones totales colombianas [52], lo que nos indica que se está fortaleciendo este sector a pesar de los imaginarios bajo los cuales hoy se trabaja.

Con respecto al área de sensorica, Colombia no tiene una trayectoria significativa en investigación en el área de la electrónica, por lo que no se ha profundizado en gran medida en el campo de los sensores. Las Facultades de Ingeniería Electrónica nacieron hasta finales de la década del 50 y mediados del 60, y la actividad de los ingenieros se centraba en la operación de equipos y sistemas, mantenimiento y adopción de algunas tecnologías [11]. Además la actualización de los programas universitarios no va a la misma velocidad que la dinámica mundial de la tecnología.

Se requiere fortalecer la estandarización de los diferentes procesos de medición, por lo cual se han incorporado verdaderos sistemas de medición integrales, los cuales requieren el avance constante en procesamiento de datos, tecnología de sensores y diseño de circuitos integrados. Puesto que Colombia está en crecimiento en algunos sectores como lo es el de la automatización con cadenas productivas, como metalmecánica y automotriz, fibras, textiles y cementos, algunas empresas fabrican sistemas de control, robots industriales y sistemas automáticos de almacenamiento, que dan soluciones innovadoras y exportables.

El Sistema Nacional de Innovación colombiano también se ha globalizado, debido a la conformación de redes integradas de producción internacional, manifiestas en una presencia cada vez mayor de empresas multinacionales, que avanzan en la organización de la producción y

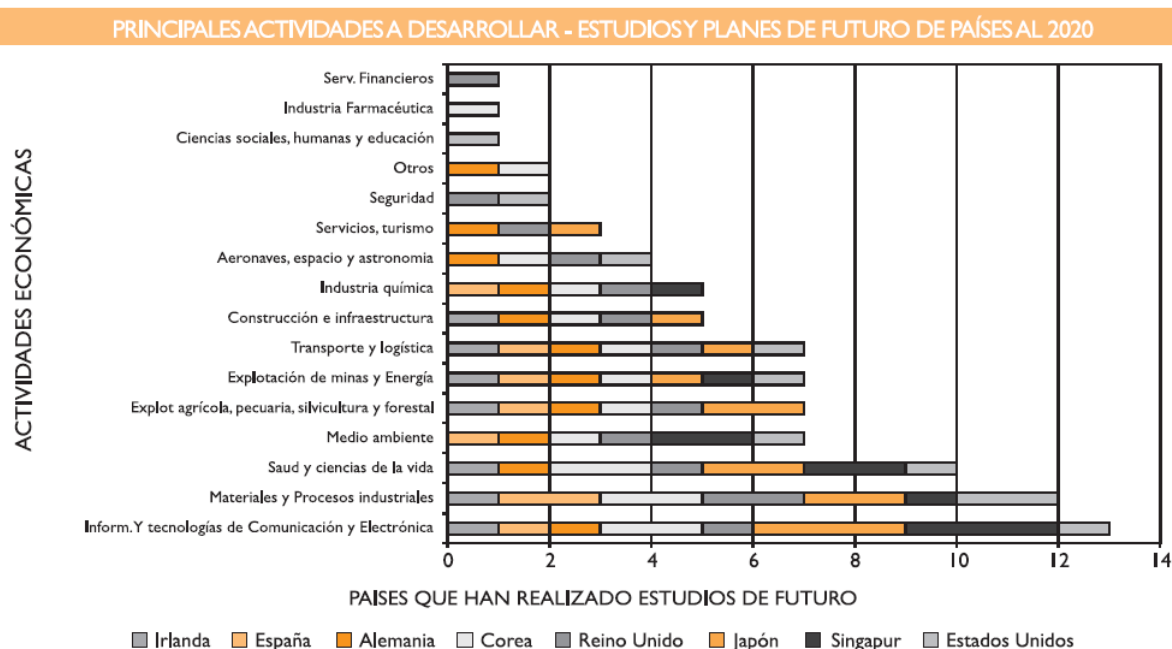


Figura 2-6.: Principales actividades por desarrollar Estudios y planes de futuro de países al 2020 [13]

el consumo a magnitud hemisférica, buscando economías de escala, ventajas de la especialización y racionalización de costos [13].

De acuerdo con el plan estratégico del programa nacional de desarrollo tecnológico, industrial y calidad, publicado por Colciencias, se realizaron ejercicios prospectivos de naciones emergentes y desarrolladas, arrojando el resultado ilustrado en la Figura 2-6, que muestra las actividades prioritarias para los países seleccionados (Estados Unidos, Japón, Reino Unido, Singapur, Corea, Alemania, España e Irlanda) sobre las cuales se han realizado estudios de futuro [13].

En cuanto a la situación actual, en Colombia, sectores como el de equipos y tecnologías de comunicación y electrónica, presentan altas potencialidades de desarrollo (Figura 2-7) por pertenecer al área de las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) las cuales han avanzado muy favorablemente en el país. Por su alta interrelación, en algunos análisis se presentan como una sola actividad económica, no obstante, aquí se separan en dos sectores: producción de software y producción de equipos y tecnologías de comunicación y electrónica. Para los dos se identifican capacidades regionales en Valle, Bogotá y Medellín, en aspectos como educación superior y capacidad empresarial.

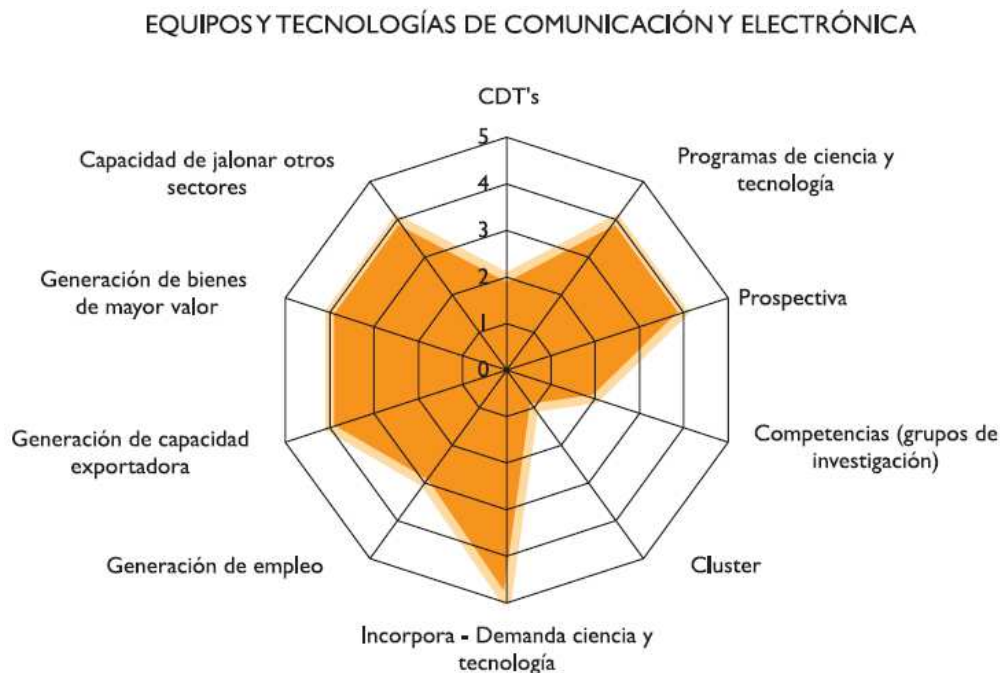


Figura 2-7.: Actuality and potential for the sector [13]

Es importante tener en cuenta los aspectos a mejorar, los cuales se relacionan con las competencias de los grupos de investigación, la construcción de asociatividad y conglomerados productivos, las capacidades de los Centros de Desarrollo Tecnológico y su posibilidad de generar empleo. Por otra parte, este sector tiene el potencial de demandar ciencia y tecnología, así como incorporar valor agregado en conocimiento a los bienes y servicios y a los procesos de otros sectores y en consecuencia coadyuvar en su progreso, además cuenta con un potencial exportador interesante si aumenta el valor agregado de sus propios productos.

Como punto de partida se puede tomar el índice de Producción Industrial, el cual tiene como finalidad estimar la evolución mensual de los sectores minero energético, manufacturero, suministro de electricidad y gas, y captación, tratamiento y distribución de agua en el corto plazo, a través de la variable de producción real. En mayo de 2018, el índice de producción industrial presentó una variación de 1.7% con relación al mismo mes de 2017 [53].

En la Figura 2-8 se puede apreciar el crecimiento que ha tenido este índice en los últimos tres años, evidenciándose una disminución en el 2016 y una posterior recuperación en el segundo semestre del 2017 y en el transcurso del 2018.

En conclusión, la industria de la electrónica, particularmente la sensorica, debe propender por fortalecer su investigación en el área de la medición y de la fabricación de instrumentos, de tal manera que se pueda apropiar la tecnología de fabricación de estos e innovar constan-

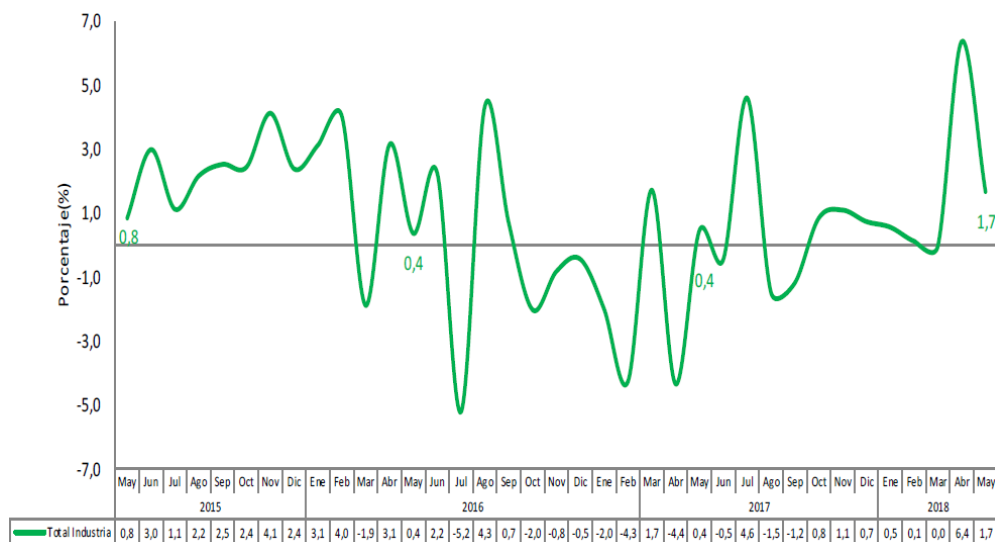


Figura 2-8.: Variación anual del índice de producción industrial [53]

temente, de acuerdo con las características particulares de nuestro mercado.

Es por esto que se toma como línea base los sensores que resultan ser más demandados en la industria colombiana, como lo son sensores de Temperatura y Presión, particularmente aquellos reportados como los más utilizados: Detectores de temperatura resistivos, termopares y galgas extensiométricas. En los siguientes capítulos se presenta el análisis del proceso de fabricación del elemento primario para un sensor, materias primas y maquinaria requerida, a su vez un estudio de costos para generar un punto de partida en la fabricación nacional de estos dispositivos.

3. Medición de Temperatura

La temperatura es una medida física clave que está asociada con todos los campos de la ciencia. En general, está relacionada con la seguridad y el rendimiento, y se utiliza para la toma de decisiones importantes en las industrias.

La temperatura es la medida de la energía cinética promedio de las moléculas de un gas, líquido o sólido. Un sensor térmico es un dispositivo que se usa específicamente para medir la temperatura. De esta forma, los sensores térmicos nos pueden dar una forma cuantificable de describir la sustancia, ya sea un objeto, el entorno en el que se coloca un objeto o el entorno en el que se distribuye.

Entre los sensores de temperatura, los termopares y RTD's son los comúnmente utilizados en industrias y laboratorios de investigación. Los termopares tienen un gran rango de temperatura, de menos de -200°C a más de $2,000^{\circ}\text{C}$, y muy buena precisión. Los RTD por su parte, pueden proporcionar una mejor precisión en comparación con los termopares, pero tienen un rango de temperatura más pequeño y pueden ser más costosos que los termopares [35].

A continuación se describirán los procesos de fabricación de los RTD y de los termopares.

3.1. RTD (Resistance Temperature Detector)

Un RTD (Resistance Temperature Detector) es un elemento de medida, cuyo principio de funcionamiento está basado en la variación de resistencia eléctrica de un alambre de metal puro con respecto a su temperatura [67]. En la mayoría de las aplicaciones este dispositivo resulta: ser bastante robusto, ser fácil de manejar, tener una vida útil prolongada y en comparación con los demás elementos de medición de temperatura, tiene:

- Rango de temperatura entre -200°C a 850°C .
- Curva característica cercana a lineal.
- Alta precisión.
- Buena intercambiabilidad.

La utilización de estos sensores de alta sensibilidad es imprescindible en los procesos donde hay altas presiones y temperaturas extremas, caudales turbulentos y fluidos agresivos. Como el sensor, básicamente mide su propia temperatura, este adopta la temperatura real del medio muy rápidamente [23].

El funcionamiento de un RTD se fundamenta es el cambio de la resistencia eléctrica en un alambre cuando hay una variación en la temperatura. En el alambre, la cantidad de electrones a disposición para la conducción no se modifica apreciablemente con respecto a la temperatura, sin embargo, si esta incrementa, las vibraciones de los átomos cerca de sus posiciones de equilibrio son mayores, y así dispersan eficazmente a los electrones, reduciendo su velocidad media. Esto se traduce a un coeficiente de temperatura positivo, o en un incremento de la resistencia con respecto a la temperatura. Esta dependencia se puede representar de la forma:

$$R = R_0(1 + \alpha_1 T + \alpha_2 T^2 + \dots + \alpha_n T^n) \quad (3-1)$$

Donde R_0 es la resistencia dada en la temperatura de referencia y T el aumento de la temperatura para la medida de referencia. El cambio de resistencia se da para la variación de dimensiones asociado con el cambio de temperatura. Para el hilo de platino, $\alpha_1 \approx 3,90 \times 10^{-3}/K$ (dependiendo de la pureza) y $\alpha_2 = -5,83 \times 10^{-7}/K^2$; hasta 650°C , el valor del término lineal $\alpha_1 T$ es más de diez veces mayor que el término no lineal $\alpha_2 T^2$. Para el platino en película fina, $\alpha_1 = 3,912 \times 10^{-3}/K$, $\alpha_2 \approx -6,179 \times 10^{-7}/K^2$ y $\alpha_3 = 1,92 \times 10^{-7}/K^3$ [50]

El funcionamiento de un RTD se basa en los fenómenos predecibles y repetibles de la resistencia eléctrica que poseen los metales al modificar su temperatura. Debido a que el coeficiente de temperatura para todos los metales puros es del mismo orden $-0,003$ a $0,007\Omega/^\circ\text{C}$. Los metales más utilizados para la detección de la temperatura son el platino, níquel, cobre y molibdeno. No obstante, el material más utilizado para su construcción es el platino, debido a su respuesta predecible, estabilidad a largo plazo y durabilidad. Todos los RTD tienen coeficientes de temperatura positivos (PTC) y su proceso de fabricación puede ser de dos formas [26]:

- **Película fina:** se fabrican con una película fina de platino o sus aleaciones y se depositan en un sustrato de cerámica adecuado, como por ejemplo una membrana de silicio micromecanizado. El RTD generalmente está hecho en forma de zig-zag para garantizar una relación longitud-anchura suficientemente grande. Su esquema básico se muestra en la Figura 3-1.

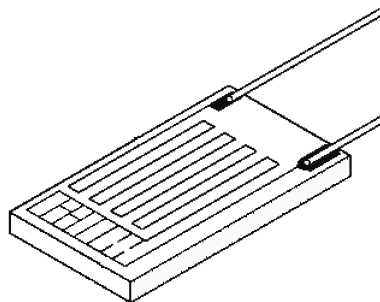


Figura 3-1.: RTD de película fina [4].

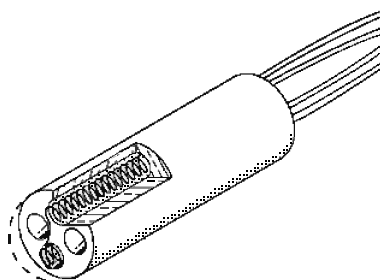


Figura 3-2.: RTD de alambre enrollado [4].

- **Enrollados con alambre:** son aquellos donde una porción de alambre, generalmente de platino, cobre o níquel, está bobinado y es parcialmente soportado por un adhesivo de vidrio de alta temperatura dentro de un tubo de cerámica. Esta construcción permite que el detector tenga mayor estabilidad para aplicaciones industriales y científicas que así lo requieran. Su esquema básico se muestra en la Figura 3-2.

Los RTD de tipo alambre se fabrican enrollando un hilo muy fino de alambre de platino en forma de bobina hasta que haya suficiente material para igualar 100Ω de resistencia. Luego, la bobina se inserta en un mandril y se empaqueta con aislantes alrededor para evitar que el sensor se cortocircuite y para proporcionar resistencia a la vibración. Este es un método que consume mucho tiempo y todo el trabajo se hace manualmente bajo el microscopio, y el resultado es un diseño libre de tensiones. Sin embargo, se requieren elementos sin deformación para mediciones industriales por debajo de -200°C [4].

Los RTD de tipo alambre son generalmente más precisos, debido al control más estricto sobre la pureza de metal, permitiendo asegurar intercambiabilidad superior y estabilidad a las temperaturas más altas. No obstante, suelen ser más costosos en comparación con los de película fina, además, estos últimos están disponibles en tamaños más pequeños y son más robustos, además cuando se usan técnicas de microelectrónicas su fabricación resulta ser más sencilla y más precisa, por lo que se presta para la fabricación a gran escala y bajo costo [67]. Es por esto, que hace algún tiempo la mayoría de los RTD eran de tipo alambre,

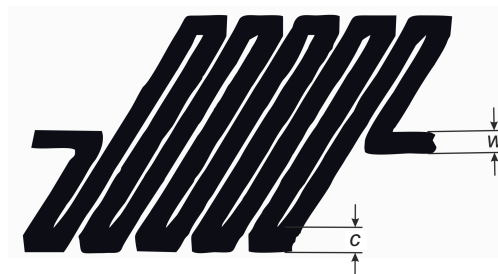


Figura 3-3.: Dimensiones de un RTD[67].

y ahora los tipos de RTD de película delgada o fina están reemplazando el tipo de alambre, teniendo en cuenta también sus pequeñas dimensiones y corto tiempo de respuesta [31].

La fabricación de un RTD por película fina se realiza en dos etapas, la primera de ellas: depositando en un sustrato, el platino (Pt), mediante una técnica llamada pulverización catódica. Como sustrato es utilizado el dióxido de silicio o el óxido de aluminio (alúmina) y el vidrio, en una concentración de 99,6 % aproximadamente; y la segunda: la elaboración de un patrón en zig-zag, el cual es formado mediante un proceso conocido como fotolitografía.[36] Estas etapas se describen con mayor detalle en el Capítulo 5.

3.1.1. Dimensionamiento

Para el dimensionamiento de un RTD es necesario definir su espesor (c), longitud (L) y ancho(w), tal como se muestra en la Figura 3-3 [67].

La siguiente ecuación relaciona las dimensiones de un RTD:

$$R = \rho \frac{L}{wc} \quad (3-2)$$

En la cual: ρ =resistividad del metal, L =longitud, w =ancho y c =espesor.

Una resistencia Pt100 es fabricada con platino puro, debido a que su resistencia es conocida y documentada para diferentes temperaturas. El más mínimo cambio de temperatura provoca una variación de la resistencia definida y reproducible, lo que permite determinar la temperatura a partir de esta resistencia. Particularmente un Pt100 tiene una resistencia de 100Ω a 0°C y es quizá el sensor RTD más utilizado [47].

Por otra parte, los RTD en general no pueden ser usados en su forma básica sin un elemento de protección, ya que son demasiado delicados. Por lo general, están integrados en algún



Figura 3-4.: Funda sensor de temperatura[31].

tipo de funda o cubierta protectora (Figura 3-4), que les permite soportar las diversas condiciones ambientales a las que pueden quedar expuestos cuando son utilizados. Por lo general se trata de un tubo de acero inoxidable con una grasa conductora (que también amortigua la vibración). Los diámetros de tubo estándar incluyen 3, 4.5, 6, 8, 10, 12 y 15 mm y longitudes de tubos estándar son 250, 300, 500, 750 y 1000 mm[31].

3.1.2. Normatividad

Se aplican dos estándares a los sensores de resistencia de platino:

- La norma europea DIN-IEC es reconocida en todo el mundo como un requisito de cumplimiento para los sensores de resistencia de platino.
- En Estados Unidos se puede aplicar un estándar basado en otros parámetros.

DIN EN 60751 (o IEC 751) define la resistencia eléctrica para un sensor de resistencia Pt100 de la siguiente manera:

- Pt100 a 0°C = 100,00Ω
- Pt100 de 0 a 100°C = coeficiente de temperatura de resistencia (TCR) de 0.00385 Ω/Ω/°C

La norma DIN IEC 751 especifica dos clases de tolerancias de temperatura:

- Clase A = $\pm(0,15 + 0,002 \times T)^\circ\text{C}$ o $100,00 \pm 0,06\Omega$ a 0°C.
- Clase B = $\pm(0,3 + 0,005 \times T)^\circ\text{C}$ o $100,00 \pm 0,12\Omega$ a 0°C.

Hay dos clases de tolerancias de temperatura vigentes en la industria:

- Clase A = $1/3DIN = \pm 1/3 \times (0,3 + 0,005 \times T)^\circ\text{C}$ o $100,00 \pm 0,10\Omega$ a 0°C
- Clase B = $1/10DIN = \pm 1/10 \times (0,3 + 0,005 \times T)^\circ\text{C}$ o $100,00 \pm 0,03\Omega$ a 0°C

A continuación se presenta la intercambiabilidad de los sensores RTD Pt 100 en °C:

Temp°C	Clase B	Clase A	1/3 DIN	1/10 DIN
-200	1.30	-	-	-
-100	0.80	-	-	-
-50	0.55	0.25	0.18	-
0	0.30	0.15	0.10	0.03
100	0.80	0.35	0.27	0.08
200	1.30	0.55	0.43	-
250	1.55	0.65	0.52	-
300	1.80	0.75	-	-
350	2.05	0.85	-	-
400	2.30	0.95	-	-
450	2.55	1.05	-	-
500	2.80	-	-	-
600	3.30	-	-	-

Calibración

Los RTD poseen dos tipologías de calibración la primera de ellas, la caracterización y la segunda las pruebas de tolerancia. La tipología de calibración que es conveniente realizar está determinada por el uso que recibirá y por la exactitud que se requiera.

La caracterización es aquella tipología en la que se establece el valor de la resistencia de la unidad bajo prueba (UUT) en varios puntos de temperatura, dichos puntos son ajustados a una expresión matemática, por medio de este método se suele realizar las calibraciones de RTD con mayor exactitud, en una calificación de media a alta. Por otra parte, las pruebas de tolerancia es una forma de calibración que consiste en comparar la resistencia de la UUT con respecto a valores específicos a temperaturas determinadas. No se efectúa algún tipo de ajuste de los datos, por lo que se aplican en estudios de poca exactitud. Los valores se precisan gracias a uno de los modelos más comunes y utilizados, como lo es la curva IEC 60751. Los RTD calibrados son utilizados en diversidad de aplicaciones de tipo industrial donde el lector no puede aceptar coeficientes únicos, sino que está proyectado con base en una curva RTD típica. La sonda debe verificarse para comprobar que atiende la curva de interés. [18].

3.2. Termopar

Los Termopares son sensores de temperatura ampliamente utilizados, ya que son pequeños, robustos, relativamente más económicos, fáciles de usar y pueden medir en un gran rango de temperaturas. Estos elementos son sensores pasivos, por lo que generan un voltaje en respuesta a la temperatura sin requerir una fuente de poder externa.

Thomas J. Seebeck fue quien descubrió, en 1822, que en un circuito de dos metales distintos homogéneos, A y B, con dos uniones a diferente temperatura, aparece una corriente eléctrica. Es decir, hay una conversión de energía térmica a energía eléctrica, o si se abre el circuito se tendrá una fuerza termo-electromotriz (f.t.e.m.) que dependerá de los metales y de la diferencia de temperaturas entre las dos uniones [17].

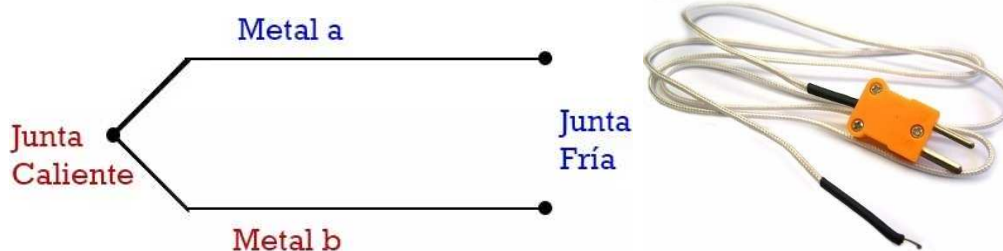


Figura 3-5.: Estructura de un termopar[32].

La definición del coeficiente de Seebeck, S_{AB} , se da por la correspondencia entre la f.t.e.m., E_{AB} , y la diferencia de temperatura entre las uniones, T :

$$S_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} = S_A - S_B \quad (3-3)$$

Donde S_A y S_B son la potencia termoeléctrica absoluta de A y B respectivamente. Comúnmente, S_{AB} no es constante, además depende de T , y aumenta al incrementar T . Es importante destacar que si la corriente circula por el circuito depende de la resistencia de los conductores, la f.t.e.m. no depende ni de la resistividad, ni de la selección, ni la distribución o gradientes de temperatura, esta solo obedece a la diferencia entre la temperatura de las uniones y la propiedad de los metales.

En las uniones de los termopares es de importancia asegurar: una resistividad alta y de esta manera obtener una resistencia elevada sin necesidad de una gran cantidad masa, ya que esto implicaría capacidad calorífica alta y respuesta más lenta; también produciría un coeficiente




CODIGO ANSI/IEC	Código de Color ANSI MC 96.1	Aleaciones +plomo	Aleaciones -plomo	Rango máximo de temperatura
J		Hierro Fe (manético)	Constantan níquel de cobre Cu-Ni	-210 to 1200° C -346 to 2193°F
K		Chromega™ Níquel Cromo Ni-Cr	Alomega™ Níquel Aluminio Ni-Al (manético)	-210 to 1372° C -454 to 2501°F
T		Cobre Cu	Constantan níquel de cobre Cu-Ni	-210 to 400° C -454 to 752°F

Tabla 3-1.: Código de colores ANSI/IEC[46]

de temperatura débil; resistencia a la oxidación a temperaturas altas, pues deben tolerar la atmósfera donde van a estar; y mantener linealidad en lo posible. Estas propiedades se puede conseguir usando aleaciones especiales como: níquel (90)/cromo (10) –cromel–; cobre (57)/níquel (43); níquel (94)/aluminio (2)/manganeso (3) /silicio (1) –alumel–; entre otros, en la Tabla **3-1** se describen las aleaciones utilizadas en los termopares J, K y T (los más comunes) teniendo en cuenta los códigos ANSI e IEC. Para protección contra agentes externos del ambiente se utiliza una vaina que normalmente es de acero inoxidable, esta vaina afectará la velocidad de respuesta y la robustez de la sonda.

Los Termopares de propósito general soportan máximo la temperatura del aislante del cable de extensión: PVC¹ (105°C), FEP² (200°C), fibra de vidrio (400°C) y fibra con malla (400°C), sin embargo teniendo en cuenta la amplia gama de materiales que se pueden utilizar en la fabricación de termopares, el rango de temperatura que manejan resulta ser mucho mayor que las RTD [17].

Lo Tipo J: Fe³ (+) versus constantan (-) son adecuados en el vacío y en atmósferas oxidantes, reductoras o inertes, en el rango de temperatura de 0 a 760°C. La tasa de oxidación en el termoelemento de hierro es rápida por encima de 540°C , y se recomienda el uso de cables de calibre pesado cuando se requiere una vida prolongada a temperaturas más altas. Este termopar no se recomienda para uso debajo del punto de hielo porque la oxidación y la fragilidad del termoelemento de hierro hacen que su uso sea menos deseable que el Tipo T

¹Policloruro de vinilo

²Propileno Etileno Fluorado

³Hierro

[26].

Lo Tipo K: 10%Ni⁴/Cr⁵ (+) versus 5%Ni⁶/Al⁷/Si⁸ (-), Se recomiendan para uso en una atmósfera oxidante o completamente inerte en un rango de temperatura de -200 a 1,260° C. Debido a su resistencia a la oxidación, a menudo se usan a temperaturas superiores de 540°C. Sin embargo, el tipo K no debe usarse en atmósferas reductoras, en atmósferas sulfurosas y en vacío[26].

Lo Tipo T: Cu (+) frente a constantan (-), son resistentes a la corrosión en atmósferas húmedas y son adecuados para mediciones de temperatura bajo cero. Su uso en el aire en ambientes oxidantes está restringido a 370°C debido a la oxidación del elemento térmico de cobre. Se pueden usar a temperaturas más altas en algunas otras atmósferas[26].

En cuanto a la fabricación los termopares formados mediante soldadura o simplemente presionando dos materiales juntos dan voltajes idénticos. Si se permite que fluya corriente, las corrientes pueden ser diferentes puesto que la resistencia por contacto difiere para los diversos métodos de unión. Generalmente se utiliza soldadura (de gas o eléctrica), aunque se utiliza tanto soldadura de plata como soldadura blanda (sólo a bajas temperatura) en pares de cobre/constantan. Están disponibles dispositivos de soldar por descarga de capacitor especiales (requeridos en particular para termopares de alambre muy fino)[35].

La estructura típica del termopar comprende un par de hilos unidos en un extremo para formar un termopar, estando los cables dentro de una vaina metálica que está cerrada en un extremo y abierta en el otro. El termopar y los cables dentro de la funda están rodeados y aislados por material óxido mineral, compactado y triturado, como el óxido de magnesio. El otro extremo de la funda desde la cual se extienden los cables de los termopares se llena con cemento cerámico para sellar los cables. La porción del extremo cerrado de la funda que encierra al termopar tiene un diámetro reducido con relación a la otra porción del extremo abierto de la funda [68]. Existen distintos tipos de juntura en los termopares, tal como se describen en la Tabla **3-2**.

Un nuevo concepto utilizado hoy en día son los termopares de película delgada, por siglas en inglés (TFTs) que fue reportado por primera vez en 1930 por Harris *et al* [28]. Estos termopares son fabricados mediante los principios de fotolitografía. En este caso la fotoresistencia expuesta se vuelve soluble en el revelador. La estructura general y el orden de fabricación son los siguientes: en primer lugar la deposición de la capa de calentador de NiCr, después los conductores de aluminio, a continuación, la capa de aislamiento de óxido,

⁴Níquel

⁵Cromo

⁶Níquel

⁷Aluminio

⁸Silicio




Tipo de junta	Construcción	Descripción	Tipo de aislante
Aterrizada		La junta de un termopar aterrizado se suelda a la cubierta de protección dando una respuesta más rápida que una junta de tipo aislado	Oxido de Magnesio pureza 99.4 %
Aislada		La junta del termopar es aislado físicamente de la cubierta por un polvo MgO (Oxido de magnesio), el cual proporciona un aislamiento eléctrico ya que no toca la protección metálica y su respuesta es la más lenta de los tres tipos.	Oxido de Magnesio pureza 99.4 %
Expuesta		La junta del termopar es expuesta quedando por fuera de la cubierta de protección, dando una respuesta más rápida que la aterrizada	Oxido de Magnesio pureza 99.4 %

Tabla 3-2.: Tipo de junta de termopares[7]

más tarde la patilla de cromo del termopar y, por último, la patilla de níquel del termopar. El proceso de fabricación por película delgada se describe con mayor detalle en el Capítulo 5.

Después de la fabricación, los termopares son calibrados usando pequeñas resistencias de temperatura las cuales son recubiertas con conductores epóxicos de plata en la parte superior de las juntas metálicas.

La reproducibilidad de este proceso y la naturaleza pasiva de los termopares que no requieren potencia, hacen de esta tecnología una solución atractiva. Los termopares pueden reducirse y encaminarse a lo largo de trayectorias de forma arbitraria en capas metálicas dedicadas, encima de un circuito integrado procesado y/o usando métodos de fabricación CMOS existentes.

Calibración

La calibración se realiza mediante la medición de la salida de voltaje de la unidad bajo prueba (UUT), mientras que la unión de medición (caliente) se expone a una fuente de temperatura y la unión de referencia (fría) se mantiene a una referencia determinada (por lo general, a 0°C). Se requieren los siguientes instrumentos [56]:

- *Sonda de referencia:* Según la precisión requerida, la sonda de referencia será un SPRT⁹, un PRT¹⁰ o un termopar de mejor calidad y calibración que los termopares bajo prueba. Dado que este instrumento es la referencia de la calibración, tanto su precisión como su estabilidad son importantes.
- *Indicadores para la sonda de referencia y el termopar bajo prueba:* Dado que los termopares provocan una salida de voltaje, los requisitos para su lectura son distintos a los de un RTD o un termistor, la salida de voltaje es muy baja, y la pequeña incertidumbre de voltaje, requiere de mediciones de voltaje extremadamente precisas. Debe tenerse en cuenta la unión de referencia del termopar. La mayoría de los indicadores de los termopares tienen “uniones electrónicas de referencia” que se denominan comúnmente “compensación de unión fría”. Este circuito es adicional, mide la temperatura en la conexión del indicador del termopar cuando se conecta el alambre a dicho indicador y compensa la temperatura de referencia distinta de cero. Este tipo de compensación es muy conveniente, pero a menudo no resulta tan precisa como el punto real de un baño de hielo.
- *Fuente de temperatura para la sonda de referencia, termopar bajo prueba y unión de referencia del termopar:* Las fuentes más comunes de temperatura para la calibración

⁹Standard Platinum Resistance Thermometers (RTD estándar)

¹⁰Platinum Resistance Thermometers (RTD de platino)

del termopar son los pozos secos y los hornos. Cuando se requiere una precisión aun mayor, se pueden utilizar los baños de calibración. Para las temperaturas más bajas (inferiores a -100°C) se debe usar un dispositivo de comparación de LN_2 (nitrógeno líquido).

4. Presión

Actualmente, la presión es una de las variables físicas que más se cuantifica o se mide en especial en sistemas mecatrónicos, tales como el sector automovilístico, industrial, el hogar, la defensa y aplicaciones biomédicas. El método más común para la detección de la presión es usar un diafragma como una etapa intermedia de la mecánica, la cual se deflecta en respuesta a la presión medida [27].

La deformación de un cuerpo es causada siempre por una influencia externa o un efecto interno y puede ser provocada por fuerzas, presiones, momentos, calor, cambios estructurales de un material o similar. Transductores especiales son diseñados para medir las fuerzas y las otras cantidades derivadas como, por ejemplo, momentos, presiones, aceleraciones, desplazamientos, vibraciones, entre otros. Estos transductores generalmente contienen un diafragma sensible a la presión con galgas de deformación unidas a ella [26]. Como la deflexión en el diafragma sensor es muy pequeña, esta no puede ser directamente medida. Esta deflexión mecánica o el resultado de la deformación en el diafragma es convertido al final en señales eléctricas usando mecanismos de transducción adecuados [27].

Los primeros medidores de deformación fueron dispositivos mecánicos que midieron la tensión midiendo el cambio de longitud y comparándolo con la longitud original del objeto. Por ejemplo, el medidor de extensión (extensiómetro) usa una serie de palancas para amplificar la tensión a un valor legible. Sin embargo, en general los dispositivos mecánicos tienden a proporcionar bajas resoluciones, y son voluminosos y difíciles de usar. Los sensores ópticos son sensibles y precisos, pero son delicados y poco populares en aplicaciones industriales [49].

Una galga extensiométrica (Figura 4-1) es uno de los sensores más importantes en la medición de presión, ya que implementa técnicas de medición eléctricas para medir cantidades mecánicas, el principio de transducción puede ser piezoresistivo, piezocapacitivo, variación de corriente o variación de voltaje debido a la deformación mecánica [61]. Sin embargo, la característica más ampliamente utilizada que varía en proporción a la tensión es la resistencia eléctrica, debido que galgas extensiométricas basadas en capacitancia e inductancia poseen difíciles requisitos de montaje y gran complejidad del circuito, lo cual ha limitado su aplicación.

Un caso concreto (Figura 4-2) es una celda de carga, en donde es usada la galga de película

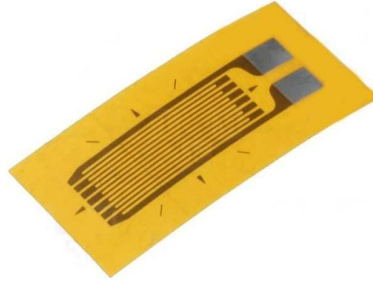


Figura 4-1.: Galga Extensiometrica[60]



Figura 4-2.: Celda de carga [19]

gruesa, la cual es muy utilizada en aplicaciones de medición de presión. La celda de carga consiste en una estructura mecánica realizada en acero inoxidable o aluminio, la cual se encarga de sufrir las deformaciones mecánicas y transferir la máxima deformación a un punto de la estructura, en la cual está localizada la película de resistencia o más conocida como la galga. La deformación mecánica resulta en una variación de resistencia eléctrica, la cual es proporcional a la presión aplicada [38].

4.1. Galga Extensiometrica

Una galga extensiométrica es un elemento de medida cuya resistencia varia con respecto a una fuerza aplicada, es decir convierte fuerza, presión, tensión, peso, entre otros en un cambio de resistencia eléctrica la cual puede ser medida. Cuando una fuerza externa es aplicada a un objeto, se produce una tensión y una deformación, dicha tensión se entiende como las fuerzas internas de resistencia que tiene el objeto y su deformación es definida como el desplazamiento y la deformación que ocurre, tanto de expansión, como de contracción.[48]

La relación entre la fuerza aplicada y la variación de la resistencia se denomina efecto piezorresistivo y se expresa a través del factor de dilatación del conductor o factor de la galga (S_e) [26]:

$$S_e V = \frac{dR}{R} \quad (4-1)$$

Para muchos materiales $S_e = 2$ con la excepción de platino para el que $S_e = 6$. Para pequeñas variaciones de resistencia que no excedan el 2% (que generalmente es el caso), la resistencia del cable metálico se puede aproximar mediante una ecuación lineal:

$$R = R_0(1 + x) \quad (4-2)$$

Donde R_0 es la resistencia sin tensión aplicada y $x = S_e V$. Para materiales semiconductores, la relación depende de la concentración de dopaje. El valor de resistencia disminuye con la compresión y disminuye con la tensión. Algunas características de galgas son mostradas a continuación:

Material	Factor de galga	Resistencia (Ω)	Nota
57% Cu-43% Ni	2.0	100	S_e es constante para un rango amplio de tensiones, por debajo de 260°C
Aleaciones de platino	4 a 6	50	Usados para alta temperatura
Silicio	-100 a +150	200	Alta sensibilidad, ideal para altas medidas de deformación

Las celdas de carga funcionan de una manera predecible y repetible cuando se aplica una fuerza (es decir, una deflexión muy leve). Esta fuerza se traduce en un voltaje de señal por el cambio de resistencia de los medidores de deformación, que se organizan en un circuito eléctrico y, a su vez, se aplican a la estructura de la celda de carga. Un cambio en la resistencia indica el grado de desviación y, a su vez, la carga en la estructura [29].

El circuito eléctrico consta de medidores de deformación, que generalmente están conectados en una configuración de 4 redes (puente de Wheatstone). Esto actúa como una red eléctrica de adición y sustracción. El puente de Wheatstone (Figura 4-3) se presta para permitir la compensación de los efectos de temperatura y la cancelación de señales causadas por cargas extrañas (Figura 4-4). La salida básica es una señal de voltaje de bajo nivel (es decir, mV), pero a través del uso de amplificadores y acondicionadores de señal, esta señal puede convertirse en un voltaje o corriente de nivel superior (es decir, 0 V a 5 V, 0 V a 10 V o 4 mA a 20 mA).

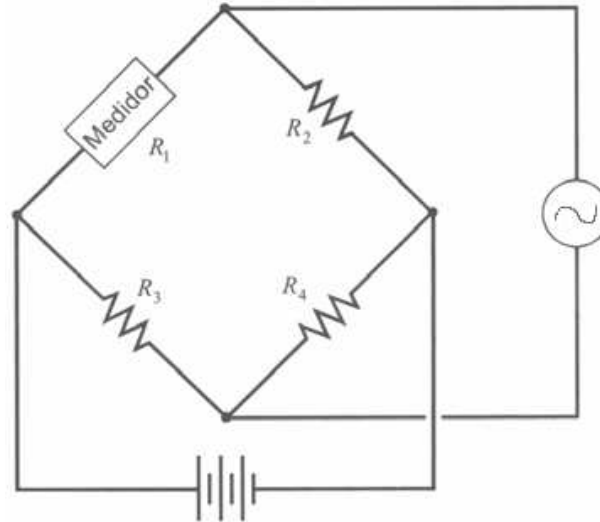


Figura 4-3.: Puente de medida con una galga.[57]

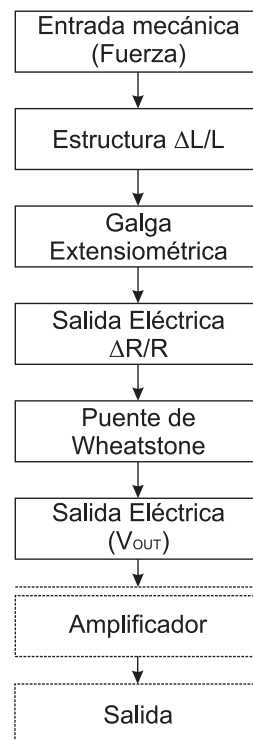


Figura 4-4.: Funcionamiento transductor basado en una galga extensiometrica. [29]

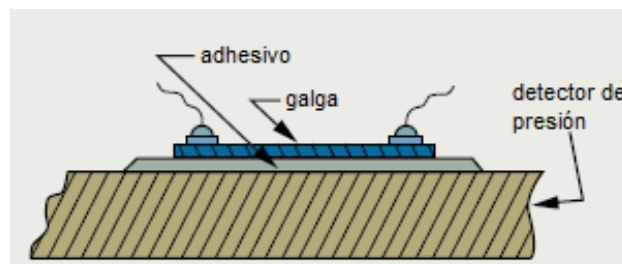


Figura 4-5.: Estructura Galga extensiométrica [49]

La gran mayoría de galgas son fabricadas usando una película de metal depositada sobre un sustrato plástico (papel, resina o poliamida). Este proceso se describe con mayor detalle en el Capítulo 5. Para transferir la máxima deformación de la galga sin afectar su sensibilidad es necesario un adhesivo especial, por lo cual también se pueden fabricar las galgas directamente en el sustrato [38]. Sin embargo, con la evolución de nuevos materiales y nuevas técnicas de fabricación, la impresión de sensores se ha vuelto un poco más popular [61].

La primera galga extensiométrica de tipo de alambre metálico fue desarrollada en 1938. La galga extensométrica tipo lámina metálica consiste en una rejilla de filamento de alambre (una resistencia) de aproximadamente 0.001 pulg. (0.025 mm) de espesor, unida directamente a la superficie a deformar por una capa delgada de resina epoxi (Figura 4-5). Cuando se aplica una carga a la superficie, el cambio resultante en la longitud de la superficie se comunica a la resistencia y la deformación correspondiente se mide en términos de la resistencia eléctrica del cable de la lámina, que varía linealmente con la tensión. El diafragma de lámina y el agente de unión adhesiva deben trabajar juntos para transmitir la deformación, mientras que el adhesivo también debe servir como un aislante eléctrico entre la rejilla metálica y la superficie. [49].

Una galga extensiométrica por diafragma (Figura 4-6) es un dispositivo que usa un diafragma con una presión conocida para medir la presión en un fluido. Tiene diferentes usos, como monitorear la presión de tuberías, como de gas, medir la presión atmosférica o registrar la fuerza del vacío en una bomba de vacío.

El diafragma tiene una membrana flexible con dos lados. En un lado hay una cápsula cerrada que contiene aire u otro fluido a una presión predeterminada, el fluido en contacto con una membrana flexible empuja sobre esa membrana, doblándola. El otro lado puede dejarse abierto al aire o atornillarse en cualquier sistema que el indicador mida. El diafragma es conectado a la galga, de tal manera que se cuantifique la fuerza con la que empuja y esta se traduce en la presión.

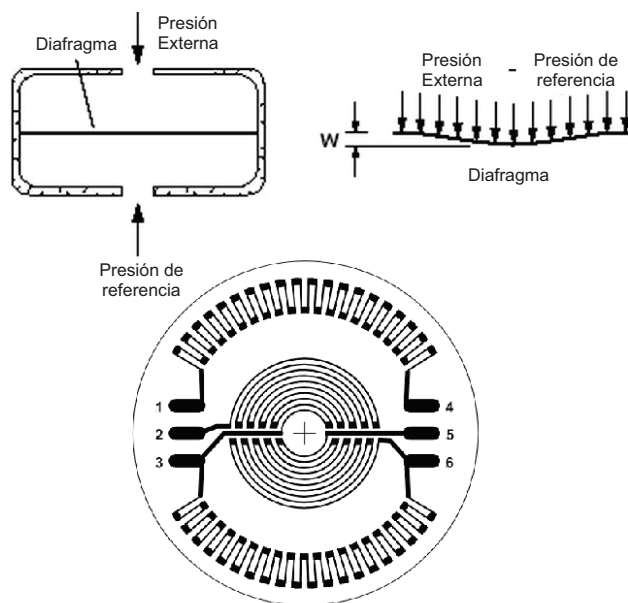


Figura 4-6.: Galga extensiometrica por diafragma[30]

Este principio los pueden utilizar los manómetros al medir la presión. Este medidor utiliza una tira larga de una resistencia eléctrica, la resistencia es conectada al diafragma y a medida que el diafragma se dobla, estira la resistencia, aumentándola. La resistencia tiene una corriente eléctrica que la atraviesa, cuanto más se doble el diafragma y aumente la resistencia, habrá mayor corriente. Al medir la corriente eléctrica, el medidor puede determinar qué tan lejos se ha doblado el diafragma y, por lo tanto, cuánta presión está creando el aire exterior.

Muchos materiales son reportados para la fabricación de películas más flexibles y sus técnicas son igualmente variadas, las cuales incluyen nanopartículas de silicio, nanopartículas de plata, nanotubos de carbón, películas de grafeno, PEDOT:PSS ¹, BEDT-TTF ² y composiciones conductoras basadas en PDMS ³ con diferentes rellenos de materiales como el carbón negro, grafito y nanocompuestos de metal [38], de igual manera son utilizadas aleaciones como: constantan, advance, karma, isoelastic, y también semiconductores como el silicio y el germanio[50]. Las aleaciones más populares utilizadas para galgas de deformación son de cobre y níquel, y de níquel-cromo.

De igual forma a través de la tecnología de impresión muchos sustratos han sido usados para la deposición de las tintas, las cuales incluyen poliisopreno, poliuretano, policarbonato, entre otros.

¹Poli(3,4-etilendioxitiofeno)-poli(estireno sulfonato)

²Bis(ethylenedithia)tetrathiafulvaleno

³Polidimetilsiloxano

De acuerdo con su construcción, se destacan dos tipos de galgas:

- **De hilo conductor o lámina conductora:** estos sensores están constituidos básicamente por una base muy delgada no conductora y muy flexible, sobre la cual va adherido un hilo metálico muy fino con terminales adecuados en sus extremos[57].

Este tipo de construcción posee ventajas importantes con respecto a las demás tipologías de galgas extensométricas y es que son utilizadas en la mayoría de las células de precisión. Están dispuestas en una hoja de metal a partir de un patrón definido, ensamblado en un material aislador, montados por una unión entre una hoja delgada de metal rolado (2 a $5\mu\text{m}$) en una hoja o lamina de respaldo de 10 a $30\mu\text{m}$ de espesor.

El patrón de la malla de medición es procesado por medio de luz. Las técnicas de fabricación son muy similares a las empleadas en la realización de las RTD. Los materiales usados típicamente para el respaldo o de base son poliamidas y resinas epóxicas fenólicas reforzadas con cristal.

Este tipo de sustratos propician un aislamiento eléctrico entre el patrón y el elemento elástico, de tal manera que se facilita su manejo y la unión de las superficies. Las galgas eventualmente son fabricadas con un adhesivo, reduciendo su manejo y así el tiempo consumido [22].

Una atracción del uso de la tecnología de película delgada para medidores de tensión es que se puede utilizar en la producción en masa, con una considerable reducción de costos. La Figura 4-7 muestra (a) una galga pegada y (b) una unida a una pieza de acero [25].

- **Semiconductor:** Los cristales de silicio son el material básico en la construcción de una galga de tipo semiconductor. Estos cristales se cortan en unidades muy finas y así formar medidores muy pequeños. [57].

Uno de los elementos más usuales y disponibles para fabricar estas galgas es el Silicio. Estas son fabricadas a partir de hilos de silicio semiconductor. Como respuesta, la salida de la galga semiconductor es mayor en comparación con la de la galga de hoja o de cable. Si se analiza el factor de la galga, el cual es una medida de la salida con respecto a una deformación dada es de 100 a 150 generalmente para un semiconductor y de 2 a 4 para una galga de hoja o cable.

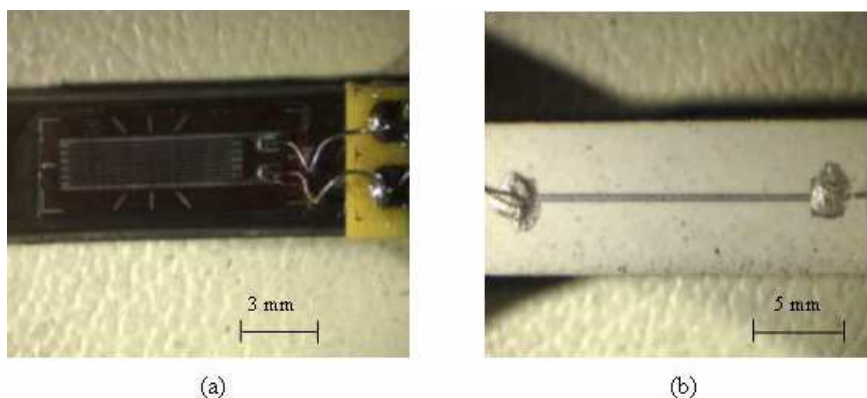


Figura 4-7.: (a) medidor de tensión comercial sobre el respaldo de polímero unido a una pieza de acero usando cemento y (b) medidor de tensión de cromo depositado a través de una máscara de sombra sobre una pieza de acero eléctricamente aislado con Al_2O_3 [25].

Como respuesta de salida las galgas de semiconductor presentan una variación no lineal a partir de la deformación unitaria, sin embargo, no presentan histéresis y pueden tener una larga vida con respecto a la fatiga. Este tipo de galgas son usualmente implementadas en transductores pequeños tales como transductores de fuerza, acelerómetros, y sensores de presión[22].

Las galgas también pueden ser fabricadas por mecanizado usando una máquina de CNC⁴ de 3 ejes. Este dispone de una plataforma movable en el eje X y Y y una columna en la cual una jeringa llena del material a depositar.

A la jeringa se unen los accesorios de soporte, es decir, el adaptador para conectar la unidad de presión de aire y el émbolo para comprimir la pasta. Estos accesorios incluyen un compresor, un regulador, una válvula de solenoide, una extrusora (jeringa) y una boquilla. El esquema de configuración junto con la configuración real se muestra en la Figura 4-8 [61].

Se puede utilizar una boquilla metálica de un diámetro interno definido, utilizando una pasta de carbono conductiva, estos parámetros dependerán de la cantidad de deformación a medir. La presión de la inyección puede ir desde 35 psi⁵ hasta un valor máximo de 90 psi. Después de imprimir, el patrón se cura a una temperatura promedio de 130°C durante 15 min aproximadamente. Un ejemplo puede verse en la Figura 4-9, la cual tiene una dimensión de 6 × 3mm para 3 muestras de bucles y 6 × 4mm para 4 bucles de muestra, con un espacio de 100μm entre bucles.

⁴Control Numérico por Computadora

⁵pounds-force per square inch (Libra fuerza por pulgada cuadrada)

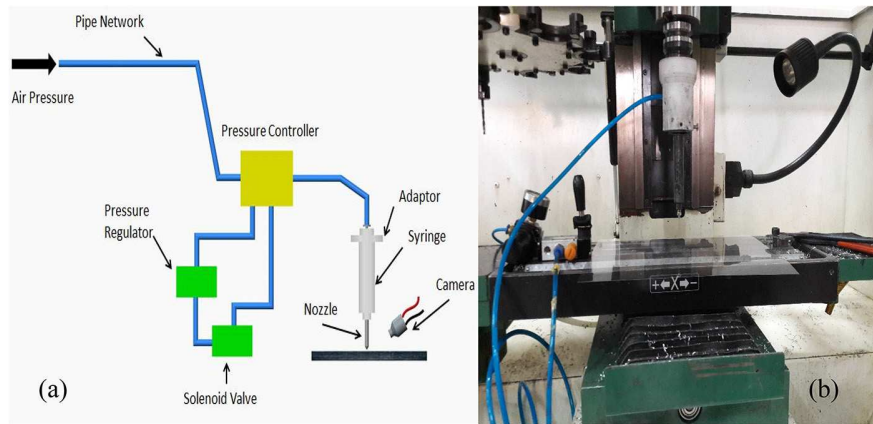


Figura 4-8.: Máquinaria para impresión de una galga [61].

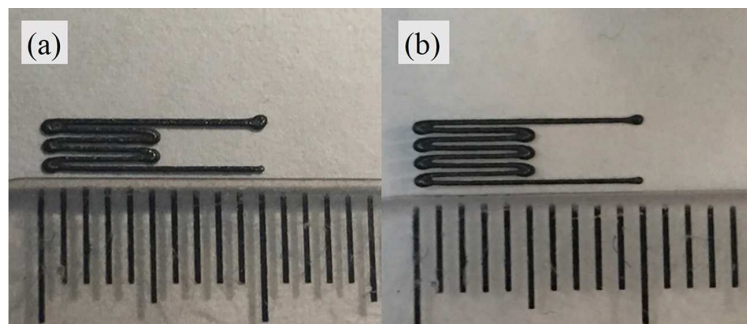


Figura 4-9.: (a)ejemplo de galga de tres bucles,(b)ejemplo de galga de cuatro bucles [61].

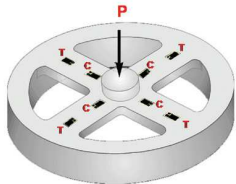
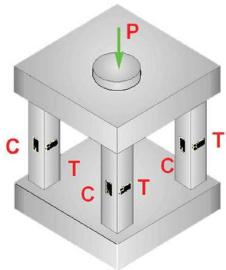
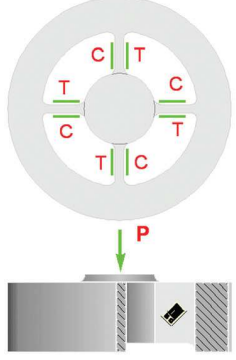
Calibración

Los transductores basados en medidores de esfuerzo deben calibrarse aplicando la carga adecuada al transductor y midiendo la salida resultante. Los transductores de presión de calibración deben calibrarse aplicando presión. Las celdas de carga del medidor de deformación se deben calibrar aplicando cargas de peso muerto o cargas de pistón hidráulico supervisadas por un anillo de prueba o celda de carga de referencia. Los transductores de par extensométrico deben calibrarse aplicando cargas de peso muerto a un brazo de par o utilizando una máquina de calibración de llave dinamométrica.

Cuando los medidores de tensión se conectan al equipo para determinar los niveles de tensión, el método de calibración ideal es cargar el equipo a un nivel de tensión y distribución de esfuerzos conocidos y controlar la salida de los extensómetros instalados. En muchos casos, este método no es factible y el usuario debe confiar en el método de calibración de derivación. La calibración de derivación se lleva a cabo colocando una resistencia de gran valor en paralelo con uno de los brazos del puente de Wheatstone del medidor de esfuerzo para simular una reducción en la resistencia de ese brazo y un desequilibrio resultante del puente. Esta es una simulación de la carga aplicada, y la salida del medidor de deformación resultante se calcula a partir de las características conocidas del medidor y el sistema de medición.

4.1.1. Celda de carga

Existen tres diseños básicos de estructura de celda de carga: barra de flexión múltiple, columna múltiple y cizalladura, que a su vez forman los bloques de construcción básicos para todos los perfiles y/o configuraciones de celda de carga posibles. Los materiales de la estructura de celda de carga (elemento de resorte) son típicamente: acero al carbono, acero inoxidable o aluminio.

	Celda de carga de barra de flexión múltiple
	Celda de carga de columna múltiple
	Celda de carga de cizalladura

La Figura 4-10 ilustra la vista en explosión del diseño de una celda de carga de barra de flexión múltiple. La estructura del sensor se compone de tres partes: Buje de piñones, arandela plana y disco sólido, los cuales están atornillados. Los piñones (o vigas) conectan el cubo interno al anillo rígido. También constituyen las flexiones de sensor en las que se ubican los medidores de tensión [45].

La Figura 4-11 representa esquemáticamente cómo funciona el sensor. La cuña crea un espacio entre el cubo y la superficie plana del disco rígido. Eso permite desviar las vigas de flexión hasta exactamente el grosor de la cuña. El espesor de la cuña se elige para coincidir con la desviación máxima del haz correspondiente a la carga nominal. Por lo tanto, en caso de sobrecarga, la superficie plana del cubo llega al disco; derivando el exceso de la carga al

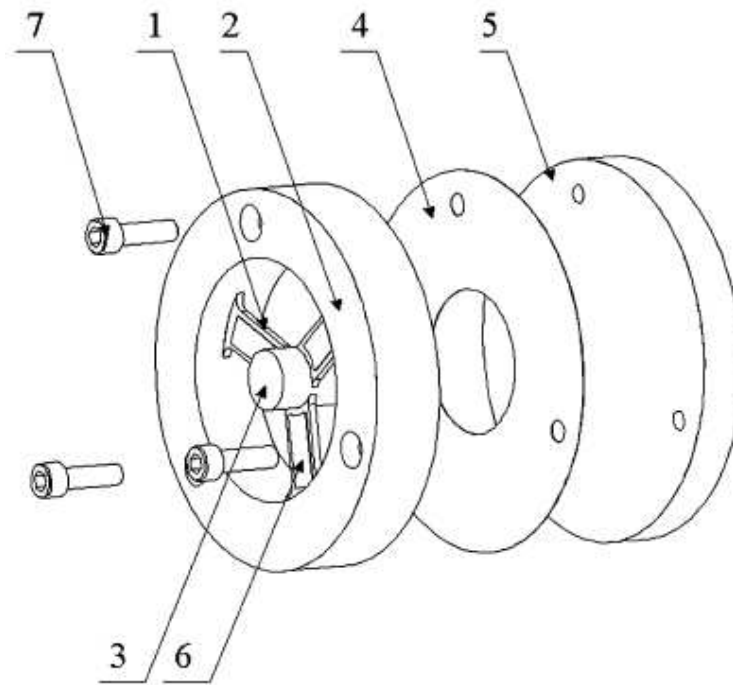


Figura 4-10.: Vista en despiece de una celda de carga 1. barra de flexión, 2. disco rígido, 3. eje, 4. arandela, 5. disco sólido, 6. galga extensiometrica, 7. perno.[45].

disco (Figura 4-11.B). Como normalmente no hay contacto entre el concentrador y el disco, el tope mecánico no afecta la respuesta dinámica del sensor en absoluto. La capacidad de sobrecarga del sensor depende del área de la sección transversal del cubo, que se puede elegir arbitrariamente para que sea lo suficientemente grande. La Figura 4-12 ilustra un prototipo de célula de carga.

El cuerpo del sensor es una estructura monolítica; es decir, está mecanizado a partir de una pieza sólida de metal. Esto disminuye la histéresis y aumenta la fuerza y la repetibilidad del sensor. La arandela con un espesor de $c=0.3$ mm crea el espacio requerido entre el cubo del sensor y la superficie plana del disco. Un par de galgas delgadas se cementan en la ubicación fija de cada viga y se configuran como resistencias en serie completando el cableado del puente dentro del sensor (Figura 4-12.B). El puente de medidores de las galgas es alimentado por un voltaje DC regulado con precisión.

4.1.2. Dimensionamiento

En la Figura 4-13 se pueden apreciar los parámetros a tener en cuenta para la fabricación de una galga: 1. Anchura del soporte, 2. Anchura de la galga, 3. Longitud del soporte, 4. Extremos ensanchados, 5. Longitud activa, 6. Longitud total de la galga, 7. Marcas de alineación [50].

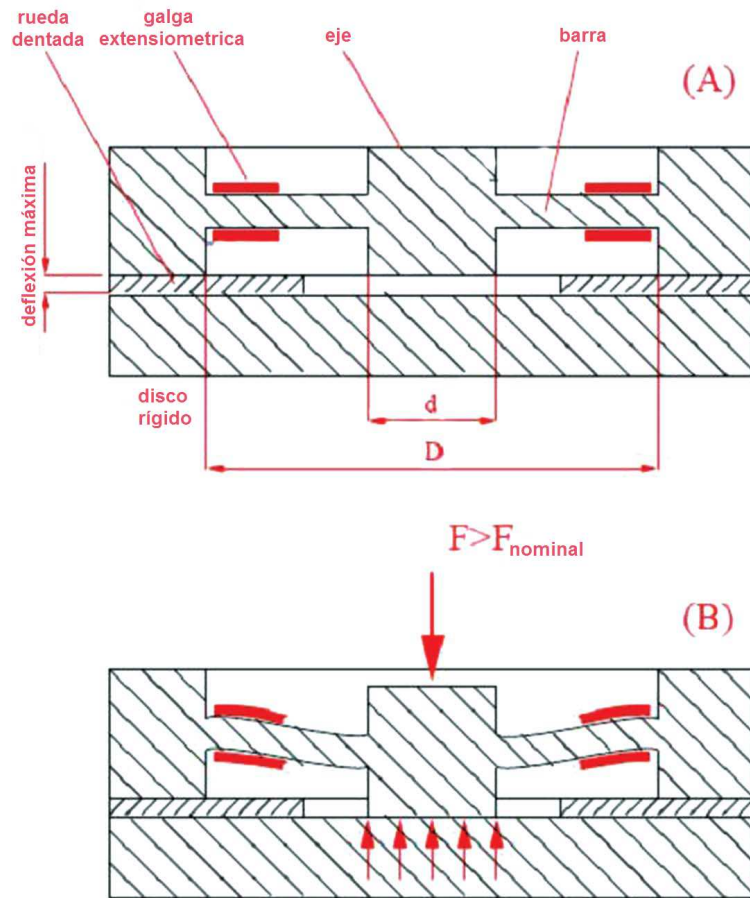


Figura 4-11.: Vista de la sección transversal de la galga: (A) sin deflexión, (B) con deflexión máxima [45].

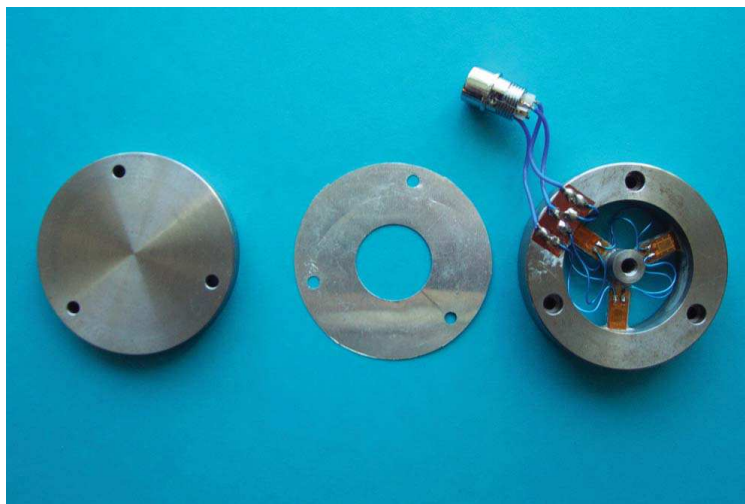


Figura 4-12.: Los componentes del sensor: cuerpo del sensor (A), arandela (B), disco rígido (C). [45].

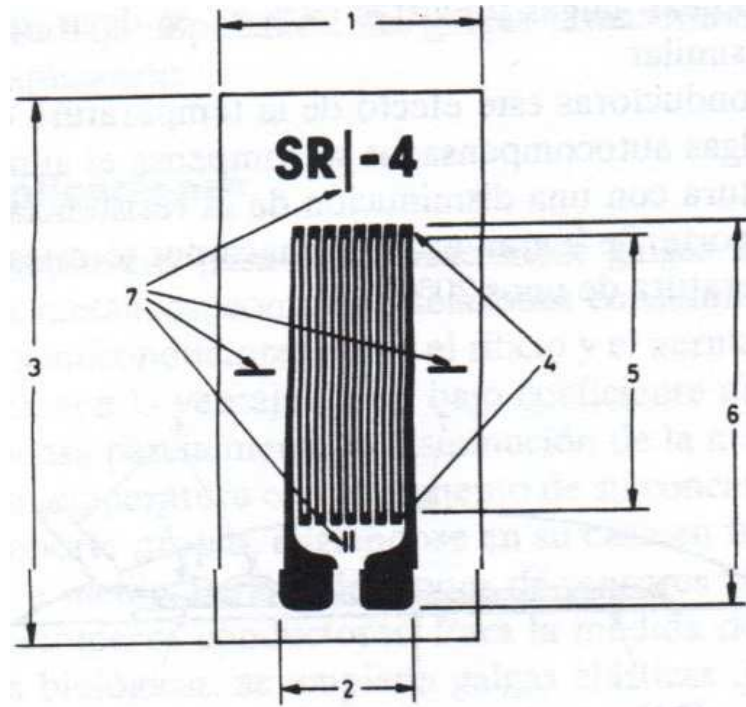


Figura 4-13.: Parametros de una galga impresa [50].

Las galgas pueden tener o no soporte propio, eligiéndose en su caso en función de la temperatura a la que se va a medir. [50]. En la Figura 4-14, se muestran diversos tipos de galgas extensiométricas. Las galgas metálicas con soporte pueden ser de hilo bobinado o plegado con soporte de papel o impresas por fotograbado.

Un método actual muy común para medir la deformación en piezas consiste en preformar un cable de resistencia con un diámetro pequeño, aproximadamente de 0,8 milímetros, en un patrón de rejilla y unir esta rejilla a una superficie de la parte bajo prueba, por alúmina (Al_2O_3). El Alúmina no solo proporciona aislamiento eléctrico entre la superficie de la pieza con conexión eléctrica a tierra, sino que también actúa como el medio “adhesivo” que sostiene el extensímetro en contacto con el sustrato, de tal forma que la deformación desarrollada en la pieza puede relacionarse directamente con el cambio en la resistencia.

Se conocen al menos dos problemas asociados con esta técnica: el calibre del cable (con el fin de tener una magnitud de resistencia suficientemente grande para permitir una precisión de medición deseada) ocupa un área grande sobre la superficie de la pieza y el grosor de la pieza. El alúmina rociada (cuyo grosor puede ser tan grande como 20 mili-pulgadas) es relativamente gruesa, para cambiar la masa, la forma y otras características mecánicas naturales de la pieza bajo prueba y para reducir la precisión de la medición sobre la misma [25].

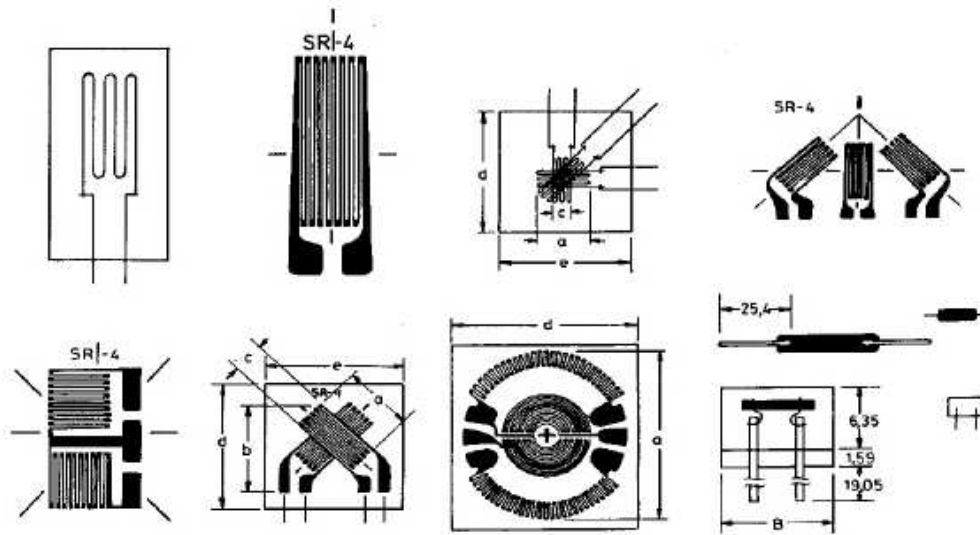


Figura 4-14.: Tipos de soportes para galgas [50].

La deposición directa de los patrones de película delgada se puede lograr usando una abertura construida adecuadamente y comúnmente conocida como máscara. La máscara puede estar hecha de metal, grafito o placa de vidrio con el patrón de corte deseado o grabado en ella. La máscara se coloca muy cerca del sustrato, lo que permite que el vapor del material objetivo se deposite en las áreas expuestas del sustrato. Al depositar al vacío ($< 6 \times 10^{-3}$ mbar) a temperaturas moderadas del sustrato ($< 150^{\circ}\text{C}$), y con la máscara en contacto físico con el sustrato, se pueden formar patrones de medidor de tensión directamente en sustratos de acero aislados. Uno de los principales inconvenientes es que las máscaras mecánicas están restringidas a estructuras muy simples debido a los cambios dimensionales causados por los efectos de calentamiento durante la deposición. Además, los bordes del patrón a veces pueden estar mal definidos ya que parte del material se dispersa debajo de la máscara durante la deposición [70].

La fotolitografía es a menudo la técnica preferida para fabricar medidores de tensión porque se forman patrones de calibre de alta resolución cuando se utiliza una máscara. Sin embargo, la fotolitografía requiere una gran cantidad de mano de obra y consiste en el recubrimiento por rotación, horneado, exposición, desarrollo y enjuague. La ventaja de usar máscara de sombra sobre el enmascaramiento de fotografías radica en el hecho de que el procesamiento posterior a la deposición es mucho menor implicado que en la fotolitografía. [25]

5. Proceso de fabricación de sensores de película fina

Existen una gran cantidad de métodos de fabricación de sensores que pueden ser muy específicos de acuerdo con la aplicación requerida. A continuación se describen algunas técnicas comúnmente utilizadas para la fabricación de los sensores descritos como los más demandados en la industria colombiana.

Como primera medida se describen los procesos de tratamiento de la superficie, en la cual será micromecanizado el elemento primario de medición, técnicas más adelante descritas.

5.1. Tratamiento de la superficie

Dentro de un proceso de fabricación, el tratamiento superficial es el procedimiento mediante el cual se modifican determinadas características en la superficie de un objeto o material. A continuación se describe diferentes métodos de tratamiento de la superficie en el momento de la producción de sensores.

Las películas delgadas se requieren para dar a una superficie de detección algunas propiedades que de otra forma no tiene. A modo de ejemplo, para mejorar la absorción de la radiación térmica por un sensor de infrarrojo lejano, la superficie puede recubrirse con un material que tenga una alta capacidad de absorción de fotones IR, *e.g.* nicrom. Se puede aplicar una película piezoeléctrica a una ondulación de silicona para darle propiedades piezoeléctricas.

Las películas gruesas se utilizan a menudo para fabricar sensores de presión o micrófonos donde se deben producir las membranas flexibles. Se pueden usar varios métodos para depositar capas de películas delgadas y relativamente delgadas (a menudo denominadas “gruesas”) sobre un sustrato o una oblea semiconductora. Entre ellos se encuentran la fundición centrífuga, la deposición al vacío, la pulverización catódica (*sputtering*), la galvanoplastia y la serigrafía [55].

5.1.1. Fundición centrifugada

El proceso de fundición centrifugada implica el uso de un material de película delgada disuelto en un solvente líquido volátil. La solución se deposita en la muestra y la muestra se gira a alta velocidad. Las fuerzas centrífugas dispersan el material y después de que el disolvente se evapora, una capa delgada de película permanece en la muestra. Esta técnica se utiliza a menudo para la deposición de materiales orgánicos, especialmente para la fabricación de sensores de humedad y químicos. El grosor depende de la solubilidad del material depositado y de la película de hilado y típicamente está en el rango de $0,1$ a $50\mu m$. Dado que el proceso se basa en el flujo de la solución, es posible que no produzca una película uniforme o que pueda formar una isla (áreas libres de película) cuando la muestra tiene una superficie no plana. Además, el material puede tener tendencia a la contracción. Sin embargo, en muchos casos, es un método útil y, a menudo, el único aceptable de depósito.

5.1.2. Deposición al vacío

Un metal puede convertirse en forma gaseosa y luego depositarse sobre la superficie de la muestra. El sistema de evaporación consiste en una cámara de vacío (Figura 5-1) donde la bomba evacua el aire a una presión de $13,33 \times 10^{-6}$ a $133,322 \times 10^{-6}$ Pa. Un material depositado se coloca en un crisol cerámico que se calienta con un filamento de tungsteno por encima del punto de fusión del metal. Un método alternativo de calentamiento es el uso de un haz de electrones.

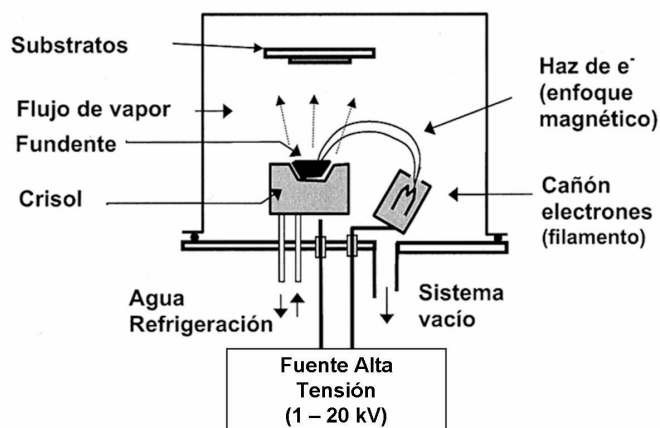


Figura 5-1.: Deposición en una Cámara de vacío [2].

El dispositivo de control permite que el obturador se abra y deja que los átomos de metal emanados del metal fundido se depositen en la muestra. Las partes de la muestra que deben

permanecer libres del material depositado están protegidas por la máscara. El espesor de la película depositada se determina por el tiempo de evaporación y la presión de vapor del metal. Por lo tanto, los materiales con bajo punto de fusión son fáciles de depositar, por ejemplo, el aluminio. En general, las películas depositadas al vacío tienen una gran tensión residual y, por lo tanto, esta técnica se utiliza principalmente para depositar solo capas delgadas.

Dado que el material fundido es virtualmente una fuente puntual de átomos, puede causar una distribución no uniforme de la película depositada y el llamado efecto de sombra donde los bordes del patrón enmascarado aparecen borrosos. Cuando se utiliza la deposición al vacío, se debe prestar atención a la introducción de materiales ajenos en la cámara. Por ejemplo, incluso una cantidad minúscula de fugas de aceite de la bomba dará lugar a la combustión de materiales orgánicos y la codeposición en la muestra de tales compuestos indeseables como los carbohidratos.

5.1.3. Pulverización catódica

Al igual que en el método de deposición al vacío, la pulverización se realiza en una cámara de vacío; sin embargo, después de la evacuación del aire, se introduce un gas inerte, como argón o helio, en la cámara a aproximadamente $266,64 \times 10^{-6}$ a $666,6 \times 10^{-6}$ Torr. Una fuente externa de alimentación de CC o CA de alto voltaje está conectada al cátodo, que se fabrica con el material que debe depositarse sobre la muestra. La muestra se une al ánodo a cierta distancia del cátodo. El plasma de encendido de alto voltaje del gas inerte y los iones de gas bombardean el objetivo. La energía cinética de los iones de bombardeo es suficientemente alta para liberar algunos átomos de la superficie del objetivo. Por lo tanto, los átomos escapados se depositan en la superficie de la muestra.

La técnica de *sputtering* produce una mejor uniformidad, especialmente si se introduce un campo magnético en la cámara que permite dirigir mejor los átomos hacia el ánodo. Dado que este método no requiere una alta temperatura del objetivo, prácticamente cualquier material, incluido el orgánico, puede pulverizarse. Además, los materiales de más de un objetivo pueden depositarse al mismo tiempo (co-sputtering), lo que permite una relación controlada de materiales. Por ejemplo, esto puede ser útil para electrodos de nicromo (Ni y Cr) en la superficie de los sensores piroeléctricos.

5.1.4. Deposición química de vapor

Un proceso de deposición química en fase de vapor (CVD, por siglas en inglés Chemical vapor deposition) es una técnica importante para la producción de dispositivos ópticos, optoelectrónicos y electrónicos. Para las tecnologías de sensores, es útil para formar ventanas ópticas y la fabricación de sensores semiconductores donde las capas cristalinas delgadas y gruesas tienen que depositarse en la superficie. El proceso de CVD tiene lugar en una cámara de deposición.

Los sustratos u obleas se colocan en una mesa estacionaria o giratoria (el soporte del sustrato) cuya temperatura se eleva hasta el nivel requerido por los elementos de calentamiento. La cubierta superior de la cámara tiene una entrada para el gas transportador (H_2), que se puede agregar por varios precursores y dopantes. Estos aditivos, mientras se transportan sobre la superficie calentada del sustrato, forman una capa de película. La mezcla de gas fluye desde el cono de distribución sobre la superficie superior de las obleas y sale a través de las salidas de los gases de escape.

5.1.5. Galvanoplastia

La galvanoplastia es el recubrimiento de un objeto eléctricamente conductor con una capa de metal que usa corriente eléctrica. El resultado es una capa fina y uniforme de metal sobre el objeto.

El proceso utilizado en la galvanoplastia se llama electrodeposición, la parte a recubrir se coloca en un baño o tanque que contiene una solución de una o más sales metálicas. La parte que requiere enchapado se conecta a un circuito eléctrico, formando el cátodo (negativo) del circuito, mientras que un electrodo (generalmente del mismo metal para ser chapado) forma el ánodo, un electrodo positivo. Cuando una corriente eléctrica pasa a través del circuito, los iones metálicos en la solución absorben el exceso de electrones en el objetivo. Este proceso se suele realizar mediante un solo elemento metálico, no una aleación.

Este tipo de deposición directa de un metal sobre un sustrato no es la forma más eficiente de recubrimiento, principalmente por razones de confiabilidad. Por ejemplo, la deposición con un metal que tiene una adhesión inherentemente pobre al sustrato, en este caso, se puede depositar primero una "subcubierta", esta sirve como base para los procesos de enchapado posteriores.

5.2. Microtecnología

La tendencia actual en las tecnologías de sensores sin duda se ha desplazado hacia las tecnologías de microminiaturización o microsistemas, conocidas como MST. Un subconjunto de estos se conoce como MEMS [44]. Un dispositivo MEMS tiene componentes eléctricos y mecánicos, lo que significa que debe haber al menos una parte móvil o deformable y que la electricidad debe ser parte de su funcionamiento. Otro subconjunto se llama MEOMS que significa sistemas microelectro-ópticos. Como su nombre lo indica, al menos un componente óptico es parte del dispositivo. La mayoría de los sensores que se fabrican con el uso de MEMS o MEOMS son dispositivos tridimensionales con dimensiones del orden de micrómetros.

Las dos tecnologías de construcción de la microingeniería son la microelectrónica y el micromecanizado. La microelectrónica, que produce circuitos electrónicos en chips de silicio, es una tecnología muy bien desarrollada. Uno de los objetivos principales de la microingeniería es poder integrar los circuitos microelectrónicos en estructuras micromecanizadas para producir sistemas completamente integrados (microsistemas). Tales sistemas típicamente tienen las mismas ventajas de bajo costo, confiabilidad y tamaño pequeño que los chips de silicio producidos en la industria microelectrónica.

En la actualidad, hay tres técnicas de micromecanización que están en uso o están ampliamente desarrolladas por la industria [3]. El micromecanizado de silicio recibe la mayor importancia, ya que esta es una de las técnicas de micromecanización mejor desarrolladas. El silicio es el material de sustrato primario utilizado en la producción de circuitos microelectrónicos, y por lo tanto es el candidato más adecuado para la producción eventual de microsistemas.

El *excimer laser* es un láser ultravioleta, que se puede usar para micromecanizar varios materiales sin calentarlos, a diferencia de muchos otros láseres que eliminan el material al quemarlo o vaporizarlo. El láser excimer se utiliza principalmente para el mecanizado de materiales orgánicos (como polímeros).

Y LIGA, que su acrónimo proviene del nombre alemán para el proceso (Lithographie, Galvanoformung, Abformung). LIGA utiliza procesos de litografía, galvanoplastia y moldeo para producir microestructuras.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente dentro de los procesos para el tratamiento de superficie, el de fundición centrifugada y al de deposición al vacío no hay confiabilidad en la uniformidad de la película depositada, por lo cual son descartados para la fabricación de sensores con buenas características de confiabilidad e incertidumbre, además de optimizar los

materiales utilizando disminuyendo los desperdicios, en cuanto al de Pulverización catódica ó Sputtering produce una mejor uniformidad por su técnica de deposición además de permitir depositar una gran cantidad de materiales, incluso aleación, característica que no se puede alcanzar con el método de galvanoplastia, por lo cual se descarta para procesos como la fabricación de termopares que son construidos a base de aleaciones. Es por esto que se decide proponer una estrategia de fabricación utilizando el método de pulverización catódica, ya que ofrece ventajas desde el punto de vista técnico. A continuación se profundiza en los aspectos técnicos de este.

El proceso de **Pulverización catódica o Sputtering** es el proceso de fabricación de deposición de película delgada en el núcleo de los semiconductores, unidades de disco, CD y dispositivos ópticos de la actualidad. A nivel atómico, el sputtering es el proceso por el cual los átomos son expulsados de un objetivo o material fuente que se depositará en un sustrato, como una oblea de silicio, un panel solar o un dispositivo óptico, como resultado del bombardeo del objetivo por partículas de alta energía.[6]

El verbo “*To Sputter*” proviene de la palabra latina *Sputare* que significa “emitir saliva con ruido”, en 1970 Peter J. Clarke desarrolló la primera “pistola *Sputter*” que permitió a la industria de semiconductores realizar la deposición precisa y confiable de materiales a nivel atómico utilizando una corriente de electrones e iones cargados de plasma en un entorno de vacío.

El proceso de pulverización comienza cuando un sustrato a recubrir se coloca en una cámara de vacío que contiene un gas inerte, generalmente Argón, y se aplica una carga negativa a un material fuente objetivo que se depositará sobre el sustrato, haciendo que el plasma brille.

Los electrones libres fluyen desde el material fuente objetivo cargado negativamente en el entorno de plasma, colisionando con la capa exterior electrónica de los átomos de gas Argón que alejan estos electrones debido a su carga similar. Los átomos de gas inerte se convierten en iones cargados positivamente atraídos por el material objetivo cargado negativamente a una velocidad muy alta que “dispara fuera de servicio” las partículas de tamaño atómico del material objetivo, debido al impulso de las colisiones. Estas partículas cruzan la cámara de deposición al vacío del dispositivo de recubrimiento por pulverización catódica y se depositan como una película delgada de material sobre la superficie del sustrato a recubrir.

La pulverización solo tiene lugar cuando la energía cinética de las partículas que bombardean es extremadamente alta, mucho más alta que las energías térmicas normales en el ambiente de plasma del “cuarto estado de la naturaleza”. Esto puede permitir una deposición de película delgada mucho más pura y precisa en el nivel atómico que la que se puede lograr fundiendo un material fuente con energías térmicas convencionales.

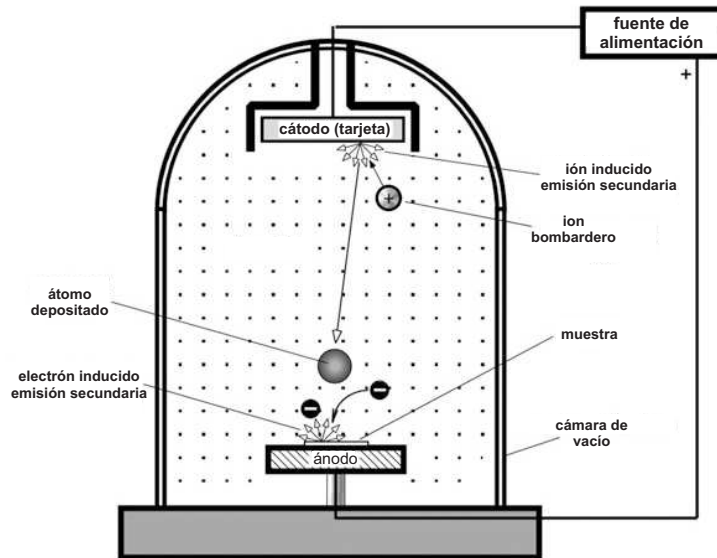


Figura 5-2.: Proceso de pulverización catódica [26].

La cantidad de átomos expulsados o “dispersados” desde el objetivo o el material fuente se denomina producción de sputter. El rendimiento del sputter varía y puede controlarse mediante la energía y el incidente del ángulo de los iones bombarderos, las masas relativas de los iones y los átomos objetivo, y la energía de unión superficial de los átomos objetivo. Diferentes métodos de deposición física de vapor son ampliamente utilizados en revestidores por pulverización catódica, incluyendo el haz de iones y la pulverización asistida por iones, la pulverización reactiva en un entorno de gas de oxígeno, el flujo de gas y la pulverización por magnetrón.

La pulverización se realiza en una cámara de vacío (Figura 5-2); después de la evacuación del aire en dicha cámara, se introduce el gas inerte, a una presión determinada. Un suministro externo de alta tensión DC ó AC se conecta al cátodo (objetivo), el cual está fabricado del material que debe depositarse en la muestra (*e.g.* Pt para un RTD). La muestra está unida al ánodo a cierta distancia del cátodo. El alto voltaje enciende el plasma en el argón y los iones del gas bombardean el objetivo. La energía cinética de los iones bombarderos es suficientemente alta para liberar algunos átomos de la superficie objetivo. Por lo tanto, los átomos escapados se depositan en la superficie de la muestra.

Luego, el sustrato se limpia con tetracloroetileno, acetona, metanol, etanol y agua desionizada, y se lleva a una temperatura aproximada de 90°C durante 30 minutos, en un horno de secado. Para la deposición se tiene en cuenta un objetivo (*e.g.* 99,999 % de Pt con 4 pulgadas de diámetro, para RTD Pt100). La presión de trabajo está en el orden de 0.666 Pa con una potencia de DC de 420 V a 0.24 A, y la cámara es purgada por argón (Ar) durante 30 días

antes de la pulverización. El espesor de la película es controlado por el tiempo de deposición [71].

Posterior al tratamiento de la superficie, se quiere modelar el material de acuerdo con los requerimientos. Existen varias técnicas que se pueden usar para modelar películas delgadas que se han depositado en una oblea de silicio, para dar forma a la oblea en sí y para formar un conjunto de microestructuras básicas (micromecanizado de silicio a granel). Las técnicas para depositar y modelar películas delgadas se pueden utilizar para producir microestructuras bastante complejas en la superficie de la oblea de silicio (micromecanizado de silicio de superficie). Se están investigando técnicas de grabado electroquímico para ampliar el conjunto de técnicas básicas de micromecanizado de silicio. Sin embargo, el proceso de fotolitografía es escogido como el más versátil para la estrategia de producción propuesta por sus ventajas al poder micromecanizar una gran cantidad de materiales y su baja complejidad técnica a la hora de la instalación de la planta de producción.

La fotolitografía es la técnica básica utilizada para definir la forma de las estructuras micromecanizadas. A continuación, se describe esta técnica, la cual es esencialmente la misma utilizada en la industria de la microelectrónica.

La palabra litografía proviene del griego lithos, que significa piedras, y graphia, que significa escribir. Significa literalmente escribir en piedras. En el caso de la litografía de semiconductores (también llamada fotolitografía), las piedras son obleas de silicio y nuestros patrones están escritos con un polímero sensible a la luz llamado fotoprotector.[5]

Analizando la gran cantidad de pasos de litografía necesarios para la fabricación de circuitos integrados, la litografía generalmente representa aproximadamente el 30 % del costo de fabricación.

En cuanto a la litografía óptica es básicamente un proceso fotográfico mediante el cual un polímero sensible a la luz, llamada película fotoresistente, se expone y desarrolla para formar imágenes en relieve tridimensionales sobre el sustrato. En general, la imagen de la película fotoresistente ideal tiene la forma exacta del diseño o patrón previsto en el plano del sustrato, con paredes verticales a través del grosor de la resistencia. Por lo tanto, el patrón de resistencia final es binario: partes del sustrato están cubiertas con resistencia mientras que otras partes están completamente descubiertas. Este patrón binario es necesario para la transferencia de patrones, ya que las partes del sustrato cubiertas con resistencias estarán protegidas contra el ataque químico, la implantación de iones o cualquier otro mecanismo de transferencia de patrones(Figura 5-3).

La secuencia general de los pasos de procesamiento para un proceso de fotolitografía típico es

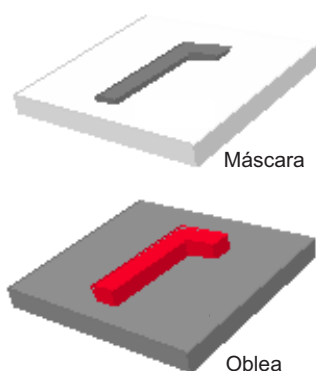


Figura 5-3.: Tranferencia del patrón [5].

la siguiente: preparación del sustrato, recubrimiento por centrifugación de la película fotore-sistente, precocción, exposición, horneado posterior a la exposición, desarrollo y postcocción. Una tira de resistencia es la operación final en el proceso litográfico, después que el patrón de resistencia se haya transferido a la capa subyacente.

En la Figura 5-4.A se muestra una película delgada de algún material (*e.g.* platino) sobre un sustrato de algún otro material (*e.g.* silicio). El objetivo del proceso es eliminar selectivamente algo de dicha película para que solo permanezca en áreas particulares de la oblea (Figura 5-4.F). El proceso se convierte en la producción de una máscara, esto típicamente será un patrón en zig-zag de platino [9].

La película se recubre con un polímero que es sensible a la luz ultravioleta (Figura 5-4.B), llamado fotoprotector o película fotore-sistente (*e.g.* AZ1518). La capa de película fotore-sistente se reviste sobre la película del material depositado (*e.g.* Pt), puede ser a través de una centrifugadora. La película de fotore-sistente revestida se hornea suavemente a una temperatura en el orden de 90°C durante aproximadamente 30 minutos. La exposición a la luz ultravioleta se puede realizar mediante un sistema de lámpara de arco (*e.g.* Stabi-Light Aitech). El tiempo de exposición a la luz UV y la concentración del desarrollador se ajustan dependiendo del patrón de zig-zag requerido (longitud-anchura). Luego que la luz ultravioleta ilumina a través de la máscara sobre la capa fotore-sistente (Figura 5-4.C) es desarrollada esta capa cuando se transfiere el patrón[67].

Hay dos tipos de película fotore-sistente, denominados positivos (lado izquierdo de la Figura 5-4) y negativos (lado derecho de la Figura 5-4). Cuando la luz ultravioleta incide en la resistencia positiva, debilita el polímero, de modo que cuando la imagen se desarrolla, la resistencia se elimina por lavado donde la luz golpeó, transfiriendo una imagen positiva de la máscara a la capa de resistencia. Lo opuesto ocurre con la resistencia negativa. Cuando la luz ultravioleta golpea la resistencia negativa, fortalece el polímero, por lo que cuando se

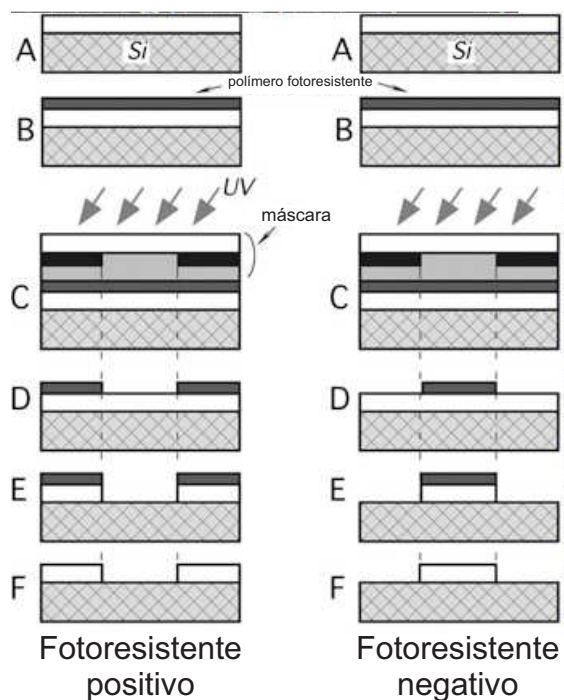


Figura 5-4.: Proceso de fotolitografía[26].

desarrolla, la resistencia que no estuvo expuesta a la luz ultravioleta se elimina: una imagen negativa de la máscara se transfiere a la resistencia [37].

Para el grabado, se usa un revelador (*e.g.* AZ351) el cual permite eliminar el óxido que está expuesto a través de las aberturas en la resistencia (Figura 5-4.E), para tal fin se prepara una solución mezclando HCL y HNO₃. Esto se realiza posterior al revelado y una fuerte cocción, dada en el orden de 700°C y la película no protegida se graba químicamente (Figura 5-4.F). Se elimina el fotoprotector restante en acetona y finalmente se obtiene el patrón deseado, (*e.g.* Un zig-zag de Pt para el caso de un RTD), como el mostrado en la Figura 5-5 [71]:

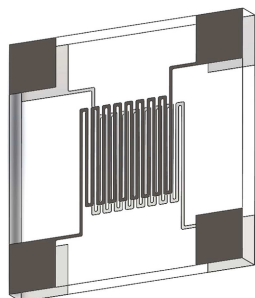


Figura 5-5.: Figura de zig zag en un RTD[71].

En el diagrama de flujo de la Figura 5-6 se proponen la secuencia de las etapas más importantes a tener en cuenta para la fabricación de un sensor de película fina.

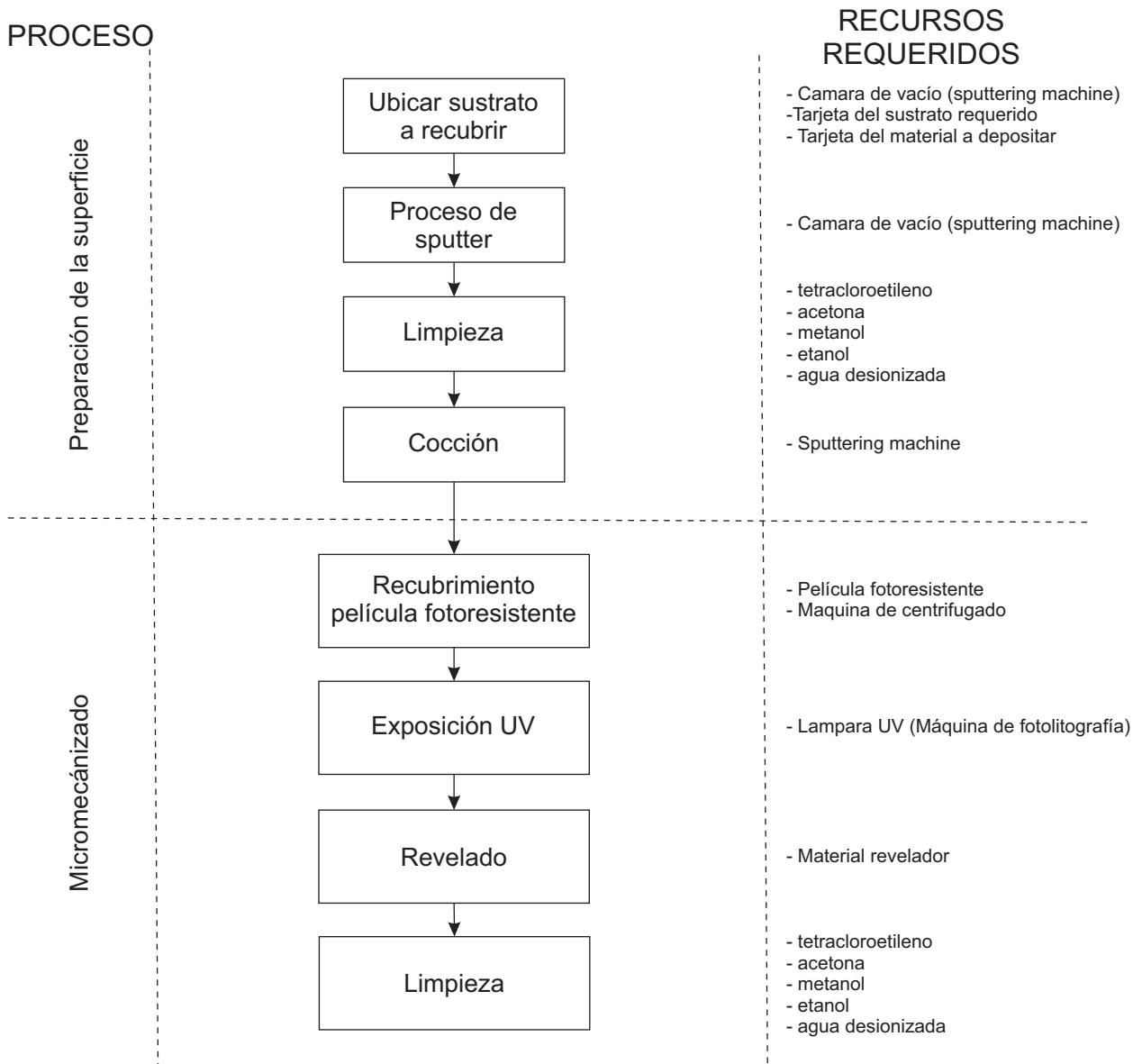


Figura 5-6.: Diagrama de flujo del proceso de fabricación de un sensor de película fina[36].

5.3. Materias primas

Sustrato

Silicio: El diámetro de las obleas de silicio se especifica en pulgadas o mm. Aunque una pulgada es de 25.4 mm, los diámetros de las obleas en pulgadas suelen ser múltiplos de 25.0 mm (por ejemplo, 4 pulgadas = 100 mm). La tolerancia del diámetro es típicamente +/- 0.5

mm.

Por lo general, ambos lados de las obleas de silicio se recubren y graban al menos. El pulido de superficie se realiza en uno (SSP = pulido de un solo lado) o en ambos lados (DSP = pulido de doble cara). La rugosidad de los lados pulidos es de aproximadamente 1 nm (0,5 nm es técnicamente posible), del lado sin pulir en el rango de varios μm .

El calibre habitual de las obleas de silicio depende de su diámetro debido a razones de estabilidad mecánica durante la producción y posterior procesamiento, y es de aproximadamente 280 μm (para obleas con 2 pulgadas de diámetro), 380 μm (3 pulgadas), 525 μm (4 pulgadas), 675 μm (6 pulgadas) y 725 μm (8 pulgadas). Dentro del contexto de los métodos de producción convencionales, el grosor de la oblea se limita hacia arriba a aproximadamente de 2 mm, ya que las máquinas pulidoras no pueden acomodar obleas más gruesas. Una limitación del espesor de la oblea hacia abajo a aproximadamente de 200 μm dado por muchos fabricantes, se debe al riesgo de fractura durante el esmerilado y el pulido [58]

Alumina (óxido de aluminio): El aluminio es uno de los metales más abundantes que se encuentran en la Tierra, y el reciente avance en la eficiencia de la extracción de aluminio a partir del mineral ha hecho que sea relativamente barato de conseguir. Tiene alrededor de un tercio de la densidad y la rigidez del acero, además de ser dúctil.[39]

Película Fotoresistente

Existe dos tipos de fotoresistente, el positivo y negativo. Para resistentes positivos, estos quedan expuestas a la luz ultravioleta donde quiera que se elimine el material subyacente. En estos resistentes, la exposición a la luz ultravioleta cambia la estructura química del fotoresistente para que se vuelva más soluble en el revelador. El material expuesto es arrastrado por la solución reveladora, dejando las ventanas del material subyacente desnudas. En otras palabras, contiene una copia exacta del patrón que debe permanecer en la oblea.

Esta serie de películas fotoresistentes positivas en realidad consiste en tres productos diferentes. Todos ellos contienen el mismo compuesto fotoactivo (PAC) que responde a todo el espectro de UV de 310 a 440 nm que cubre las tres líneas principales de mercurio, i, h y g. Se pueden usar con banda ancha y exposición monocromática [40].

Los fotoresistentes negativos se comportan de la manera opuesta. La exposición a la luz ultravioleta hace que el resistente negativo se polimerice y sea más difícil de disolver. Por lo tanto, el fotoresistente negativo permanece en la superficie donde sea que esté expuesta, y la solución de revelado elimina solo las partes no expuestas. Por lo tanto, las máscaras usadas

para fotosensibles negativos contienen el inverso (“negativo” fotográfico) del patrón que se transferirá.

Los fotoresistentes negativos fueron populares en la historia temprana del procesamiento de circuitos integrados, pero el fotoresistente positivo fue cada vez más ampliamente utilizado, ya que ofrece mejor controlabilidad del proceso para las características de geometría pequeña. Actualmente, los resistentes positivos son el tipo de resistencia dominante utilizado en los procesos de fabricación de VLSI (Very Large Scale Integration, Integración a escala muy grande.).

e.g. algunos referencias de resistentes fabricados por Microchemicals [41] se mencionan a continuación:

- AZ 1500 (sin sufijo) es la familia más popular. Este resistente se puede usar para grabado en seco y húmedo, cubre todas las demandas de fabricación general de semiconductores y otras aplicaciones con resolución de hasta 1 μm .
- AZ 1514 H está diseñado para la impresión por contacto y proximidad. Se aplica a una baja velocidad de fotolitografía para un mejor control de la exposición (aproximadamente 10s a 15 mW / cm_2).
- AZ 1500 HS se desarrolló al grabar en húmedo. Para este grabado la adhesión es el problema más importante. Especialmente en aluminio, por lo tanto posee una fracción de resina novolak de bajo peso molecular que da como resultado una adhesión significativamente mejorada y también una velocidad de foto muy alta (por lo tanto, el sufijo de alta velocidad).

5.3.1. RTD

Algunos materiales adicionales importantes para la fabricación de RTD Pt 100, se mencionan a continuación:

Platino

En el mercado existen una gran cantidad de tarjetas para deposición, basadas en compuestos, como: óxidos, nitruros, boruros, sulfuros, seleniuros, telururos, carburos, mezclas cristalinas y compuestas [54].

En el caso de fabricación de RTD Pt 100, el material a depositar es el Platino, se ofrecen en varios niveles de pureza para satisfacer los requisitos específicos, con la pureza mínima de 99,9 % hasta 99,99 % y purezas ultraelevadas de 99,995 % y 99,9995 %.

De acuerdo con el conocimiento disponible del platino, se ha determinado que no es peligroso y no representa riesgo para las personas o el medio ambiente en su forma provista. Sin embargo, cualquier corte, soldadura, fusión, molienda o uso para la deposición producirán polvo, humo o partículas que contengan elementos componentes de este material. La exposición a estos componentes puede presentar riesgos significativos para la salud. Las partículas finas pueden ser un polvo combustible que, cuando se dispersa en el aire, puede presentar un riesgo de explosión [14].

Dependiendo de la naturaleza de la película delgada que se crea, las tarjetas de pulverización pueden tener un tamaño y una forma muy grandes. Las tarjetas más pequeños pueden tener menos de una pulgada (2,5 cm) de diámetro, mientras que las tarjetas rectangulares más grandes alcanzan más de una yarda (0,9 m) de longitud.

La forma de una tarjeta de bombardeo iónico suele ser rectangular o circular, pero muchos proveedores pueden crear formas especiales adicionales a petición. Ciertos sistemas de pulverización catódica requieren un objetivo giratorio para proporcionar una película más fina y precisa. Estos objetivos tienen la forma de cilindros largos y ofrecen beneficios adicionales que incluyen velocidades de deposición más rápidas, menos daño por calor y un área de superficie aumentada, lo que conduce a una mayor utilidad general [69].

Capa de Vidrio aislante

Este es un material epóxico de vidrio termolaminado, compuesto de tela de fibra de vidrio tejida y un aglutinante de resina epóxica que es resistente a la llama. Presenta buena relación resistencia/peso, se utiliza con mayor frecuencia en aplicaciones eléctricas donde se necesitan altas temperaturas, estabilidad mecánica y condiciones eléctricamente aislantes.

5.3.2. Termopar

A continuación se describen algunos materiales necesarios para la fabricación de un termopar tipo K, uno de los referidos como más utilizado.

Aleaciones cobre-níquel

Las dos principales aleaciones son 90/10 (90 % cobre, 10 % níquel) y 70/30 (70 % cobre, 30 % níquel). El 70/30 es el más fuerte y tiene una mayor resistencia al flujo, como el de agua de mar, pero el 90/10 proporciona un buen servicio para la mayoría de las aplicaciones y, siendo menos costoso, tiende a ser más ampliamente utilizado. Ambas aleaciones contienen

pequeñas pero importantes adiciones de hierro y manganeso que se han elegido para proporcionar la mejor combinación de resistencia y a la corrosión general [16].

Las aleaciones de níquel-cobre son más fuertes que el cobre pero de menor resistencia que los aceros. Su ductilidad, tenacidad y formabilidad son excelentes. No son frágiles a bajas temperaturas y conservan su resistencia mecánica y ductilidad hasta temperaturas criogénicas.

Cromel Es una aleación compuesta de aproximadamente 90 % de níquel y 10 % de cromo que se usa para fabricar los conductores positivos de los termopares ANSI Tipo E (cromel-constantan) y K (cromel-alumel). Se puede utilizar a temperaturas de hasta 1100°C en atmósferas oxidantes. Chromel es una marca registrada de Concept Alloys, Inc. [15] Algunas propiedades y características se listan en la Tabla 5-1.

Características	
Coefficiente de temperatura	0.00032 K^{-1}
Resistividad	0,706 $\mu\Omega m$
Propiedades mecánicas	
Elongación en rotura	menor de 44 %
Ensayo de Izod	108 J m^{-1}
Módulo elástico	186 GPa
Tensión de rotura	620–780 MPa
Propiedades físicas	
Densidad	8.5 g cm^{-3}
Punto de fusión	1420/1100°C
Propiedades térmicas	
Coefficiente de dilatación	12.8 $\times 10^{-6}$ K^{-1} at 20 – 1000°C
Temperatura máxima de uso	1100°C
Conductividad térmica	19 W $m^{-1} K^{-1}$ at 23°C

Tabla 5-1.: Características y propiedades cromel

Alumel TM Esta aleación magnética consiste aproximadamente en: níquel (94 %), manganeso (3 %), aluminio (2 %) y silicio (1 %), lo que conduce a una buena resistividad eléctrica y conductividad térmica. Además de los termopares, alumel se usa para el cable de extensión

del termopar. En los termopares, la aleación se usa con cromo para fabricar termopares tipo K.

Dentro de sus características más importantes, se tiene que el Alumel tiene buena maquinabilidad, fácilmente moldeable, puede ser soldado usando métodos convencionales, es formado a 1149°C ó 2100°F y su temperatura de trabajo está entre 705 y 1038°C.

Aluminio - Níquel Es una de las aleaciones metálicas más vendidas [8]. El níquel de aluminio está disponible en forma de barra, lingote, cinta, alambre, inyección, lámina y papel de aluminio. Las formas de pureza ultra alta y alta pureza también incluyen polvo metálico, polvo submicrométrico y nanoescala, objetos para deposición de película delgada y gránulos para evaporación. Las aplicaciones principales incluyen montaje de rodamientos, lastre, fundición, soldadura por pasos y protección contra la radiación.

Cable aislado con fibra de vidrio

Son cables con un aislamiento especial que consiste en un acabado de fibra de vidrio que permite ser resistente a la humedad y con la adición de un pigmento que facilita la unión e identificación del circuito.

Posee aislamiento trenzado de alta temperatura, que tiene un muy comportamiento hasta 700°C. Este cable de termopar se utiliza en la fabricación de los termopares para una amplia gama de aplicaciones, o para el respectivo cable de extensión. Comercialmente se consigue en rollos de 10 metros.

Óxido de magnesio

El óxido de magnesio de alta pureza compactado se utiliza para producir cables y sondas de temperatura con límites especiales de error en los resultados de calibración.

Se recomienda este tipo de aislamiento cuando el termopar está sumergido en líquidos, alta humedad, gases corrosivos o altas presiones. El termopar puede formarse para alcanzar áreas que de otro modo serían inaccesibles. El óxido de magnesio tiene una alta resistencia dieléctrica, responde rápidamente a los cambios de temperatura y es muy duradero. El cable de termopar con aislamiento de MgO se fabrica con alambre de primera calidad revestido en óxido de magnesio puro y se procesa en una cubierta de metal exterior químicamente limpia. Los cables se seleccionan individualmente y se combinan, y tienen una sección transversal uniforme con superficies lisas [64].



Figura 5-7.: Recubrimiento imprimible flexible [51].

5.3.3. Galga

Para la fabricación se una galga se suele depositar silicio en un sustrato flexible, puede ser de resina o algún polímero flexible, a continuación se dan algunas características:

Sustratos flexibles

La poliamida es el material preferido para aplicaciones que requieren un alto grado de estabilidad dimensional después de la exposición a temperaturas extremas (hasta 300°C). Además, la poliamida ofrece una alta resistencia a los productos químicos, es liviana y flexible, por lo que es un sustrato ideal para la construcción de galgas.

Los sustratos flexibles (Figura 5-7) incluyen recubrimientos transparentes y blancos imprimibles que producen imágenes de alta resolución. Los revestimientos de polímero patentados han sido evaluados por proveedores líderes de tinta conductiva ya que proporcionan una mayor receptividad de la tinta, una adhesión superior a la tinta y una impresión de alta resolución.

Las películas de poliamida y poliéster incluyen capas superiores disipadoras de estática duraderas, no metálicas, que proporcionan resistencias superficiales de $> 10^5$ y $< 10^9 \Omega$.

Dentro de sus características se destaca: su estabilidad térmica, resistencia a químicos y solventes, alta impresión de contraste, y tiene opciones opacas y transparentes.

5.4. Maquinaria

Para el proceso de *Sputtering* se detallan a continuación algunas características de los equipos más destacados, según su proveedor.

Modular Deposition Systems (HEX series) – Proveedor: Korvus Technology [63].

La cámara de vacío consiste en un marco con seis caras laterales y una cara superior e inferior, mecanizada a partir de una sola pieza de aluminio, que hace que el sistema sea ligero y sin soldaduras, a la vez proporciona una estructura rígida.



Figura 5-8.: HEX Deposition System[63].

Este sistema es reconfigurable, es posible adaptarlo a las necesidades experimentales actuales o futuras. El sistema puede adquirirse en el nivel más básico y luego actualizarse a una sofisticada herramienta de deposición y análisis según lo permitan los recursos. Todas las actualizaciones están diseñadas para que se implementen de forma sencilla, reduciendo los gastos innecesarios de instalación.

Teniendo en cuenta su construcción modular permite que varios elementos clave sean expuestos, discutidos e interactuados, permitiendo que los laboratorios exploren completamente los elementos mecánicos, materiales y de crecimiento de la investigación de películas delgadas y nanomateriales.

Esta diseñado para objetivos de 2" de diámetro, las fuentes de pulverización catódica están equipadas con imanes SmCo¹ y aceptan objetivos con un grosor que varía de 0,5 a 6 mm de materiales no magnéticos y hasta 1 mm para materiales magnéticos. El uso típico de objetivos es de alrededor del 43 % para materiales no magnéticos . Las fuentes se pueden usar con fuentes de alimentación DC, RF, pulsos DC o HIPIMS (High-power impulse magnetron sputtering) y opera entre 50 y 600° C para permitir que los materiales orgánicos sensibles se evaporen con un control preciso.

La velocidad y el espesor de deposición de película pueden determinarse con el uso de un monitor de cristal cuarzo (QCM) que utiliza el cambio en la frecuencia de oscilación resonante de un cristal de cuarzo fino para determinar la masa y, por lo tanto, el espesor de una película de material depositado en la superficie.

Algunas de las aplicaciones típicas de este sistema son elevación, preparación de muestras EM (Electron Microscope), metalización por contacto, investigación y desarrollo de nuevos recubrimientos y deposición por pulverización catódica; sin embargo, el diseño modular del sistema permite reconfigurarlo rápidamente y usarlo para más aplicaciones.

Sus conexiones de agua y gas son conexiones rápidas de Hamlet y tanto la etapa de muestreo como los componentes se unen utilizando tuercas de mariposa.

Este sistema está dotado con una bomba turbo de 80l/s y un soporte de diafragma que permite una presión de base máxima de 8×10^{-7} mbar y se puede intercambiar a una bomba de 300l/s logrando una base de vacío de 4×10^{-7} mbar. Dicho sistema, en su forma estándar permite muestras de hasta 100 mm (4"), con un soporte multi muestras incluido para poder montar varias muestras más pequeñas a la vez (Figura 5-8).

Batch Sputtering Systems - Proveedor: Dynavac[20].

Al igual que muchos sistemas, este puede depositar películas de metal como aluminio, plata, molibdeno y cromo en sustrato como el vidrio, metal, plástico o láminas. Además, bombardea una amplia gama de materiales semiconductores y dieléctricos, incluidos óxidos conductores transparentes. Tiene la opción de optimizar el tipo de fuente de bombardeo y la fuente de alimentación para los requisitos del proceso, así garantizando que las películas bombardeadas sean lisas, densas y adherentes.(Figura 5-9).

- *Configuraciones de cámara:* Disponible en muchas configuraciones de cámara para producción discontinua y continua: Cilíndrico o rectangular, cerraduras de carga, manejo

¹samarico-cobalto

de materiales.

- *Fuentes de Sputtering*: Posee sistemas de un área grande para sustratos planos o multidimensionales. Las fuentes de Sputter y las fuentes de alimentación se seleccionan para una suavidad, densidad y adhesión óptimas. En cuanto a películas sputtered, ofrece la posibilidad de tener: potencia de RF, AC y DC, fuentes planas y giratorias de magnetrón, procesos reactivos para óxidos, nitruros, etc. Adecuado para materiales semiconductores y dieléctricos, como películas de metal de: aluminio, plata, molibdeno y cromo sobre vidrio, metal, plástico o láminas.
- *Herramientas y calefacción de sustrato*: Tiene opciones de rotación única como: Calotte plano, luminaria segmentada, accesorio abovedado, mecanismo de giro, mecanismo planetario.
- *Control Systems*: Estos sistemas de bombardeo electrónico incluyen un sistema de control propio que se puede personalizar para sus requisitos únicos. Entre algunas características, posee Controlador lógico programable industrial de alta confiabilidad, interfaz gráfica basada en menús a través del software LabVIEW², registro de datos con variables seleccionadas por el usuario, capacidad de descarga de los programas de diseño de película delgada estándar y capacidad de diagnóstico remoto.



Figura 5-9.: Batch Sputtering System[20].

Sputtering Systems & Batch Sputtering Equipment - Proveedor: Semicore – Modelo: SC450[59]

Este modelo usa el confocal sputtering (Figura 5-10), el cual consiste organizar magnetrones dentro de una cámara de vacío de tal manera que se pueden aplicar múltiples materiales sobre el sustrato sin romper el vacío. El chisporroteo confocal también permite pulverizar conjuntamente, o crear una película de dos o más materiales a la vez. Este método es popular para herramientas de investigación y desarrollo y para producciones por lotes a pequeña

²<http://www.ni.com/es-mx/shop/labview.html>

escala.

Para la pulverización catódica convencional de arriba hacia abajo, solo un material podrá pulverizarse a la vez. Esto se debe a la relación geométrica que el magnetrón tiene con el sustrato. Generalmente cuando se pulveriza de esta manera, el material objetivo debe ser más grande que el sustrato para producir una uniformidad de película aceptable. Debido a esto, el usuario debe cambiar los objetivos si desea bombardear un material diferente. Este método también requiere que el material objetivo sea mucho más grande que el área del sustrato. Con sputtering confocal, el objetivo se coloca en un ángulo relativo a la superficie del sustrato. Al hacer esto, el magnetrón también se debe mover fuera del centro del eje de rotación y girar durante la deposición para crear un espesor aceptable de película uniforme.



Figura 5-10.: SC450 - Sputtering System[59].

Dentro de las características de este modelo se tiene:

- Pequeño volumen, procesamiento de ciclo rápido
- Área de deposición activa hasta 200 mm (8") de diámetro
- Acomoda varios sustratos (Forma/Tamaños)
- Controles integrados completamente automáticos
- Fuentes múltiples (hasta 4)

- Modos secuencial o de co-deposición
- Capacidad de gas para proceso múltiple
- Arreglo del cátodo confocal
- Fuentes de Magnetron de 50 mm (2"), 75 mm (3") o 100 mm (4")
- Inclinación del cátodo in situ
- Obturador de cátodo integral
- Fuentes de alimentación DC, DC Pulsante, RF (HF³ o MF⁴)
- Sustrato; Calefacción, refrigeración, polarización RF / DC

Thin Film Deposition Systems R & D Systems- Proveedor: Intlvac[34]

El Intlvac NanochromeTM Pico (Figura 5-11) es una plataforma de deposición de vapores físicos (PVD) de prototipos y revelado universal. Se puede configurar para una variada gama de aplicaciones, como la evaporación e-Beam para despegue, filtros de interferencia óptica, revestimientos de barrera multicapa y óxidos conductores transparentes (TCO).

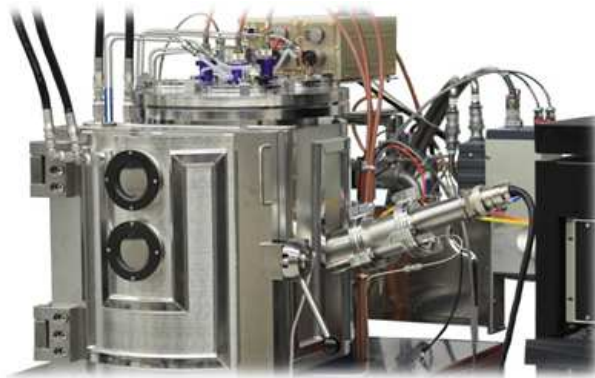


Figura 5-11.: El Intlvac Nanochrome Pico[34]

Con su cámara en forma de D de 16" y su pequeño tamaño, puede acoplarse a cualquier laboratorio y el diseño modular permite una fácil reconfiguración del proceso (es decir, pulverización hasta sputter down).

³High Frequency

⁴Medium frequency

Maneja los siguientes métodos de proceso: Magnetron Sputtering, e-Beam Evaporation, Knudson Cell Evaporation, Thermal Evaporation, entre otros. Es muy práctica para aplicaciones como: transparente conductivo, óxidos (TCO), materiales magnéticos, semiconductores, optoelectrónica, filtros de interferencia, capas de barrera, MEMS, OLED

Presenta las siguientes características: cámara de calentamiento hasta 300°C, 5×10^{-6} Torr en menos de 10 minutos y mejor que 1×10^7 Torr de presión máxima, mesa giratoria estándar o con eje. Etapa refrigerada por agua o etapas calentadas de 500°C a 800°C, sputtering hasta $3 \times 3''$ con DC, RF, AC o magnetrones de DC pulsante.

A continuación se presenta algunas características de los equipos que permiten realizar el proceso de **fotolitografía**.

MiniLAB-Proveedor: Midas System[43].

El MINILAB (Figura 5-12) está equipado con un dispositivo de recubrimiento giratorio, placa calefactora, sistema DI Water y baño de proceso. Este equipo puede ser efectivo realizando un proceso de fotolitografía para una muestra de 4 pulgadas.



Figura 5-12.: MiniLAB Midas System[43].

Algunas de sus características son:

- Sistema Spin Coater (SPIN-1200T)
- Pieza: oblea de 4 pulgadas
- 300 a 7000 rpm $\pm 3\%$ (Sincarga)

- 50 pasos, 50 recetas
- Tiempo: 0.1 a 999.9 s (programable)
- Tasas de aceleración / desaceleración: tiempo variable (0.1 s por paso)
- Sistema de control táctil
- Dimensión: $230 \times 340 \times 265$ (mm)
- Plato caliente: Control PID, Max: 350°C , Dimensión: $240 \times 280 \times 90$ (mm)
- Sistema de agua D.I: Pantalla LED, 10L por hora, 0 a $25 \mu\text{ s/cm}$, Tanque de 20L, Dimensión: $350 \times 350 \times 500$ (mm)

MJB4 Mask Aligner- Proveedor: Suss MicroTec[42]

Este sistema es de fácil utilización y de tamaño compacto, SUSS MicroTec MJB4 (Figura 5-13) representa un sistema para laboratorios y producción de pequeño volumen. Como una solución de fotolitografía de bajo costo, el MJB4 ha establecido estándares de la industria específicamente para el procesamiento de pequeños sustratos y piezas de hasta 100 mm. Equipado con una alineación confiable de alta precisión y una capacidad de impresión de alta resolución en el rango de submicras, el MJB4 demuestra un rendimiento insuperable en cualquier máquina comparable.



Figura 5-13.: Mask Aligner MJB4[43].

Dentro de sus características se tienen:

- Impresión de alta resolución ($0.5 \mu\text{m}$), alineación rápida y precisa, actualizable para litografía UV-Nanoimprint
- Tamaño de la oblea: 1 hasta to 100 mm / 4" (aproximadamente), Tamaño máximo del sustrato: 100×100 mm, tamaño mínimo por pieza: 5×5 mm
- Calibre de la oblea: hasta 4 mm
- Tamaño de la máscara: promedio 2" \times 2" hasta 5" \times 5"

OAI Model 200 Alineador de Máscara y Sistema de Exposición UV- Proveedor:OAI[24]

El OAI Model 200 Mask Aligner y UV Exposure System (Figura 5-14) es una herramienta de alto rendimiento, diseñada con componentes modulares que permiten la fabricación de MEMS, Nanotecnología y Semiconductores. El modelo 200 es un modelo de sobremesa que requiere un espacio mínimo en la sala limpia. Ofrece una alternativa económica para investigación y desarrollo, piloto o producción de bajo volumen. Utilizando un innovador sistema de nivelación de mandril, cojinete de aire y vacío. El sustrato se nivela rápida y suavemente para la alineación de la fotomáscara paralela y el contacto uniforme a través de la oblea durante la exposición de contacto.

El sistema es capaz de ofrecer una resolución micrométrica y precisión de alineación. El Módulo de Alineación presenta conjuntos de insertos de máscara y mandriles de oblea de cambio rápido que permiten el uso de una variedad de sustratos y máscaras sin necesidad de herramientas para la reconfiguración. El Módulo de Alineación incorpora micrómetros para los ejes X, Y y θ . El Alineador Modelo 200 puede equiparse con una amplia gama de ópticas de alineación, incluida la parte trasera IR.



Figura 5-14.: OAI Model 200, Alineador de Máscara y Sistema de Exposición UV [24].

El plato de vacío de iluminación IR puede configurarse para la alineación de obleas o piezas enteras. El OAI Modelo 200 se puede configurar con un Módulo OAI Nano Imprint por lo que es la herramienta NIL de menor costo disponible. OAI también ofrece un módulo diseñado para utilizar photopolymers líquidos para el prototipado rápido o la producción de dispositivos microfluídicos.

Spin Coater L2001A - Proveedor: Ossila [62]

Spin coating es una técnica muy utilizada en laboratorios, que consiste en aplicar uniformemente capas finas en sustratos planos. En el proceso, se deposita una cantidad encima del sustrato y se rota éste a gran velocidad para distribuir uniformemente esta capa por fuerza centrífuga. La rotación continua hasta que el fluido se desplaza hasta los bordes del sustrato, y hasta que se consigue el espesor de capa deseado. El disolvente utilizado en la técnica normalmente es volátil y se evapora, y queda definitivamente la capa de material en el sustrato, cuyo espesor depende de la velocidad de giro, el material depositado y el disolvente.

El recubrimiento por rotación es una técnica ampliamente utilizada y versátil para depositar materiales sobre sustratos con espesores de película precisos y controlables. El Ossila Spin Coater (Figura 5-15) es compacto y muy asequible, lo que permite a todos implementar recubrimiento por rotación en sus investigaciones. Ofrece revestimiento de alta calidad sin problemas de deformación del sustrato. Como no requiere una bomba de vacío o una línea de nitrógeno, es realmente el mejor equipo de centrifugado plug-and-play. Su tamaño compacto y la necesidad reducida de servicio le permiten optimizar el espacio en la guantera o en el banco, sin comprometer la funcionalidad.



Figura 5-15.: Spin Coater [62].

A continuación se presentan sus características particulares:

Tamaño: superficie de 22,5 x 17 cm.

Instalación: se conecta el dispositivo de recubrimiento giratorio en una toma de corriente sin necesidad de líneas de vacío o nitrógeno.

Control: las velocidades de centrifugado oscilan entre 120 y 6000 rpm, cubriendo una gama de diferentes condiciones de revestimiento por centrifugado, desde la lenta cristalización en seco hasta películas ultradelgadas. Además, el sistema de control incorporado le permite tener un máximo de 10 perfiles de usuario separados, con cada perfil capaz de guardar 10 recetas con hasta 50 pasos.

Variables a tener en cuenta: el nivel de burbuja incorporado y las patas ajustables aseguran un eje de giro plano, y el mandril sin vacío evita el combado en sustratos delgados. Ambos factores conducen a una mejor uniformidad en las películas y un mejor rendimiento del dispositivo.

Mantenimiento: cantidad mínima de piezas móviles requeridas, no tiene aspiradora, es poco probable que durante su uso se vea afectada por fallas en el equipo.

Laboratorio: la robusta carcasa de acero, la tapa de vidrio templado y el inserto y portaplacas de polipropileno a prueba de solventes permiten una resistencia adecuada.

Seguridad: la máquina de centrifugado está alimentada por una fuente de alimentación de 24 V DC, por lo que no se necesita alta tensión o alimentación especializada con requisitos adicionales. Protegido de los solventes y la manipulación, hay un interruptor magnético de seguridad que impide que el portabrocas gire cuando la tapa está abierta.

5.5. Análisis de costos para la fabricación de sensores de película fina

Partiendo de la identificación de las materias primas y la maquinaria requerida para la fabricación del elemento primario de un sensor de película fina ya descrita, se hace una revisión de sus costos de producción.

A continuación se presentan tres propuestas de proveedores de las materias primas más importantes a tener en cuenta en la fabricación del elemento primario de un sensor de película fina y sus respectivos costos.

	Posibles marcas	Costo	Cantidad
Sustratos			
Silicio Pureza (99.999%)	HMW Hauner GmbH & Co. KG	USD\$377.00	Tarjeta para sputter de diámetro de 50.8 mm por 3.2 mm de calibre
	Kurt J. Lesker	USD\$165.00	
	MaTeck	USD 200.00	
Alumina Pureza (99.999%)	HMW Hauner GmbH & Co. KG	USD\$100.00	Tarjeta para sputter de diámetro de 50.8 mm por 3.2 mm de calibre
	Kurt J. Lesker	USD\$100.00	
	MaTeck	USD\$106.00	
Insumos Fitolitografía			
Fotoresistente	SU8 de MicroChem	USD\$1.10	por gramo
	AZ 1518 de Mextronics	USD\$0.30	por gramo
	AZ 9260 de Mextronics	USD\$0.85	por gramo
Revelador	SU8 de MicroChem	USD\$0.05	por gramo
	AZ 300 MIF de Mextronics	USD\$0.01	por gramo
	AZ 400K de Mextronics	USD\$0.02	por gramo
RTD			

Platino Pureza (99.999 %)	HMW Hauner GmbH & Co. KG	USD\$377.00	Tarjeta para sputter de diámetro de 50.8 mm por 3.2 mm de calibre
	Ted Pella, INC	USD\$930.00	
	FisherScientific	USD\$1183.00	
Capa de Vidrio aislante		USD\$0.01	por gramo
Termopar			
Cromel	Kurt J. Lesker	USD\$185.00	Tarjeta para sputter de diámetro de 50.8 mm por 3.2 mm de calibre
Alumel	Kurt J. Lesker	USD\$185.00	
Cable aislado con fibra de vidrio	MICC TECH. LIMITED	USD\$2.80	por metro
Óxido de magnesio		USD\$0.01	por gramo
Galga			
Sustrato flexible		USD\$38.00	por Kg

De igual manera se presenta a continuación el costo de las máquinas requeridas comparando el precio dado por los proveedores propuestos:

Posibles marcas	Costo
Deposición	
Modular Deposition Systems (HEX series) – Proveedor: Korvus Technology	USD\$26,000.00
Batch Sputtering Systems - Proveedor: Dynavac	USD\$50,000.00
Sputtering Systems & Batch Sputtering Equipment - Modelo: SC450 - Proveedor: Semicore	USD\$100,000.00
Thin Film Deposition Systems R & D Systems- Proveedor: Intlvac	USD\$80,000.00
Fotolitografía	
MiniLAB-Proveedor: Midas System	USD\$10,000.00
MJB4 Mask Aligner- Proveedor: Suss MicroTec	USD\$60,000.00
OAI Model 200 Alineador de Mascara y Sistema de Exposición UV-Proveedor:OAI	USD\$63,000.00
Spin Coater L2001A - Proveedor: Ossila	USD\$2,000.00
Entorno de trabajo	
Uso Sala Blanca	USD\$26.00 por hora

Para la fabricación del elemento primario de un sensor convencional, cuya dimensión es de $2,032 \times 2,286$ mm, en una tarjeta típica de $50,8\text{mm} \times 0,1\text{mm}$, es posible hacerlo en una oblea de este tamaño y resultarían un total de 1700 dispositivos aproximadamente.

Al analizar los requerimientos en materia prima para la fabricación de un RTD Pt100, es posible la fabricación por un valor promedio de US \$0.76 y si se toma la actual tasa de cambio (\$2.875,72) en Colombia [1] \$2.175.

En cuanto a Termopar Tipo K, es posible la fabricación por un valor promedio de US \$0.29 y si se toma la actual tasa de cambio (\$2.875,72) en Colombia [1] \$834.

Y para la fabricación de una galga, es posible la fabricación por un valor promedio de US \$0.18 y si se toma la actual tasa de cambio en Colombia (\$2.875,72) [1] \$517.62.

Costos de mano de obra

Se analiza, adicionalmente los costos de mano de obra requeridos en el proceso de fabricación. A continuación se detalla el valor promedio que se requiere para el pago de mano de obra, teniendo en cuenta la capacitación que debe tener el personal y el proceso de fabricación que acompaña, además de la asistencia y / o cualquier otro servicio relacionado.

Docente de la universidad	Docente de otra institución	Funcionario de la marca
USD\$27 por hora	USD\$41 por hora	USD\$81 por hora

6. Conclusiones y recomendaciones

6.1. Conclusiones

Al ser la temperatura una variable presente en la gran mayoría de los procesos de producción, el requerimiento de medir esta variable se convierte en una necesidad y requisito para el control de cualquier planta, debido a esto, como resultado del análisis de mercado de los sensores en la industria colombiana los sensores de temperatura son los reportados como más comprados y más vendidos. Seguidos por estos se tienen los sensores de presión y nivel.

Se identificaron los sensores de temperatura con mayor presencia en la industria colombiana como las Detectores de Temperatura Resistivos (RTD), particularmente Pt100, por su precisión y escala de trabajo, puesto que son utilizadas en procesos donde se requiere un especial cuidado en la temperatura controlada, como en el sector alimenticio, farmacéutico y energético. De igual forma los termopares, los tipo K son los más comunes, estos se utilizan de una manera significativa en las plantas de producción, debido a su amplio rango de temperaturas y bajo costo.

Las galgas extensiométricas, por su parte, son utilizadas en una gran medida para cuantificar explícitamente la presión. Debido a que son sensores cuya resistencia varía con la fuerza aplicada, pueden llegar a convertirse también en elementos que midan presión, tensión, peso, entre otros, con respecto al cambio de la resistencia eléctrica.

También se pudo identificar los sectores de la industria en los cuales el uso de los sensores de distinto tipo, es mayor. La manufacturera, minería, plásticos y caucho encabezan la estadística. Sin embargo todos los sectores reportaron el uso de algún sensor en el proceso de realizan o el servicio que presentan, demostrando de esta manera la importancia de hacer crecer, fortalecer e investigar en este mercado.

Tanto los RTD, los termopares y las galgas se pueden fabricar con un procedimiento similar, como lo es la fabricación de dispositivos por película fina. Este proceso se puede resumir en dos grandes etapas, la primera de ellas la pulverización catódica o *sputtering*, la cual consiste en la deposición de una película delgada en un sustrato o material base, formando una especie de oblea dada por el bombardeo a muy alta energía del material a depositar. El proceso siguiente es la fotolitografía, el cual permite retirar cierta parte del material ya

depositado, con el propósito de formar una estructura definida, como lo es una resistencia.

Se realiza un análisis de los costos del elemento primario para un sensor de película fina a partir del estudio de las materias primas y maquinarias propuestas. Las referencias presentadas surgen de una preselección de las máquinas, teniendo en cuenta especificaciones técnicas importantes como: procesos a utilizar, tipos de material a depositar, sistemas de deposición, posibilidad de crecimiento en capacidad a través de hardware adicional, dependiendo del incremento de uso del equipo y accesibilidad para Colombia.

De esta manera se proporciona algunos elementos esenciales para la fabricación de los sensores más utilizados en la industria colombiana, particularmente se establece una estrategia de producción del elemento primario de medición, a través de una secuencia de pasos lógicos para su fabricación.

6.2. Recomendaciones

Teniendo en cuenta que esta investigación contó con la colaboración de una gran cantidad de empresas y el beneficio que trae impactaría a una gran cantidad de sectores de la industria, las universidades colombianas podrían superar los obstáculos, para asociarse entre ellas, a través de sus docentes y a su vez con la empresa privada, y poder llevar a cabo una gran cantidad de proyectos necesarios de manera conjunta universidad empresa y de esta manera soportar la evolución de la industria y la academia de forma conjunta.

Colombia tiene un gran potencial para instaurar industrias propias, si reconoce la importancia de invertir en investigación e innovación. Por lo que instaurar industrias propias es factible y permite disminuir la dependencia con economías extranjeras.

Como **Trabajo futuro** se propone realizar un estudio de viabilidad, de tal manera que se puedan incluir los costos adicionales como los de mano de obra, estableciendo o desarrollando una estructura de planta, en la cual se establezca como procesos adicionales la construcción de los empaques, su protección y cableado, teniendo en cuenta que para la estrategia de producción propuesta únicamente se tubo en cuenta los procedimientos y naturaleza de fabricación del elemento primario de los sensores a partir de sus materias primas y procesos de producción.

Adicionalmente es necesario cuantificar el volumen de mercado que se requerirá en el momento de la puesta en marcha de la planta, sumando costos adicionales como, procesos administrativos, de promoción y venta, además de certificaciones y control de calidad.

A. Anexo A: Sensores utilizados en la industria Colombiana

A través de la aplicación de esta encuesta a las diferentes empresas industriales de Colombia se indago el uso de sensores en sus procesos productivos, las respuestas obtenidas se muestran a continuación:

Nombre de la empresa	1. En qué sector de la industria se desempeña su compañía	2. ¿Cuál(es) variable(s) requiere(n) ser medida(s) en los principales procesos de producción que tiene su empresa?	3. Cual(es) variables mide el mayor número de sensores en su empresa	4. Cuáles son sus principales proveedores para el sensor que su compañía más adquiere	5. Califique el servicio de sus proveedores de venta como de	6. Cuáles son las referencias de los sensores que su compañía más adquiere	7. ¿Cuál es la vida útil aproximada de los sensores que su compañía más adquiere?	8. Califique la calidad de los sensores que su compañía más adquiere
Industrias Eva LTDA	Fábrica de calzado	Velocidad y/o aceleración, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Humedad, Tiempo, Torque, Luz	Máquinas Industriales	China	NC	Bueno	3 a 4 años	Bueno
Sempertex A.	S. Plásticos y caucho	Masa, Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Desplazamiento, Humedad, Tiempo, ph, Presencia	Final de carrera, Nivel, Desplazamiento	Instrucontrol, Eléctricos Importados, Iteco	Bueno	Turck, Schneider, Temposonic	10 años	Bueno
Trimco S.A.	Manufacturera	Temperatura, Nivel, Presión, Fuerza, ph, Torque	Temperatura, presión	Micro, Arvax	Bueno	Varias	1 - 8 años	Bueno
Cabarria S.A.S	IQA Química, Alimentos y bebidas, Farmacéutica	Masa, Velocidad y/o aceleración, Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Humedad, Tiempo, Volumen, ph	Masa, Temperatura, Presion	Schneider Electric, Telemecanique, Medicion Y Control	Bueno	OEM, Omega	3 años	Bueno
NIVER SA	Textil y cuero	Masa, Velocidad y/o aceleración, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Humedad, Tiempo, Volumen, ph	Velocidad, Volumen, Presion	Redes electricas, Sensomatic	Bueno	VT18-2T1152 DC 10-30V, XUXOAR-CTT16 "TELEMECANIQUE"	5 años	Bueno

Gelco S.A.S.	Alimentos y bebidas	Masa, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Humedad, Tiempo, ph, Presencia	Nivel, Temperatura	Ph,	Siemens, ABB, Telemecanique	Bueno	Sensores inductivos Telmecanique	5 a 7 años	Bueno
Luis Eduardo Caicedo Lec SA	Manufacturera	Masa, Temperatura, Presión, Tiempo, Volumen, ph	Temperatura, Masa, Tiempo		Distriiluminaciones (Temporizados), BCI Ingeniería SAS (Masa grameras), Prometalicos (Masa basculas)	Bueno	Sensores de temperatura Tipo J , K, Temporizados 0-180 segundos, 1-60 minutos, Masas grameras 0-15000gr	Promedio 3 a 5 años	Bueno
Gloria Colombia S.A.	Alimentos y bebidas	Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, ph, Presencia	Temperatura, Nivel, Presion		Endress + Hausser, IFM, Instrumatic	Bueno	PT 100, Sensores de nivel de distintos tipo, vibrador, ultrasonido y radar, Presostatos, presion diferencial	5 años	Excelente
Acerias De Los Andes SAS	Metalúrgica, Minería, áridos, cemento	Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Nivel, Fuerza, Torque, Presencia	Nivel, Velocidad, Presencia	Ve-	Autonics, Siemens, Telemecanique	Bueno	-	MAS DE 1 Año	Bueno
Gilpa Impresores sa	Manufacturera	Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Desplazamiento, Fuerza, Tiempo, Torque, Luz, Presencia	Temperatura, Presencia, Velocidad		Shneider, Eroelectronic, Siemens	Excelente	Sensores Inductivos de 12 mm, Termocuplas tipo J, Sensor magnetico de doble contacto	6 meses	Excelente
Serviparamo S.A	Construcción	Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Humedad	Temperatura, Presión, Flujo		Dwyer, Veris, Onicon	Bueno	Dwyer: TE-DFN-A0648-00, Dwyer: 629-04-CH-P2-E5-S1, ONICON: F111	6 años	Bueno
Fabrica De Chocolates Triunfo S.A.	Alimentos y bebidas	Temperatura, Flujo, Humedad, ph, oxigeno disuelto	humedad, temperatura, ph		hanna	Bueno	-	4años 5 años	Bueno

Grupo Op Grficas	Celulosa y papel	Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Desplazamiento, Humedad, ph	posicionamiento	omnrom	Excelente	-	más de 2 años	Excelente
CIAC	aeronáutica/aeroespacial	Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Fuerza, Humedad, Tiempo	Presión, Temperatura, Velocidad	Boeing, lancer, aeroinstruments	Excelente	NDA	se bian cam-según normativa aeronáutica	Excelente
MAGNETRON	Manufacturera, Maquinaria y equipos	Masa, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Fuerza, Humedad, Tiempo, Longitudes	Longitud, Temperatura	MOC, Edwards, Hihg Tech	Regular	Edwards, Fluke	1 año	Bueno
Corporación de la Industria Aeronáutica Colombiana S.A.	Aeronáutico	Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Presión, Flujo, Fuerza, Humedad, Torque	Fuerza, Temperatura, Humedad	Multicontrol, PCB Piezotronics	Excelente	-	Desconocido, aún no sometidos a carga.	Excelente
KOYOMAD S.A.	Alimentos y bebidas	Masa, Temperatura, Presión, Humedad, ph	TEMPERATURA	IMPORTACION	Excelente	DATA TRACE	+/- 5 AÑOS	Excelente
Maken	Aguas/aguas residuales, Equipos transporte	Masa, Velocidad y/o aceleración, Nivel, Tiempo, Volumen	volumen, tiempo, peso	michelin, google, Hempel	Regular	-	5 años	Bueno
Arneses y Gomas	Manufacturera, Equipos transporte, Plásticos y caucho	Masa, Conductividad, Densidad, Temperatura, Presión, Flujo	Temperatura, Presion, Conductividad	Rodriguez y Urbina ltda	Bueno	-	1-10 años	Bueno
PLASTICOS FAYCO S.A.	Plásticos y caucho	Masa, Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Presión, Desplazamiento, Tiempo	Temperatura, Marcas De Corte, Posicion	Autonic, Sick, Siemens	Regular	Lectores De Marca, Encoder, Termopares	1 AÑO	Excelente

INDUSTRIAS CANNON DE COLOMBIA	Textil y cuero, Textil	Masa, Velocidad y/o aceleración, Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Desplazamiento, Fuerza, Humedad, Tiempo, Volumen, ph, Torque, Presencia	Velocidad, Nivel, Fuerza	Telemecanic, Omrom, Siemens	Bueno	-		Varia, pero tenemos sensores que tienen 8 y 9 años	Bueno
PROTECVOLT LTDA.	Equipos electrónicos	Tiempo, Frecuencia	Tiempo y frecuencia	Meinberg, Masterclock	Excelente	M300, M600, M900	15 años		Excelente
AUROS COPIAS S.A.	Imprenta	Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Fuerza, Humedad, Tiempo, Luz	Velocidad, Color / Luz, Fuerza / Presion	Fabricante Del Equipo	Regular	Segun Modelo Del Equipo	36 Meses		Bueno
COLMALLAS S.A.	Metalúrgica, Manufacturera	Masa, Velocidad y/o aceleración, Densidad, Temperatura, Nivel, Flujo, Variables químicas, Fuerza, Tiempo, Volumen, ph	Depende de la linea de produccion	De acuerdo a donde se consiga en el mercado	Bueno	-	-		Bueno
INDUTANPAS LTDA	Metalúrgica, Aguas/aguas residuales, Minería, áridos, cemento, Petróleo/gas e hidrocarburos, Equipos transporte, Plásticos y caucho	Temperatura, Presión, Flujo, Fuerza, Volumen, Torque	-	-	Bueno	-	10 años		Bueno
PRODUCTORA DE ALAMBRES S.A.	Manufacturera	Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo	Nivel para control de volumen, Temperatura en algunos procesos tratamiento térmico y secado, Presion para equipos de filtración y alimentacion de gas natural	Automatizacion y Control Ltda.	Bueno	termocuplas Tipo K	12 meses		Excelente

RIORION S.A.		Metalúrgica, Manufacturera, Celulosa y papel, Maquinaria y equipos, Minería, áridos, cemento	Masa, Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Fuerza, Torque	Temperatura, Nivel, Caudal	Siemens, Instrumatic, Damfus	Excelente	-	-	Excelente
LOS PINOS S.A.		Manufacturera	Desplazamiento, Fuerza, Presencia, proximidad	Proximidad, Movimiento	Sparkfun	Bueno	-	-	Bueno
PRODUCCIONES QUÍMICAS S.A.		Química	Masa, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Tiempo, Volumen, ph	Temperatura, Presión, Nivel	Instrumatic SAS, Automatización S.A., Master Controls Ltda	Bueno	Sensores de temperatura RTD Pt 100, Transmisores de presión, Sensores de nivel capacitivos	No la conozco	Excelente
Excolombiana S.A.	Co-	Manufacturera	Velocidad y/o aceleración, Temperatura, Presión, Desplazamiento, Diámetro calibre	Intensidad corriente, Presión, Desplazamiento	Sin información	Bueno	Sin información	Sin información	Bueno
MGC		Manufacturera, Alimentos y bebidas	Temperatura, Presión, Tiempo, Capacidad Calorífica (BTU)	Calor, Presión, Temperatura	BTU servicon-troles, Danffos, Full Gauge	Bueno	tcr 900	10 años	Bueno
Pelikan Colombia SAS		Manufacturera	Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Fuerza, Tiempo, Volumen, ph, Torque	Presión, Fuerza, Temperatura	Control y Sensores, Instrumatic, Otras	Bueno	Inductivos, Capacitivos, Termopares	-	Excelente
Eduardili		Manufacturera, Maquinaria y equipos, Aguas/aguas residuales	Masa, Conductividad, Densidad, Temperatura, Presión, Variables químicas, Tiempo, Volumen, ph	Químicas, PH, Presión	Exro	Excelente	No las conozco	5 años	Bueno
Colcafé		Manufacturera	Masa, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Humedad, Volumen, ph, Presencia	Presencia, Temperatura, Presión	Allen Bradley, ABB, Siemens	Regular	Sensores inductivos de proximidad (varios tipos), Termocuplas (varios tipos)	5 años	Bueno

Gabriel de Colombia SA	Manufacturera	Conductividad, Temperatura, Presión, Flujo, Humedad, ph, Torque, Presencia	Presencia, Presión, Fuerza	Multicontrol, Micro, Festo	Bueno	-	3 años	Bueno
CENTElsa	Manufacturera	Masa, Velocidad y/o aceleración, Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Desplazamiento, Fuerza, Humedad, Tiempo, Volumen, ph, Torque, Luz, Presencia	Velocidad de la línea, Termocuplas, Tensores	-	Bueno	-	-	Bueno
Mexichem Resinas Colombia	Petroquímica	Velocidad y/o aceleración, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Humedad, Tiempo, Volumen, ph, Torque	Presión, Nivel, Flujo	Yokogawa, Rosemount, Pyromation	Bueno	-	5-15 años	Excelente
Multidimensionales	Manufacturera	Velocidad y/o aceleración, Conductividad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Desplazamiento, Fuerza, Tiempo, Torque, Luz, Presencia	temperatura, presencia, posicion	Omron, Sick, watlow	Excelente	termocuplas, opticos	5 años	Excelente
alambres y mallas s.a.	Metalúrgica	Masa, Velocidad y/o aceleración, Conductividad, Densidad, Temperatura, Presión, Flujo, Variables químicas, Desplazamiento, Fuerza, Tiempo, ph, Luz	velocidades, peso, fuerza	soluciones electricas	Bueno	-	depende	Regular

Detergentes LTDA	Química	Masa, Conductividad, Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, Desplazamiento, Humedad, Tiempo	Flujo, Proximidad, Nivel	Sentronic, Endress and Hauser, Siemens	Bueno	Endress and Hauser, Peppers and Fuchs, Siemens	2 años	Bueno
High Lights S.A	Manufacturera, Equipos electrónicos	Temperatura, Presión, Fuerza, Humedad, Luz, Presencia	Luxometria, Electricas, Presion	SEDIS, AECO, Midman	Bueno	Fotometricos, Inductivos, Capacitivo	5 años	Excelente
CODENSA S.A. ESP	Suministro de electricidad y/o gas	Temperatura, Nivel, Presión, Variables químicas, Luz, eléctricas (corrientes, tensión, impedancia, etc)	Eléctricas, Iluminación pública, Temperatura	Iluminación. Fabricantes de fotoceldas (celsa, otros), Fabricantes y/o distribuidores de herramientas y/o equipos de trabajo)	-	Cada fabricante de equipos incorpora los sensores respectivos	La compañía compra según vida útil del equipo	Bueno
DCI PROYECTOS SAS	servicios, ingeniería y construcción	Conductividad, Presión, Luz, Presencia	luz y presencia, conductividad, presion	leviton, schneider	Bueno	ver catalogo LEviton presencia y luz	10 años	Bueno
Subestaciones SMA LTDA	Manufacturera	Conductividad, Temperatura, Variables químicas, Fuerza, Volumen, Torque, Luz	Temperatura, Conductividad eléctrica, humedad	Bestcontrol, Teconex, Dime LTDA.	Bueno	FTS011 STEGO, TRT-10A230V-NC ROJO FANDIS, IGR35F FANDIS	100000 CICLOS	Bueno

B. Anexo B: Sensores vendidos a la industria Colombiana

A través de la aplicación de esta encuesta a las diferentes empresas vendedoras de instrumentación, se indagó las preferencias en ventas por parte de las empresas industriales en Colombia, las respuestas obtenidas se muestran a continuación:

Nombre de la empresa	1. ¿Cuál(es) son los variables que cuantifican los sensores con MAYOR venta en la empresa?	2. ¿Cuáles son las referencias o tipo de los sensores que la compañía MÁS vende?	3. ¿Cuál es la vida útil de estos sensores?	4. ¿Cuáles son los principales proveedores para los sensores que la compañía MÁS vende?
BCI INGENIERIA SAS	Masa	Shear beam ó tipo viga, Single point ó monobloque	Indeterminada	Informacion no disponible
Rodriguez y Urbina Ltda	Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Humedad, Presencia	Sensores de temperatura tipo Termocupla y Pt100, Sensores inductivos y capacitivos, Sensores de presencia, reflex y autoreflex	La vida útil de cada sensor esta definida mas por el ambiente en el cual están inmersos, es decir; temperatura de trabajo, humedad, presencia de vapores, etc. Por esta razón no tenemos definido un tiempo estándar de vida útil para cada tipo de sensor.	Datalogic, Watlow, Xecro, Telco
SENTRONIC	Presencia	inductivos, fotoeléctricos, ultrasonicos	12 meses y 18 meses	pepperl+Fuchs
CONTROL YSENSORES SAS	Temperatura, Presencia	Termocupla J, Pt100	Más de 2 años	Fabricación propia
Hanna Instruments	Conductividad, Temperatura, ph	HI1131, HI1230, HI 1285	1,5 años	Industrias Alimentos, Industrias manufactureras, Agricultura
YOKOGAWA COLOMBIA SAS	Densidad, Temperatura, Presión, Flujo, ph	EJX5, AXF, RCC	10 AÑOS O MAS	YOKOGAWA
HERNAN ESCOBAR POSADA REPRESENTACIONES LTDA	Densidad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, ph, viscosidad	Mod. 2051 Tx de Precision Rosemount, Mod. 644 Tx de Temp Rosemount, Mod. CMF Medidor de flujo másico Micromotion	10-15 años	ROSEMOUNT, MICROMOTION, PEPPERL+FUCHS
Omron	Presencia	Ópticos difusos, Inductivos	Confidencial	Omron
SENTRONIC	Presencia	Inductivo, Fotoeléctrico, Ultrasonido	1-2 años	PEPPERL+FUCHS
MULTICONTROL LTDA	Temperatura, Nivel, Presión, Desplazamiento, Presencia	Inductivos, Fotoelectricos de presión	más de un año	OMRON,GREFAN
INSTRUCCIONES S.A.S	Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Humedad, ph, Luz, Presencia	OMRON, AUTONICS, TURCK	1 a 5 AÑOS	CONTRAL, ELÉCTRICAS BOGOTÁ, DAKORA
INSTRUMENTOS Y AUTOMATISMOS	Temperatura, Nivel, Presión	sensores de nivel por radar, sensores de temperatura con medidas y otros valores especiales, sensores fotoeléctricos	3 a 10 años - depende del sensor	VEGA, ensambles propios, AECO
Endress+Hauser Colombia SAS	Conductividad, Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Variables químicas, ph	Promag, Micropilot, Liquiline	10 años	Endress+Hauser

BASCULAS PROMETALICOS S.A.	Presión, Fuerza	CELDAS DE CARGA (STRAIN GAGES) ANALOGAS Y DIGITALES, SENSORES DE NIVEL, SENSORES FOTOELÉCTRICOS	MÁS DE 10 AÑOS	SENSORTRONICS, BINDICATOR, SNEIDER
AJ&M SOLUCION	Masa, Flujo	tipo turbina, electromagnéticos, dispersión de masa térmica	5 años	onicon, fox termal, grey line
INSTRUMATIC	Temperatura, Nivel, Presión, Flujo, Humedad, Presencia	Termocuplas y PT100, Sensores de nivel continuo y detección. Radars, ultrasonido, por conductividad, vibradores, Transmisores de presión y sensores de detección de posición	Depende de las aplicaciones, entre 1 a 2 años	Cobra y Omega, VEGA y AECO, VEGA y AECO

Bibliografía

- [1] *Dolar TRM Hoy para Colombia, Histórico últimos 30 días COP \$ 2875.72 - Dolar Web.* <https://dolar.wilkinsonpc.com.co/divisas/dolar.html>. – Consultado en 2018-07-31
- [2] *Procesado de TBCs — El movimiento se demuestra andando.* <https://tecnoatocha.wordpress.com/tecnicas-de-proyeccion/>. – 2018-12-13
- [3] *Procesado de TBCs — El movimiento se demuestra andando*
- [4] *So, What is an RTD? Fabrication.* http://www.rdfcorp.com/anotes/pa-rtd/pa-rtd_03.shtml. – Consultado en 2018-06-29
- [5] *The Basics of Microlithography.* <http://www.lithoguru.com/scientist/lithobasics.html>. – Consultado en 2018-07-01
- [6] *What Is Sputtering? Magnetron Sputtering?* <http://www.semicore.com/what-is-sputtering>. – Consultado en 2018-07-01
- [7] AISLANTE, Tipo D.: Información Técnica. , p. 1–3
- [8] AMERICAN ELEMENTS: *Aluminum Nickel Alloy — AMERICAN ELEMENTS®.* <https://www.americanelements.com/aluminum-nickel-alloy-12635-27-7>. – Consultado en 2018-09-02
- [9] BORZENKO, T ; SLOBODSKYY, T ; SUPP, D ; GOULD, C ; SCHMIDT, G ; MOLENKAMP, L W.: Micro-patterned RTDs: Fabrication details and device performance. (2007)
- [10] COLCIENCIAS: *84. DIEZ CASOS EXITOSOS DE INNOVACIÓN TECNOLÓGICA.pdf.* Bogotá D.C. : Armada electrónica, 1994
- [11] COLCIENCIAS, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas”: *116. Nuevas tecnologías para la modernización.pdf.* Bogotá D.C. : Tercer Mundo Editores, 1993
- [12] COLCIENCIAS, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas” ; R, Jairo Cesar L. (Ed.): *Plan estratégico del programa nacional de desarrollo tecnológico, industrial y calidad, 2000-2010.* Editora Gu. Bogotá D.C., 2000. – ISBN 958–8130–02–6

- [13] COLCIENCIAS, Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas”: *Plan estratégico del programa nacional de desarrollo tecnológico, industrial y calidad: Innovación y desarrollo tecnológico empresarial colombiano en un contexto de globalización*. 2005. – ISBN 9588130905
- [14] COMPANY, Kurt J L. ; COMPANY, Kurt J L. ; HILLS, Jefferson ; KINGDOM, United ; SUSSEX, East ; CLASSIFIED, Not ; CLASSIFIED, Not ; CLASSIFIED, Not: Platinum (pieces) Platinum (pieces). (2017), p. 1–9
- [15] CONCEPT ALLOYS: *Concept Alloys Intellectual Property - Concept Alloys*. <https://conceptalloys.com/concept-alloys-intellectual-property/>. – Consultado en 2018-08-15
- [16] COPPER DEVELOPEMENT ASSOCIATION: 15 Copper-nickel Welding and Fabrication. En: *CDA Publication* (2013), Nr. 139
- [17] DOEBELIN, Ernest O. ; PÉREZ CASTELLANOS, José H. ; NAVARRO SALAS, Rodolfo ; HANO ROA, María del C. ; ORTEGA GONZÁLEZ, Luis M. ; RODRÍGUEZ RAMÍREZ, Francisco: *Sistemas de medición e instrumentación : diseño y aplicación*. México : McGraw-Hill, 2005., 2005. – ISBN 9701049772
- [18] DUSEN, Callendar-van: Cómo calibrar una RTD o un sensor de temperatura con resistencia de platino (PRT). , p. 1–8
- [19] DYNAMO: *Celda de carga de 10kg - Dynamo Electronics*. <https://www.dynamoelectronics.com/industria/774-celda-de-carga-de-10kg.html>. – Consultado en 2018-08-07
- [20] DYNAVAC: *Batch Sputtering Systems - Dynavac*. <http://www.dynavac.com/systems/thin-film-systems/vacuum-metalizing-systems/>. – Consultado en 2018-07-02
- [21] EASTERBROOK, Steve ; SINGER, Janice ; STOREY, Margaret-Anne ; DAMIAN, Daniela: Selecting Empirical Methods for Software Engineering Research. En: *Guide to Advanced Empirical Software Engineering* (2008), p. 285–311. – ISBN 978–1–84800–043–8
- [22] ECURED: *Galga extensiométrica - EcuRed*. https://www.ecured.cu/Galga_extensiométrica. – Consultado en 2018-07-14
- [23] ENDRESS+HAUSER. *Manufacture of Temperature Sensor*. <http://www.endress.com/en/Field-instruments-overview/Temperature-measurement-thermometers-transmitters>. 2017
- [24] EXPO, U V.: *Applicatio ns*. , p. 1–3

- [25] FOSTER, James H. ; LOVERING, Primary Examiner-richard D. ; COHEN, T ; SNYDER, Marvin: United States Patent (19). (1978), Nr. 19
- [26] FRADEN, Jacob: *Handbook of Modern Sensors. [electronic resource] : Physics, Designs, and Applications*. New York, NY : Springer New York : Imprint: Springer, 2010., 2010. – ISBN 9781441964663
- [27] HAM, S. (1). ; KIM, K. (1). ; KIM, J. (1). ; MIN, N. (1). ; CHOI, W. (2). ; PARK, C. (2).: Design, fabrication, and characterization of piezoresistive strain gage-based pressure sensors for mechatronic systems. En: *Proceedings of the 2015 IEEE International Workshop of Electronics, Control, Measurement, Signals and their Application to Mechatronics, ECMSM 2015*. (1)Department of Control and Instrumentation Engineering Korea University, 2015
- [28] HARRIS, Louis ; JOHNSON, Ellis A.: The Technique of Sputtering Sensitive Thermocouples. En: *Review of Scientific Instruments* 5 (1934), Nr. 4, p. 153–158
- [29] HONEY WELL INTERNATIONAL INC: Load cell use in aerospace ground and flight test applications. (2010), Nr. March, p. 1–7
- [30] HUNKER: *How Do Diaphragm Pressure Gauges Work?* — Hunker. <https://www.hunker.com/13409253/how-do-diaphragm-pressure-gauges-work>. – Consultado en 2018-08-26
- [31] ICYTSA: *FABRICACION DE RTDS PT 100 INGENIERIA CONTROL Y TEMPERATURA SA DE CV*. http://icytsa.com.mx/1976378_FABRICACION-DE-RTDS-PT-100.html. – Consultado en 2018-07-01
- [32] INGENIRÍA MECAFENIX: *Sensor de temperatura termopar - Ingeniería mecafenix*. <http://www.ingmecafenix.com/automatizacion/sensor-temperatura-termopar/>. – Consultado en 2018-08-12
- [33] DISTITAL DE CIENCIA TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN, Comisión: Plan de ciencia, tecnología e innovación Bogotá D.C 2007-2019. "Bogotá sociedad del conocimiento". (2007), p. 20
- [34] INTLVAC: *Nanochrome Pico*. <https://intlvac.com/Systems/Magnetron-Sputtering/Nanochrome-Pico>. – Consultado en 2018-09-10
- [35] JANATA, Jií: *Thermal Sensors*. 2009. – 51–62 p.. – ISBN 0128004487
- [36] KIM, Jikwang ; KIM+, Jongsung ; SHIN, Younghwa ; YOON, Youngsoo: A Study on the Fabrication of an RTD (Resistance Temperature Detector) by Using Pt Thin Film. En: *Chem. Eng* 18 (2001), Nr. 1, p. 61–66

- [37] LEE, Chi-Yuan ; YANG, Tachung ; CHIEN, Tzu-Hao: FABRICATION OF FLEXIBLE MICRO-PRESSURE AND THERMAL SENSOR FOR PEMFC APPLICATION. En: *International Journal of Green Energy* 9 (2012), p. 517–528. – ISSN 1543–5083
- [38] LIMA, B. ; SILVA, A. ; MORIMOTO, N.: A Proposed Process to Fabricate Strain Gauge Directly Over the Sensor Substrate by Serigraphic Method. En: *ECS TRANSACTIONS*, 2006, p. 123
- [39] M, Muralidhar S. ; G, Vijaya ; MS, Krupashankara ; SRIDHARA, B K. ; SHRIDHAR, T N.: Studies on Nanostructure Aluminium Thin Film Coatings Deposited using DC magnetron Sputtering Process. En: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 149 (2016), p. 012071. – ISSN 1757–8981
- [40] MERCK PERFORMANCE MATERIALS GMBH: Technisches Datenblatt AZ 1500 Series. 49 (2016), Nr. 611, p. 3
- [41] MICROCHEMICALS: *Photoresists, Solvents, Etchants, Wafers, and Yellow Light - MicroChemicals GmbH*. <https://www.microchemicals.com/>. – Consultado en 2018-09-02
- [42] MICROTEC, Suss: IMPRINT LITHOGRAPHY MICRO-AND NANO-IMPRINT SOLUTIONS FOR SUSS MASK ALIGNERS.
- [43] MIDAS SYSTEM: *MINILAB*. http://www.midas-system.com/board/?board=products_en&category=50&no=61. – Consultado en 2018-07-08
- [44] MOHN, Elizabeth: Microelectromechanical systems (MEMS). En: *Salem Press Encyclopedia of Science* (2018)
- [45] OF, Design ; CELL, Load ; LARGE, With ; CAPACITY, Overload ; AGHILI, Farhad ; CONCEPTION, D E. ; CELLULE, U N E. ; AVEC, D E C. ; GRAND, U N. ; SURCHARGE, Capacite: DESIGN OF A LOAD CELL WITH LARGE OVERLOAD CAPACITY Farhad Aghili. 34 (2010), Nr. 3, p. 449–461
- [46] OMEGA: *Códigos de Cores para Termopares*. <https://cl.omega.com/techref/colorcodes.html>. – 2018-08-12
- [47] OMEGA: *RTD Sensors & Probes - Resistance Temperature Detection — OMEGA Engineering*. <https://www.omega.com/prodinfo/rtd.html>. – Consultado en 2018-07-01
- [48] OMEGA: *What is a strain gage? — Omega Engineering*. <https://www.omega.com/prodinfo/straingages.html>. – Consultado en 2018-07-14

- [49] OMEGA ENGINEERING INC.: Force-Related Measurements. En: *Transactions in Measurement and Control* 3 (1998)
- [50] PALLÁS ARENY, Ramón: *Sensores y acondicionadores de señal*. México Barcelona Marcombo 2007, 2007. – ISBN 9789701512319
- [51] POLYONICS: *Flexible Substrates for Electronics — Polyonics PolyFLEX*. <https://polyonics.com/FlexibleSubstrates/>. – 2018-09-11
- [52] PROCOLOMBIA: Análisis de Análisis de exportaciones colombianas. Abril 2016. (2016)
- [53] PRODUCCIÓN, Índice De ; IPI, Industrial: Boletín técnico Índice de Producción Industrial (IPI) Boletín técnico. (2018), p. 1–15
- [54] PVD PRODUCTS: *Sputtering Targets*. <http://www.pvdproducts.com/sputtering-systems/sputtering-targets>. – Consultado en 2018-07-02
- [55] RANCOURT, James D.: *Optical thin films: user handbook*. SPIE Optical Engineering Press, 1996. – ISBN 978-0-8194-2285-9
- [56] RANGO, Termopar ; ECON, Estable R. ; RANGO, Termistor ; RANGO, P R T.: Cómo elegir un equipo de calibración de termopares.
- [57] RODRÍGUEZ, Edwin Jhovany A. ; OCAMPO, Jose William M. ; ORTEGA, Carlos Armando S.: Medidores de deformacion por resistencia: galgas extensiométricas. En: *Rev. Scientia et Technica* 1 (2007), Nr. 34, p. 7–11. – ISSN 0122–1701
- [58] SAW, Wire: Silicon wafer production and specifications.
- [59] SEMICORE: SC450SputteringSystem. , Nr. 925, p. 8201–8202
- [60] SENSORICS: *HABLEMOS DE LAS GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS ~ SENSORICS*. <http://www.sensoricx.com/2018/05/hablemos-de-las-galgas-extensiometricas.html>. – Consultado en 2018-08-13
- [61] SHAKEEL, Muhammad ; KHAN, Wasim A. ; RAHMAN, Khalid: Fabrication of cost effective and high sensitivity resistive strain gauge using DIW technique. En: *Sensors y Actuators: A. Physical* (2017), p. 123. – ISSN 0924–4247
- [62] STEVENS, Nathan: Spin Coater. (2014), p. 1–4. ISBN 0615188060
- [63] TECHNOLOGY, Korvus: Korvus Technology Fission. 44, Nr. 0
- [64] THERMOCOUPLES, M G O I.: BARCOPAC MgO Insulated Thermocouples BARCOPAC. , p. 1–3

-
- [65] TRIOLA, Mario F. ; PINEDA AYALA, Leticia E.: *Estadística*. México Pearson Educación, 2013, 2013 (Actualización tecnológica). – ISBN 9786073217682
- [66] TROCHIM, William: Sampling Techniques. (1930), p. 1–12
- [67] VASCONCELOS, I. B. ; SANTOS, E. J. P.: Planar RTD Fabrication and Characterization. En: *PROCEEDINGS- EELCTROCHEMICAL SOCIETY PV; NO 8 2005*, 2005, p. 349
- [68] WILSON, Farris H. ; FAILS, Cuyahega ; TIRE, The G. ; COMPANY, Rubber: United States Patent TO ” 1C6. (1964), p. 1–3
- [69] WISEGEEK: *What is a Sputtering Target?* <https://www.wisegeek.com/what-is-a-sputtering-target.htm#>. – Consultado en 2018-07-02
- [70] YAMAZAKI, T. ; YOSHINO, Y. ; YOSHIKAWA, T. ; YAMABUCHI, T. ; TERAYAMA, K. ; SHIMAZAKI, T. ; MIZUGUCHI, T.: Pattern Formation of Sputtered Films by Deposition through Mask. En: *JAPANESE JOURNAL OF APPLIED PHYSICS PART 1 REGULAR PAPERS SHORT NOTES AND REVIEW PAPERS* (1996), Nr. 9//A, p. 4755
- [71] ZRIBI, Aymen ; BARTHÈS, Magali ; BÉGOT, Sylvie ; LANZETTA, Franç Ois ; RAUCH, Jean Y. ; MOUTARLIER, Virginie: Design, fabrication and characterization of thin film resistances for heat flux sensing application. En: *Sensors and Actuators A* 245 (2016), p. 26–39
- [72] ZULUAGA VIDAL, Diego ; CASTILLO MÉNDEZ, Robinson ; MAYORQUÍN BEJARANO, Deivy: *Prospectiva tecnológica de la industria electro electrónica de Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico de la Industria electro Electrónica y Tic, 2015, 2015. – ISBN 9789585869110