



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO QUE
MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA
UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA**

Fredy Leonel Ramos Sanic

Asesorado por el Ing. Guillermo Antonio Puente Romero

Guatemala, septiembre de 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO QUE
MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA
UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

FREDY LEONEL RAMOS SANIC

ASESORADO POR EL ING. GUILLERMO ANTONIO PUENTE ROMERO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO ELECTRÓNICO

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2014

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Ingrid Salomé Rodríguez de Loukota
EXAMINADOR	Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
EXAMINADOR	Ing. Otto Fernando Andrino González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO QUE MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 18 de junio de 2013.



Fredy Leonel Ramos Sanic

Guatemala, 14 de abril de 2014.

Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador de Área de Electrónica
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Ingeniero Guzmán:

Por este medio me permito dar aprobación al Trabajo de Graduación titulado: "DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DISPOSITIVO ELECTRONICO QUE MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA UNA SILLA DE RUEDAS ELECTRICA", desarrollado por el estudiante Fredy Leonel Ramos Sanic con carné No. 2004-30606, ya que considero que cumple con los requisitos establecidos, por lo que el autor y mi persona somos responsables del contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarlo.

Atentamente,



Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
ASESOR
Colegiado 5898

Guillermo A. Puente R.
INGENIERO ELECTRONICO
COL. # 5898



Ref. EIME 16. 2014
Guatemala, 28 de ABRIL 2014.

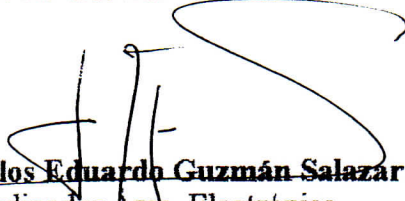
Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO QUE MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA, del estudiante Fredy Leonel Ramos Sanic, que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Carlos Eduardo Guzmán Salazar
Coordinador Área Electrónica



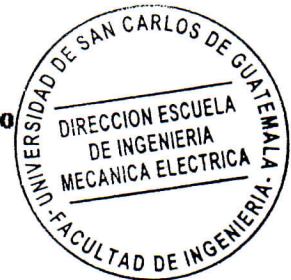
SFO



REF. EIME 16. 2014.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; FREDY LEONEL RAMOS SANIC titulado: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO ELECTRÓNICO QUE MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA, procede a la autorización del mismo.


Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



GUATEMALA, 6 DE MAYO 2014.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al trabajo de graduación titulado: **DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN DISPOSITIVO ELECTRONICO QUE MEDIANTE EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO CONTROLA UNA SILLA DE RUEDAS ELECTRICA**, presentado por el estudiante universitario **Fredy Leonel Ramos Sanic** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE

Ing. Murphy Olympto Paiz Ramos
Decano



Guatemala, septiembre de 2014

AGRADECIMIENTOS A:

La naturaleza

Porque permitió que escudriñáramos en sus entrañas para extraer de ella el conocimiento y la ciencia. Y aún cuando nuestra descripción resulta insignificante, permitió que modeláramos su infinita belleza en forma de ecuación.

Mi madre

Felisa Sanic

Mujer que sin haberle sido suficiente darme la vida, decidió incluso darme la suya propia, para que durante mi camino hasta este momento jamás tuviere un tropiezo. Gracias madre mía por enseñarme a sacrificar todo por amor, a darlo todo por simple convicción.

Mi padre

Jesus Ramos

Aquel hombre que sin obligación alguna decidió sacrificar parte de su vida para darme todo cuanto quise y necesité, quien me enseñó que el conocimiento no se encuentra confinado en cuatro paredes, sino que fluye con el viento, que es parte inherente de quienes le buscamos. Gracias padre mío por todas tus enseñanzas, ya quisiera yo algún día poder ser la diezmilésima parte del ser humano que eres.

Mis hermanos

Carlos, quien más que un hermano fue como un padre para mí, a quien no bastándole dar cuanto le fue posible, siempre pudo dar aquello que parecía ser imposible, tal cual el reflejo del hombre y la mujer que nos dieron el regalo de la vida.

Juan, Oscar, Raúl, María, Julia, cada uno de ellos me acompañó en alguna etapa de mi vida, nunca me negaron nada, incluso me permitieron vivir 6 vidas en una sola, ellos construyeron cada centímetro de lo que soy.

Mi musa

Sonrisa increíble, una mirada que te obliga a ser mejor cada día, aquella que con su magnífica existencia logró que de mi alma inerte brotara la vida, que aún cuando solamente puedo acariciarle en la brisa nocturna, el aroma de su perfume estremece todo mi ser. Porque aún cuando la belleza de las estrellas es infinita, la inspiración no viene de ellas: Jamileth Sarceño.

La tricentenario USAC

Alma máter, que entre sus paredes reúne a aquellos que aman el conocimiento y le buscan con toda convicción, aquellos que desean con todo su ser conocer el rostro de la naturaleza, catedráticos, estudiantes, compañeros.

Universidad de San Carlos de Guatemala, grande entre las del mundo, me enseñaste algo que va impregnado en mi ser: "Id y enseñad a todos".

1.2.4.	Mecánica de las articulaciones de la cabeza y del cuello	37
1.2.4.1.	Equilibrio de la cabeza sobre la columna vertebral.....	37
1.2.4.2.	Movimientos de la cabeza sobre la columna vertebral.....	40
1.3.	Cinemática	44
1.3.1.	Rango de movimiento	45
1.3.1.1.	Cinemática anormal	47
1.3.1.2.	Estabilidad espinal	48
1.3.1.3.	Complejo occipito–atlantoaxial	49
1.3.1.4.	Columna cervical subaxial.....	50
1.4.	Cargas máximas y mecanismos de lesión del cuello	51
1.4.1.	Respuesta mecánica del cuello	52
1.4.2.	Tolerancia de la cabeza	53
2.	SENSORES MICROELECTROMECÁNICOS MEMS	57
2.1.	Materiales.....	62
2.1.1.	Silicio	63
2.1.1.1.	Método Czochralski	64
2.1.1.2.	Método de Zona Flotante	65
2.1.2.	Cuarzo y vidrio	71
2.2.	Técnicas de fabricación.....	72
2.2.1.	Deposición.....	73
2.2.1.1.	Crecimiento térmico	73
2.2.1.2.	Deposición física de vapor	74
2.2.1.3.	Deposición química de vapor	79
2.2.2.	Litografía	83
2.2.2.1.	Litografía de doble cara.....	85

	2.2.2.2.	Litografía de escala de grises	86
	2.2.3.	Grabado.....	88
	2.2.4.	Micromaquinado de superficie	90
	2.2.5.	LIGA	92
2.3.		Fundamentos para la fabricación de microsensores mecánicos	95
	2.3.1.	Piezoresistividad.....	96
	2.3.2.	Piezoelectricidad.....	100
	2.3.3.	Capacitancia.....	104
	2.3.4.	Resonancia.....	108
	2.3.4.1.	Excitación o inducción de la vibración y mecanismos de detección	110
2.4.		El acelerómetro	113
	2.4.1.	Principio de funcionamiento.....	113
	2.4.1.1.	Acelerómetro de lazo abierto	117
	2.4.1.2.	Acelerómetro de lazo cerrado.....	118
	2.4.2.	Tipos de acelerómetros	119
	2.4.2.1.	Acelerómetros piezoresistivos	120
	2.4.2.2.	Acelerómetros capacitivos	121
	2.4.2.3.	Acelerómetro piezoeléctrico.....	123
	2.4.2.4.	Acelerómetros resonantes	124
2.5.		El giroscopio	125
	2.5.1.	Principio de operación	125
	2.5.2.	Giroscopio mono eje.....	130
	2.5.3.	Giroscopios de doble eje	134
	2.5.4.	Mejoras en los sensores inerciales.....	136

3.	ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS Y COMPONENTES INVOLUCRADOS EN EL DESARROLLO DEL DISPOSITIVO	139
3.1.	El <i>joystick</i> o palanca de mando	139
3.2.	El potenciómetro digital	142
3.2.1.	El potenciómetro digital AD5220	143
3.3.	El puerto analógico del microcontrolador PIC12F683	146
3.4.	El acelerómetro MMA7361A	149
3.4.1.	Aceleración en función de la inclinación.....	152
3.4.2.	Transformación de la aceleración a una señal digital.....	159
3.4.3.	El movimiento y su acondicionamiento para el control.....	161
3.5.	El giroscopio LPY550	162
3.5.1.	Detección del movimiento rotacional del cuello.....	164
3.5.2.	Transformación del giro a una señal digital.....	165
3.5.3.	El giro y su acondicionamiento para el control	167
4.	CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO	171
4.1.	Electrónica del dispositivo	171
4.1.1.	Configuración de los sensores inerciales	173
4.1.2.	Acondicionador de señales	174
4.1.2.1.	Configuración del micro PIC12F683...	175
4.1.2.2.	Programación del dispositivo.....	179
4.1.3.	Interface para conexión en paralelo con el <i>joystick</i>	192
4.1.3.1.	Alimentación y conexión del dispositivo.....	195

4.2.	Mecánica del dispositivo.....	197
4.2.1.	Construcción de la estructura de soporte	199
4.2.2.	Configuración del vehículo de prueba	199
CONCLUSIONES		205
RECOMENDACIONES.....		207
BIBLIOGRAFÍA.....		209
APÉNDICES		211

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Huesos del cráneo y la cara.....	4
2.	La mandíbula o maxilar inferior.....	5
3.	Posición de las vértebras cervicales.....	6
4.	Vista superior y lateral de una vértebra.....	7
5.	Detalle de los músculos faciales.....	10
6.	Músculos de la cabeza; músculos masticadores.....	11
7.	Grupo muscular pterigoideo.....	12
8.	Grupo muscular profundo medio.....	14
9.	Grupo muscular lateral.....	15
10.	Grupo muscular infrahioideo.....	16
11.	Músculos suprahioideos.....	17
12.	Grupo muscular ánterolateral.....	18
13.	Grupo muscular suprafacial.....	19
14.	Plano profundo.....	21
15.	Músculos semiespinosos y longísimos.....	22
16.	Músculo esplenio y elevador de la escapula.....	23
17.	Plano superficial.....	24
18.	Tipos de esfuerzos aplicados a un hueso.....	26
19.	Diagrama esfuerzo-deformación para materiales frágiles y dúctiles ...	29
20.	Estructura de un disco intervertebral.....	32
21.	Diagrama esfuerzo-deformación para materiales visco-elásticos en tensión.....	33

22.	Posición del centro de gravedad de la cabeza con respecto al eje de rotación ubicado en los cóndilos	38
23.	Ángulo máximo de flexión y extensión.....	41
24.	Ángulo máximo de rotación lateral.....	42
25.	Ángulo de rotación de la cabeza.....	43
26.	Ilustración de los seis grados de libertad que posee una vértebra	46
27.	Desplazamiento de C1 sobre C2	50
28.	Respuesta del cuello en flexión	51
29.	Respuesta del cuello en extensión	52
30.	Curva de Tolerancia de Wayne State	54
31.	Valores de HIC <i>versus</i> riesgo de muerte	55
32.	Comparación de escalas de los MEMS con materiales biológicos (polen y glóbulos rojos).....	61
33.	Robot móvil creado con tecnología MEMS, incluye motor, control y su fuente de poder	61
34.	Arreglo de engranajes planetarios construido con tecnología MEMS...	62
35.	Estructura del cristal de silicio.....	66
36.	Índices de Miller y planos de las estructuras cristalinas.....	67
37.	Cortes estandarizados en las obleas de silicio	69
38.	Esquema de un evaporador.....	75
39.	Distintas disposiciones de los cristales de silicio	80
40.	Crecimiento de barras de forma selectiva.....	82
41.	Etapas de la litografía	84
42.	Curva gama y su escala de grises equivalente.....	86
43.	Microlentes fabricados con litografía en escala de grises	87
44.	Secuencia del proceso de grabado húmedo en silicio [1 1 1].....	89
45.	Secuencia de micromaquinado de superficie	90
46.	Proceso de micromaquinado de varias capas	91
47.	Etapas del proceso LIGA	93

48.	Mecanismo complejo fabricado utilizando el proceso LIGA	94
49.	Galga extensiométrica típica	95
50.	Ilustración de la deformación que sufre un objeto según su relación de Poisson	97
51.	Ilustración del efecto piezoeléctrico y su eje de polarización	100
52.	Modelo equivalente de un material piezoeléctrico.....	102
53.	Posibles configuraciones para un capacitor de placas planas paralelas.....	106
54.	Capacitor diferencial.....	107
55.	Diagrama en bloques de un autoresonador	109
56.	Fotomicrografía de un acelerómetro de dos ejes coloreado artificialmente	112
57.	Modelo mecánico de un acelerómetro	116
58.	Diagrama en bloques de un acelerómetro de lazo abierto	118
59.	Estructura de la masa de prueba de un acelerómetro capacitivo.....	121
60.	Estructura principal de un acelerómetro piezoeléctrico fabricado utilizando deposición por serigrafía.....	123
61.	Efecto Coriolis	126
62.	Modelo de un giroscopio resonante	127
63.	Giroscopio montado sobre una estructura de doble cardán.....	131
64.	Giroscopio fabricado por medio de micromaquinado de superficie....	132
65.	Giroscopio de ejes desacoplados	134
66.	Modelo conceptual del giroscopio de dos ejes.....	135
67.	Prototipo de disco de levitación que involucra un acelerómetro y un giroscopio.....	137
68.	Palanca de mando	140
69.	Secuencia de cuadros de video del accionamiento de un <i>joystick</i>	141
70.	Potenciómetro digital AD5220.....	143
71.	Diagrama en bloques del potenciómetro digital AD5220.....	144

72.	Características eléctricas del AD5520	145
73.	Diagrama en bloques del convertidor analógico-digital.....	147
74.	Módulo basado en el acelerómetro de tres ejes MMA7361A.....	149
75.	Diagrama en bloques simplificado	150
76.	Principio de funcionamiento del acelerómetro MMA7631A.....	151
77.	Sensibilidades programables del MMA7631A	152
78.	Diagrama de cuerpo libre del acelerómetro orientado en el eje y.....	154
79.	Gráfica de datos teóricos del acelerómetro, voltaje <i>versus</i> ángulo	156
80.	Comparación del comportamiento teórico y observado del acelerómetro	158
81.	Diagrama en bloque del comportamiento del sistema de detección ...	160
82.	Cambio de resistencia en función de los pulsos de reloj, en estado ascendente	161
83.	El giroscopio de dos ejes LPY550	163
84.	Diagrama de flujo del funcionamiento esperado delgiroscopio.....	168
85.	Comportamiento del AD5520 emulando la acción de empujar la palanca a la izquierda y soltarla.....	169
86.	Diagrama en bloques del sistema.....	172
87.	Configuración de las entradas de ambos módulos	173
88.	Bloque equivalente del sistema de detección de movimiento de la cabeza y el cuello	174
89.	Diagrama esquemático del acondicionador de señales.....	175
90.	Acondicionador de señales armado.....	176
91.	Diagrama de flujo del microcontrolador B.....	177
92.	Diagrama de flujo del programa del microcontrolador A.....	178
93.	Rampa de resistencia <i>versus</i> posición del <i>joystick</i>	180
94.	Diagrama de estados para avance y retroceso	181
95.	Diagrama de estados del acondicionador de señales del giroscopio..	188
96.	Comportamiento del potenciómetro al cambiar de estado.....	190

97.	Diagrama esquemático del bloque del selector de mando.....	193
98.	Bloque I/O del selector	194
99.	Conexión del DCMCC eliminando el <i>joystick</i>	195
100.	Conexión de ambos controladores al selector de mandos.....	196
101.	Diadema para la sujeción de los sensores a la cabeza.....	198
102.	Vista superior del vehículo de pruebas	200
103.	Detalle del control y vista frontal del vehículo de pruebas.....	201
104.	Diagrama esquemático de la tarjeta de control	202
105.	Diagrama esquemático de un puente H.....	203

TABLAS

I.	Eventos clave para la evolución de la microelectromecánica	60
II.	Propiedades del silicio cristalino	70
III.	Propiedades mecánicas del vidrio y el pírex	71
IV.	Materiales piezoeléctricos más comunes.....	103
V.	Pares excitación – detección de fenómenos utilizados en auto resonadores	111
VI.	Listado de puertos analógicos del PIC12F683.....	146
VII.	Voltajes y su respectivo valor decimal, luego de la conversión analógica a digital	148
VIII.	Valores de voltaje de salida de cualquiera de los ejes de salida en presencia de la gravedad.....	153
IX.	Valores teóricos de aceleración y voltaje	155
X.	Señales digitales correspondientes a los voltajes teóricos y medidos en función de la inclinación.....	157
XI.	Valores observados en posición cuasi estática.....	164
XII.	Valores picos observados durante el giro del conjunto cuello-cabeza	166

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
g	Aceleración debida a la gravedad
Å	Angstrom
Δ	Cambio
C	Capacitancia
cm	Centímetro
k	Constante de Boltzman
ε	Deformación unitaria
°	Degradianes
eV	Electrónvolt
=	Igual a
>	Mayor que
<	Menor que
σ	Esfuerzo
F_x	Fuerza dirigida sobre el eje x
F_y	Fuerza dirigida sobre el eje y
F_z	Fuerza dirigida sobre el eje z
GN	Giganewton
GPa	Gigapascales
°C	Grados Celsius
g	Gramo
Hz	Hertz
J	Joule

K	Kelvin
kN	Kilonewton
kΩ	Kiloohm
kg	Kilogramo
kHz	Kilohertz
MN	Meganewton
Mpa	Megapascales
μF	Microfaradio
μm	Micrómetros
μs	Microsegundos
mF	Milifaradio
mV	Milivoltios
mm	Milímetros
ms	Milisegundos
E	Módulo de elasticidad
ν	Módulo de Poisson
nF	Nano faradio
nm	Nanómetros
N-m	Newton por metro
Ω	Ohmio
Pa	Pascal
μ0	Permeabilidad del vacio
ε0	Permitividad del vacio
εr	Permitividad relativa
pF	Picofaradio
%	Porcentaje
x´	Primera derivada de x
+/-	Puede ser tanto positivo como negativo

R	Resistencia
ρ	Resistividad
x''	Segunda derivada de x
G	Unidad de gravedad (9,81 m/s ²)
ω	Velocidad angular
V	Voltio
W	Watt

GLOSARIO

Acentrosimétrico	Se refiere a un objeto que no posee simetría con respecto a su eje o punto central.
Anisotrópico	Es la característica de un objeto que dicta que sus propiedades no son las mismas en todas las direcciones.
Antiresonante	Fenómeno que tiene lugar cuando la amplitud máxima de la onda mecánica es cero.
Apófisis	Parte saliente de un hueso, que sirve para facilitar su articulación con otro.
Bitubercular	Que posee dos tubérculos.
Borosilicato	También llamado silicato de boro, es un material componente de los vidrios, el cual se utiliza extensamente por sus excelentes propiedades ópticas y mecánicas.
Imbricación	Superposición parcial de objetos similares, imitando la disposición de las escamas de los peces.
<i>In vitro</i>	Técnica para realizar un experimento en condiciones controladas.

<i>In vivo</i>	Se refiere a un experimento realizado directamente sobre un organismo o en su estado natural.
Inervado	Que posee terminaciones nerviosas.
Isis	Software para el diseño esquemático electrónico, forma parte del paquete de software Proteus.
Isotropía	Característica de un objeto que presenta las mismas propiedades en todas las direcciones.
Ligamentario	Relativo a los ligamentos.
Micrones	Se refiere al micrómetro.
Simiente	Semilla.
Sinartrosis	Articulación sin o con poca capacidad de movimiento.
Sincrotrón	Acelerador de partículas, que confina a las mismas en una trayectoria cerrada
Sinovial	Se refiere a las articulaciones que se pueden mover con total libertad o al líquido que lubrifica las mismas.
Subluxación	Desplazamiento de una articulación por estiramiento de tejidos blandos.

Tensil	Relativo a la fuerza de tensión.
Trabécula	Estructura en forma de red que constituye al hueso esponjoso.
Trabecular	Hueso trabecular, hueso esponjoso.
Tunelización	Corriente de tunelización, es la corriente que se presenta debido al efecto túnel.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consiste en la descripción del desarrollo de un dispositivo capaz de detectar el movimiento de la cabeza y el cuello de una persona, con el objetivo de controlar el movimiento de una silla de ruedas eléctrica. No se trata del diseño en si de una silla de ruedas, sino más bien de una modificación al control nativo que posee una silla de ruedas eléctrica convencional.

Se utiliza un acelerómetro y un giroscopio para la captura del movimiento del usuario, el acelerómetro es utilizado para determinar si el usuario desea moverse hacia adelante o hacia atrás y el giroscopio se utiliza para determinar la dirección de giro del vehículo. Cada uno de estos sensores en combinación con un microcontrolador y un potenciómetro digital emulan el comportamiento de una palanca de mando convencional.

En el capítulo uno se inicia conociendo la biomecánica del cuello y de la cabeza para determinar las capacidades y las limitaciones del cuerpo humano, con el fin de determinar la adaptabilidad del mismo al dispositivo en cuestión y descartar la posibilidad de lesiones debido al uso del dispositivo, se indaga en los rangos máximos de movimiento de las articulaciones del cuello, esto para conocer el comportamiento de la cabeza y las posiciones que puede alcanzar como resultado del movimiento de las articulaciones del cuello.

En el capítulo dos se profundiza en el estudio de los sistemas microelectromecánicos, que son la base de la tecnología de manufactura de los sensores a utilizar, principios de funcionamiento y distintos principios de transducción son estudiados con el objeto de determinar el alcance de cada uno de los sensores. Los sensores utilizados son comerciales y de bajo costo para permitir el fácil acceso a los mismos.

En los capítulos tres y cuatro se presente el dispositivo construido y funcional, acompañado de un análisis de cada uno de los componentes que conforman el sistema. Se pueden encontrar diagramas esquemáticos y la programación de cada uno de los microcontroladores instalados, con la información presente, se espera que cualquier persona con conocimientos de electrónica y programación sea capaz de construir y poner en marcha el dispositivo.

Así también, gracias al análisis y explicación que se realiza de las partes del sistema, se espera que alguien con conocimientos especializados en el área de electrónica sea capaz de realizar modificaciones y mejoras en el sistema que acá se presenta.

OBJETIVOS

General

Desarrollar, utilizando sensores de aceleración y giro, un sistema de bajo costo para el control de avance y dirección de una silla de ruedas eléctrica, como alternativa o para trabajar en paralelo con el mando convencional de la silla de ruedas.

Específicos

1. Conocer la biomecánica de la cabeza y el cuello, considerando capacidades y limitaciones.
2. Realizar un estudio acerca de la construcción y principio de funcionamiento de los sensores microelectromecánicos de giro y aceleración.
3. Analizar el funcionamiento de los sistemas y componentes involucrados en el desarrollo del dispositivo.
4. Construir un dispositivo que mediante el movimiento de la cabeza y el cuello controle una silla de ruedas eléctrica.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, un área en donde el uso de la tecnología puede transformar por completo el estilo de vida de las personas, es en la rehabilitación y en la búsqueda de herramientas para la reincorporación a la sociedad activa de las personas que por cualquier motivo padezcan de alguna incapacidad motriz o de percepción. En el caso específico de esta investigación, se desea contribuir a facilitar la movilización y la realización de actividades laborales de las personas que se conducen en silla de ruedas.

Esto es importante, pues existe un problema derivado de la manipulación de la silla de ruedas, ya que es necesario que el usuario utilice ambas manos para impulsarse en las sillas no motorizadas y en el caso de las que se encuentran motorizadas, se requiere del uso de las manos para llevar a cabo el control del vehículo. Esta necesidad del uso de las manos, dificulta la posibilidad de realizar actividades que demanden el uso de las mismas mientras el usuario se traslada.

Se desea entonces aprovechar el movimiento de otra parte del cuerpo para relevarle el control a las manos, permitiendo con esto tener libertad total en las manos para manipular objetos y realizar cualquier actividad que demande el uso de ambos brazos y que estas no se vean entorpecidas por la necesidad de la manipulación del control de la silla de ruedas. Gracias al avance tecnológico en la última década en la micromanufactura, es posible utilizar sensores inerciales para la captura del movimiento de la cabeza del usuario y utilizar esta información para el control de la silla de ruedas.

Las articulaciones especializadas que unen la cabeza y el cuello, son capaces de proporcionarle a la cabeza un espacio de trabajo amplio, por lo que es posible utilizar el movimiento de la cabeza para simular el movimiento de un *joystick* o palanca de mando. Es importante el estudio de la biomecánica de la columna vertebral cervical para determinar los límites del movimiento del cuello y utilizar esta información para la calibración precisa de la detección de los sensores, reduciendo el riesgo de lesiones cervicales y logrando un control preciso sobre el vehículo.

1. BIOMECÁNICA DE LA CABEZA Y EL CUELLO

Las capacidades del ser humano se encuentran definidas por las características propias de los órganos y sistemas que lo componen, es posible mejorar y llevar más allá los límites del ser humano conociendo a profundidad las propiedades físicas, mecánicas y biológicas de cada uno de los sistemas de los cuales se compone el cuerpo humano.

1.1. Biomecánica

Se considera como una rama de la bioingeniería y la ingeniería biomédica, combinadas con el objetivo de conseguir una mejor comprensión de la relación entre los procesos biológicos y mecánicos que se dan en las estructuras anatómicas de los seres vivos. La bioingeniería es un campo interdisciplinar en el que los principios y métodos de la ingeniería, las ciencias básicas y la tecnología se aplican para diseñar, evaluar y manufacturar equipo para su uso en medicina y comprender, definir y solventar problemas en la fisiología y la biología. La bioingeniería es una de las distintas áreas de especialización que pertenecen al campo general de la ingeniería biomédica.

La biomecánica utiliza las aplicaciones de la mecánica clásica para el análisis de los sistemas biológicos y fisiológicos. Los distintos aspectos de la biomecánica utilizan diferentes partes de la mecánica aplicada. Por ejemplo, los principios de la estática han sido aplicados para analizar la magnitud y la naturaleza de las fuerzas implicadas en varias articulaciones y músculos del sistema músculo-esquelético.

Los principios de la dinámica han sido utilizados para la descripción del movimiento, el análisis de la marcha, el análisis del movimiento segmentario y tienen muchas aplicaciones en la mecánica deportiva. La mecánica de los sólidos proporciona las herramientas necesarias para desarrollar las ecuaciones constituyentes del campo de los sistemas biológicos, que son usadas para evaluar su comportamiento funcional bajo diferentes situaciones de carga. Los principios de la mecánica de fluidos han sido utilizados para investigar el flujo sanguíneo en el sistema circulatorio, el flujo aéreo en los pulmones y la lubricación articular.

La investigación en biomecánica tiene como objetivo mejorar nuestro conocimiento de una estructura muy compleja: el cuerpo humano. Las actividades de investigación en biomecánica pueden ser divididas en tres áreas: estudios experimentales, análisis de modelos e investigación aplicada.

Los estudios experimentales en biomecánica se hacen para determinar las propiedades mecánicas de los materiales biológicos, incluyendo el hueso, cartílago, músculo, tendón, ligamento, piel y sangre como un todo o como las partes que lo constituyen. Los estudios teóricos que implican análisis de modelos matemáticos han sido también un importante componente de investigación en la biomecánica. En general, puede usarse un modelo basado en los resultados experimentales para predecir el efecto de factores ambientales y operacionales, sin recurrir a los experimentos de laboratorio.

La investigación aplicada en biomecánica es el uso de conocimiento científico para beneficiar a los seres humanos. Se sabe que las lesiones y las enfermedades músculo-esqueléticas conforman los riesgos ocupacionales primarios en los países industrializados.

Estas lesiones pueden ser combatidas mediante el aprendizaje de cómo el sistema músculo-esquelético se ajusta a las condiciones laborales comunes y mediante el desarrollo de pautas para asegurar que el trabajo manual se ajusta más íntimamente a las limitaciones físicas del cuerpo humano y a los movimientos naturales del cuerpo.

1.2. Anatomía de la cabeza y el cuello

Se infiere en la anatomía de la cabeza y el cuello, pues se desea conocer las propiedades de este conjunto, para determinar sus límites y tener las consideraciones apropiadas para el diseño de un mecanismo de captura de sus movimientos.

1.2.1. Esqueleto de la cabeza y el cuello

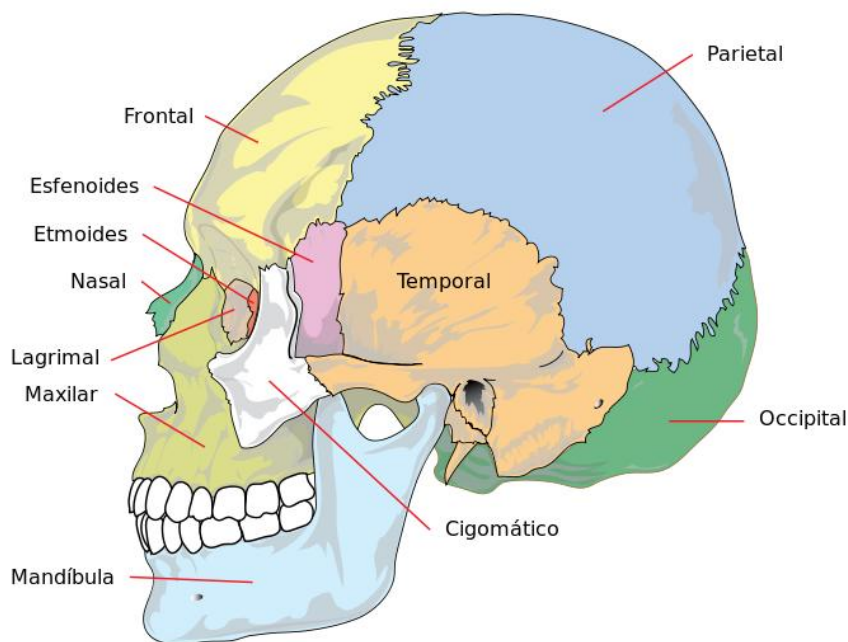
Se describen de forma independiente las características principales de la cabeza y el cuello, así como, sus capacidades máximas de movimiento. Toda esta información es necesaria para obtener un modelo de los grados de libertad de movimiento que posee el conjunto del cuello y la cabeza.

1.2.1.1. Esqueleto de la cabeza

El esqueleto de la cabeza se divide en dos partes: el cráneo y la cara, el cráneo es una caja ósea que contiene al encéfalo. Se distingue una porción superior llamada calvaria o bóveda y una porción inferior plana que se denomina la base. El cráneo es una caja ósea de forma ovoide con un extremo posterior grueso y una porción inferior aplanada, en promedio su capacidad es de 1 400 a 1 500 cm³ en una persona adulta.

El cráneo, a pesar de su aparente rigidez, constituye un conjunto elástico, ligeramente deformable por acción de los golpes y presiones habituales. Sin embargo, la calvaria y la base del cráneo no ofrecen la misma resistencia a los traumatismos. La base es la parte más frágil, ya que sus constituyentes son de espesor diferente (unos de tejido óseo esponjoso y otros de tejido óseo compacto) y esta excavada por cavidades o canales mal ajustados, que dejan entre sí mucha discontinuidad.

Figura 1. **Huesos del cráneo y la cara**



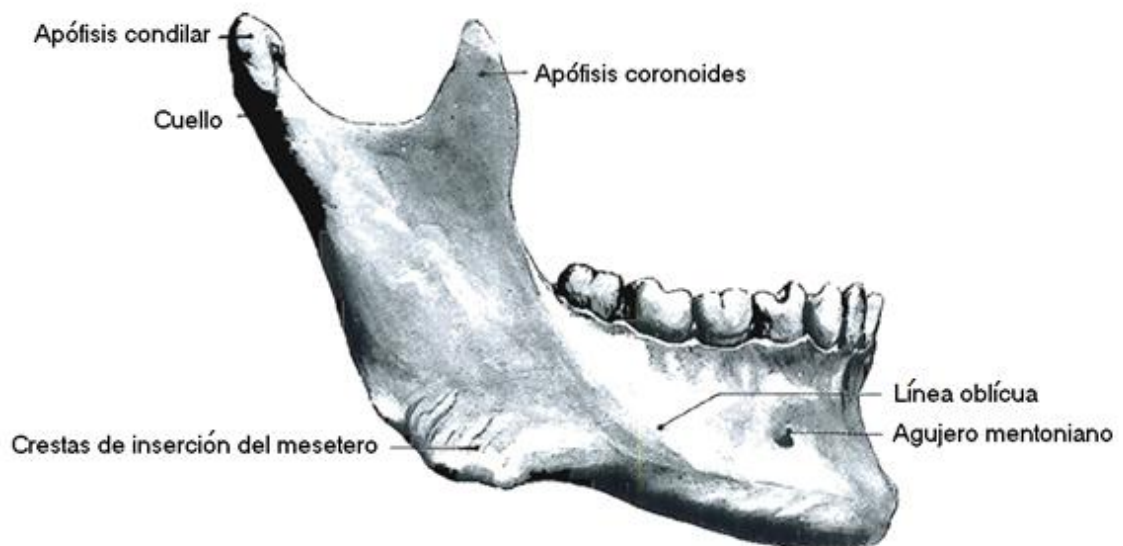
Fuente: [www.wikipedia.org/el cráneo](http://www.wikipedia.org/el%20cr%C3%A1neo). [Consulta: febrero de 2014].

La calvaria, por el contrario, es más homogénea. La imbricación y la soldadura de sus diferentes piezas óseas aumenta la solides de su conjunto. Calvaria y base están unidas y reforzadas por engrosamientos denominados contrafuertes en la base, arcos en la calvaria y pilares en los puntos de unión.

El cráneo se encuentra constituido de la siguiente manera: hueso frontal, hueso etmoides, hueso esfenoides, hueso temporal, hueso occipital, hueso parietal y huesos sutúrales, se muestra un detalle del cráneo en la figura 1.

La cara es un macizo óseo suspendido de la mitad anterior de la base del cráneo, limita con el cráneo las cavidades ocupadas por la mayor parte de los órganos de los sentidos. El esqueleto de la cara está situado inferiormente a la mitad anterior del cráneo. Se divide en dos partes principales: la mandíbula superior y la mandíbula inferior.

Figura 2. **La mandíbula o maxilar inferior**

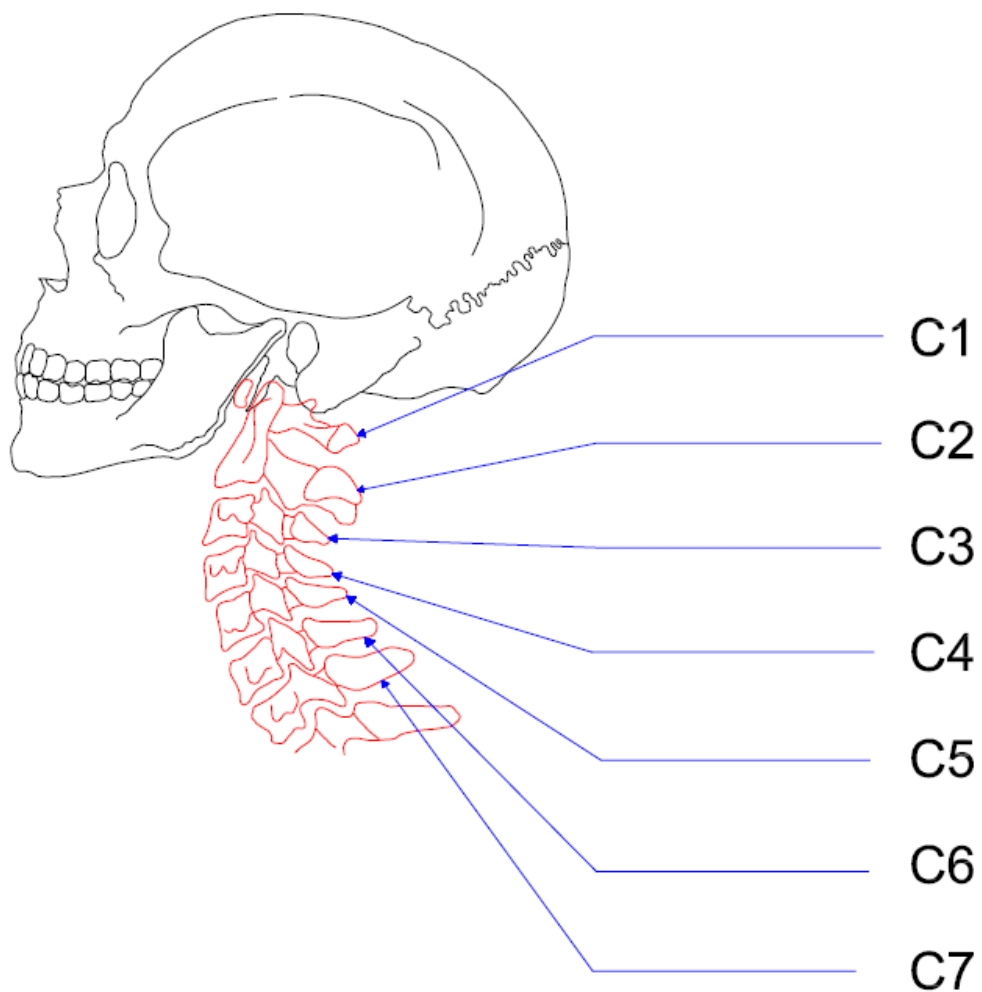


Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 112.

La mandíbula superior está formada por 13 huesos, de los cuales únicamente el vómer es medio e impar, los restantes son pares y laterales, situados simétricamente a cada lado de la línea media.

Estos huesos son los maxilares, los huesos lagrimales, los huesos palatinos, los cornetes nasales inferiores, los huesos nasales y los huesos cigomáticos. La mandíbula inferior está constituida por un solo hueso, la mandíbula, que se muestra en la figura 2.

Figura 3. **Posición de las vértebras cervicales**

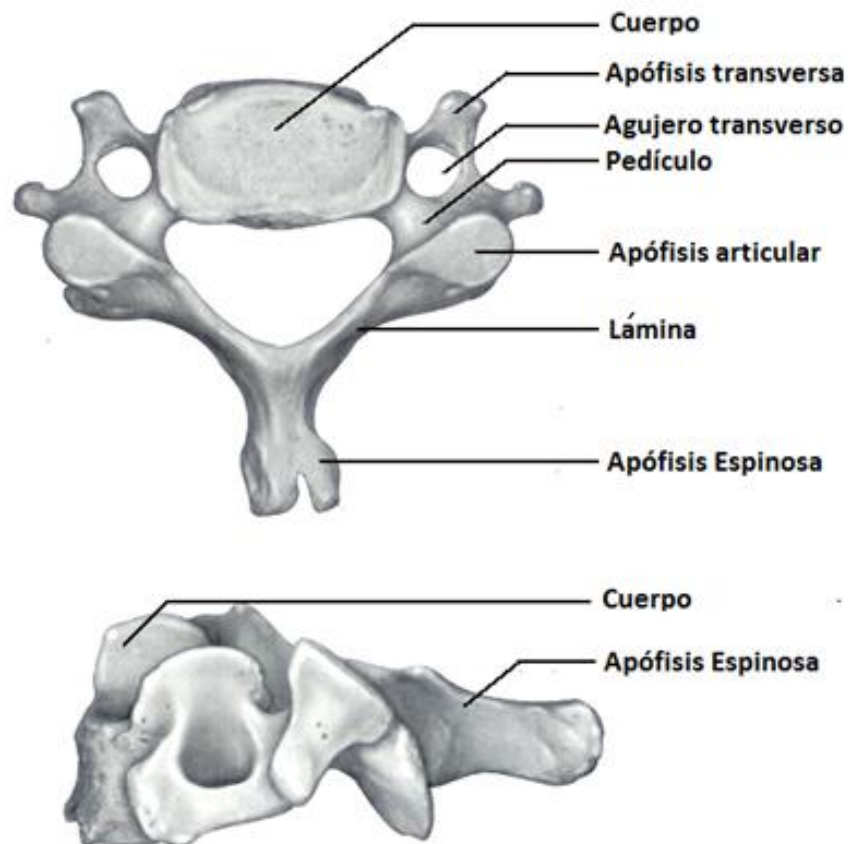


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2014.

1.2.1.2. Esqueleto del cuello

La columna vertebral cervical está compuesta de siete vértebras superpuestas y articuladas entre sí, se designan con los nombres de primera "C1", segunda "C2", tercera "C3" y así sucesivamente, enumerándolas de superior a inferior. Tal como puede apreciarse en la figura 3.

Figura 4. Vista superior y lateral de una vértebra



Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 139.

Cada vértebra cervical comprende un cuerpo, dos pedículos, dos láminas, una apófisis espinosa, cuatro apófisis articulares, dos apófisis transversas y un agujero vertebral, a continuación se encuentra una descripción de cada una de las partes de la vértebra, así también se puede apreciar en la figura 4 la estructura de la misma.

- **Cuerpo:** es alargado transversalmente y más grueso anterior que posteriormente, presenta seis caras.
- **Pedículos:** se implantan en la cara posterior de las caras laterales del cuerpo, cerca de la cara superior y se extienden hasta la apófisis articular. Se denomina agujero intervertebral al orificio situado entre los pedículos de dos vértebras vecinas.
- **Apófisis articulares:** las apófisis articulares forman una columna ósea vertical, unida al cuerpo por el pedículo y con las caras superior e inferior talladas en bisel. Estas caras son planas y articulares: la superior está orientada posterior y superiormente y la inferior anterior e inferiormente.
- **Apófisis transversas:** cada una de ellas está formada por la unión de dos raíces, una anterior y otra posterior. La raíz anterior se implanta en la cara lateral del cuerpo, anteriormente al pedículo; la raíz posterior se implanta en el pedículo, en su punto de unión con la apófisis articular. La apófisis transversa y sus dos raíces circunscriben, junto con el pedículo, el agujero transversal que permite el paso a la arteria vertebral, a la vena vertebral y también en las vértebras cervicales quinta y sexta, al nervio vertebral.

Cada apófisis trasversa está excavada en su cara superior por un canal transversal que contiene el nervio espinal y termina lateralmente en dos tubérculos, uno anterior y otro posterior.

- Láminas: son más anchas que altas, las láminas están inclinadas inferior y posteriormente; se extienden desde la apófisis articulares a la apófisis espinosa.
- Apófisis espinosa: está formada por la unión de las dos láminas. Su vértice es bitubercular laterales y su cara inferior está excavada por un amplio canal.
- Agujero vertebral transverso: es un triángulo con una ancha base anterior.

1.2.1.3. Características específicas de algunas vértebras cervicales

Primera vértebra cervical o atlas: el atlas se extiende más transversalmente que las otras vértebras cervicales. Está formado por dos masas laterales unidas por dos arcos óseos, uno anterior y otro posterior. Estos diferentes segmentos circunscriben el agujero vertebral.

Axis o segunda vértebra cervical: superiormente al cuerpo del axis se sitúa un voluminoso saliente vertical denominado diente del axis o apófisis odontoides, destinado a articularse con el arco anterior del atlas.

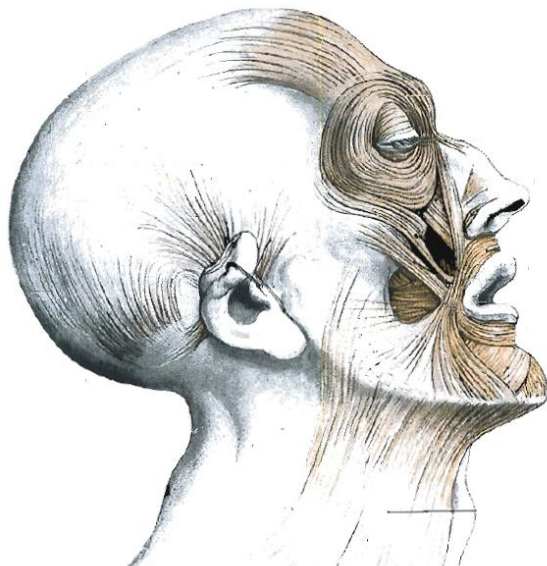
Sexta vértebra cervical: esta vértebra ofrece solamente una particularidad interesante. El tubérculo anterior de la apófisis transversa es más grueso y saliente que el de las otras vértebras. Se denomina tubérculo carotideo.

Vértebra prominente: la séptima vértebra cervical es una vértebra de transición entre las vértebras cervicales y las torácicas.

1.2.2. Músculos de la cabeza y el cuello

Los músculos del cuello son los que le proporcionan la capacidad de movimiento a la cabeza, permitiéndole cambiar su orientación en un sistema coordinado esférico dentro de los límites establecidos por el sistema esquelético y las articulaciones.

Figura 5. **Detalle de los músculos faciales**



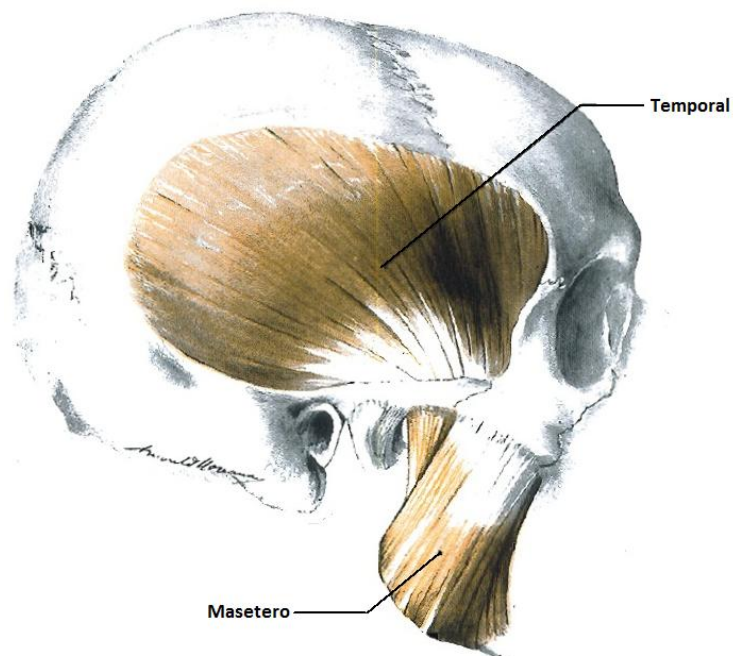
Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 175.

1.2.2.1. Músculos de la cabeza

Los músculos de la cabeza se dividen en dos grupos: los músculos masticadores y los músculos faciales.

Los músculos faciales de la cabeza tienen tres características comunes principales: todos tienen una inserción móvil cutánea; todos están inervados por el nervio facial y todos están agrupados alrededor de los orificios de la cara y son constrictores o dilatadores de estos. Los músculos faciales se dividen en cuatro grupos: músculos de los párpados y las cejas, músculos de la oreja, músculos de la nariz y músculos de los labios. En la figura 5 puede apreciarse el detalle de la disposición de los músculos en el rostro.

Figura 6. **Músculos de la cabeza; músculos masticadores**

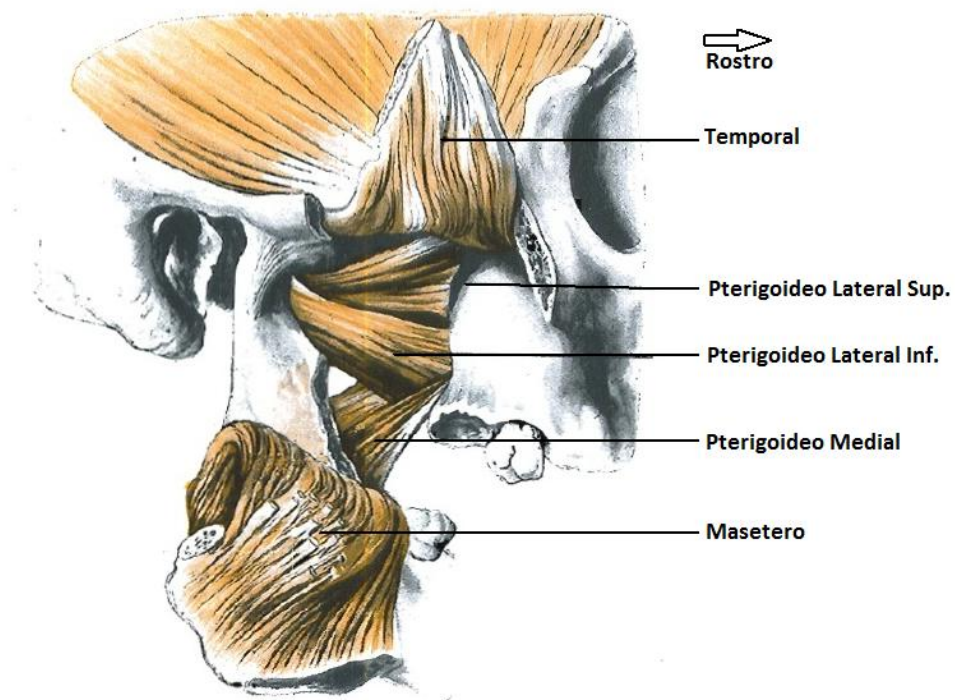


Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 163.

Los músculos masticadores son cuatro a cada lado de la cara: temporal, masetero, pterigoideo lateral y pterigoideo medial. Puede apreciarse cada uno de estos músculos en las figuras 6 y 7.

- El músculo temporal es ancho, plano y radiado, ocupa la fosa temporal, desde donde sus fascículos convergen hacia la apófisis coronóides de la mandíbula.
- El músculo masetero es corto, grueso, rectangular y alargado de superior a inferior; se extiende desde el arco cigomático hasta la cara lateral de la rama de la mandíbula.

Figura 7. **Grupo muscular pterigoideo**



Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 164.

- El músculo pterigoideo lateral es corto, grueso y aplanado transversalmente; está situado en la región infratemporal o pterigo-maxilar. Se extiende desde la apófisis pterigoides hasta el cuello de la mandíbula.
- El músculo Pterigoideo Medial es un músculo grueso y cuadrilátero, que está situado medialmente al músculo pterigoideo lateral. Se extiende oblicuamente desde la fosa pterigoidea hasta la cara medial del ángulo de la mandíbula

1.2.2.2. Músculos del cuello

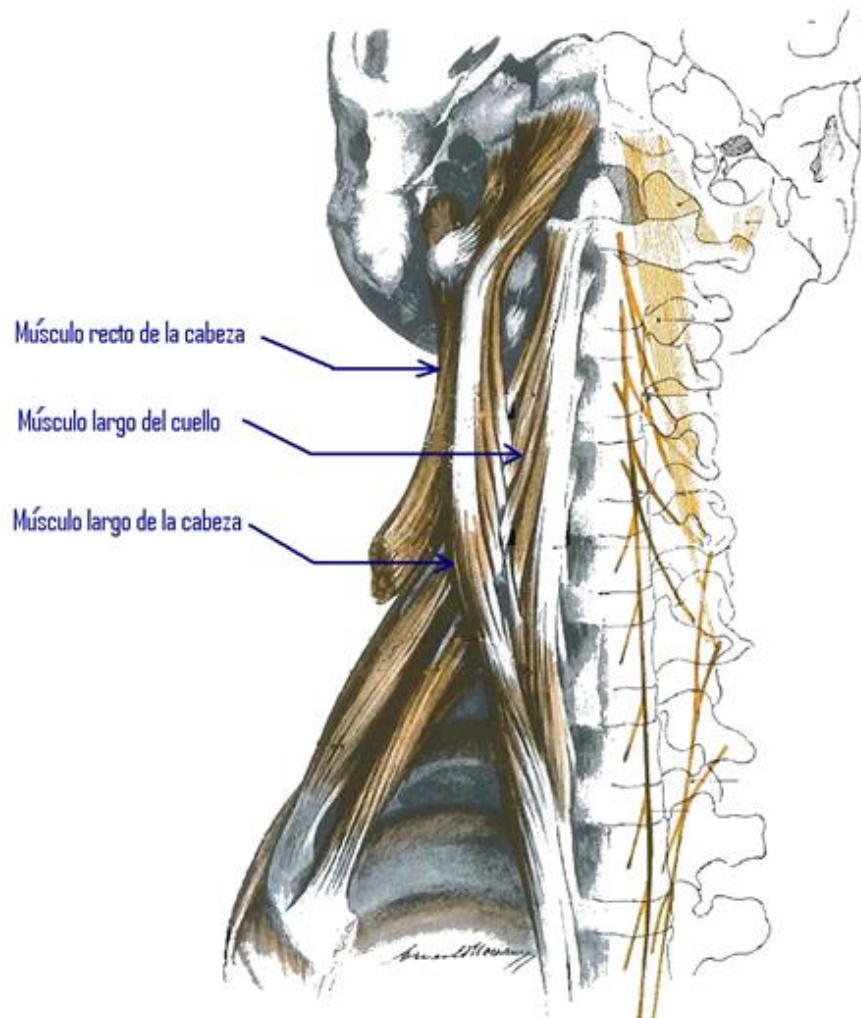
Los músculos del cuello se dividen en dos grupos: los de la región anterior del cuello y los de la nuca, según se sitúen anterior o posteriormente a la columna vertebral.

Los músculos de la región anterior del cuello se dividen en seis grupos, que son, desde el esqueleto a los planos superficiales: el grupo profundo medio, formado por los músculos prevertebrales; el grupo profundo lateral; el grupo de los músculos infra-hioideos; el grupo de los músculos supra-hioideos; el grupo antero lateral y el grupo superficial o suprafacial.

- Grupo muscular profundo medio: existen tres músculos prevertebral que pertenecen a este grupo, el largo del cuello, el recto anterior de la cabeza y el largo de la cabeza (figura 8).
- Grupo muscular profundo lateral: a este grupo pertenecen los músculos escalenos y los intertransversos del cuello (figura 9).

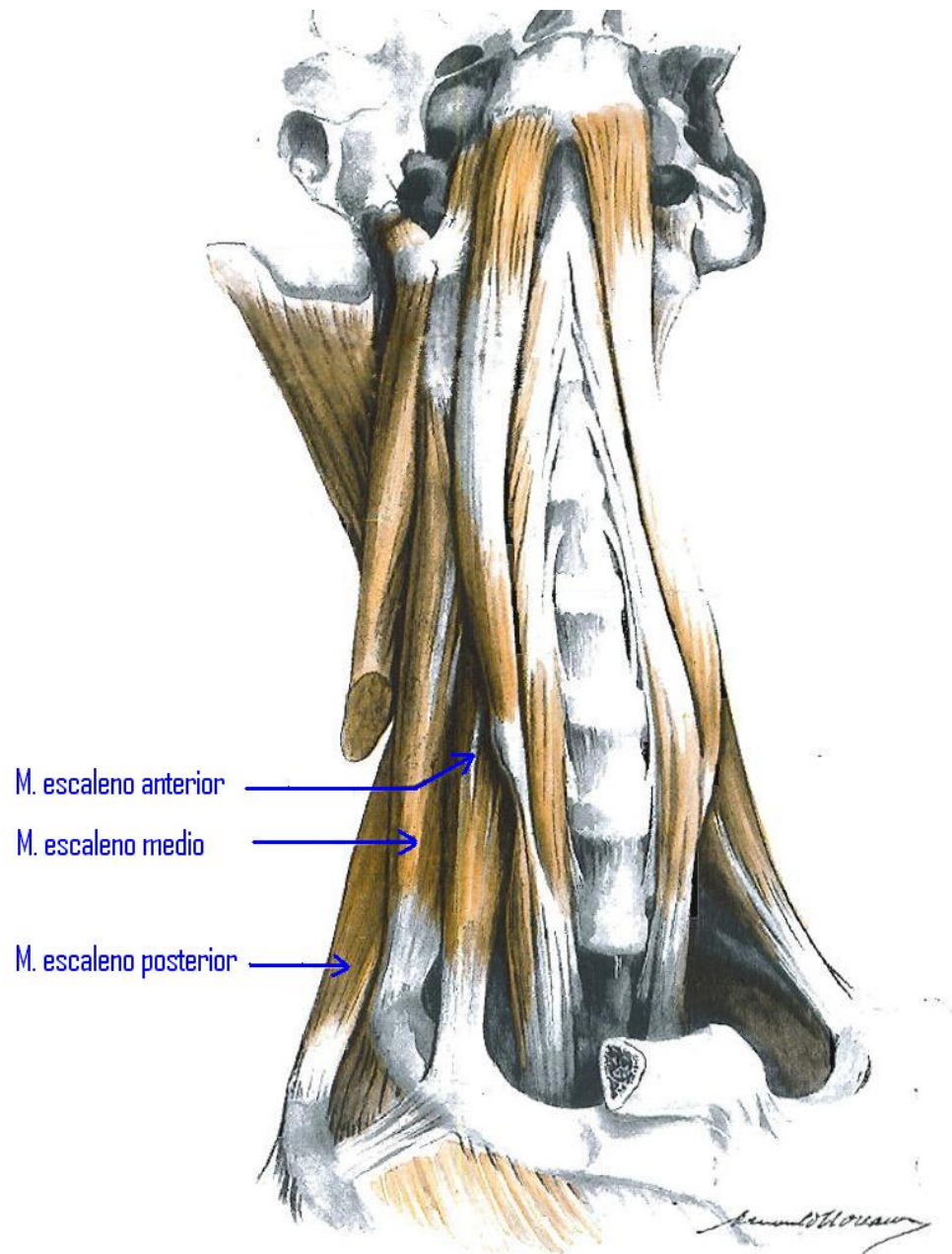
- Músculos infrahioideos: los músculos infrahioideos son delgados y con forma de cintas, están separados de los músculos prevertebrales por las vísceras del cuello, situándose anteriormente a estas. Son cuatro a cada lado y se disponen en dos planos: uno profundo, formado por los músculos Estemotiroideo y Tirohioideo y el otro superficial, que incluye los músculos Esternohioideo y Omohioideo (figura 10).

Figura 8. **Grupo muscular profundo medio**



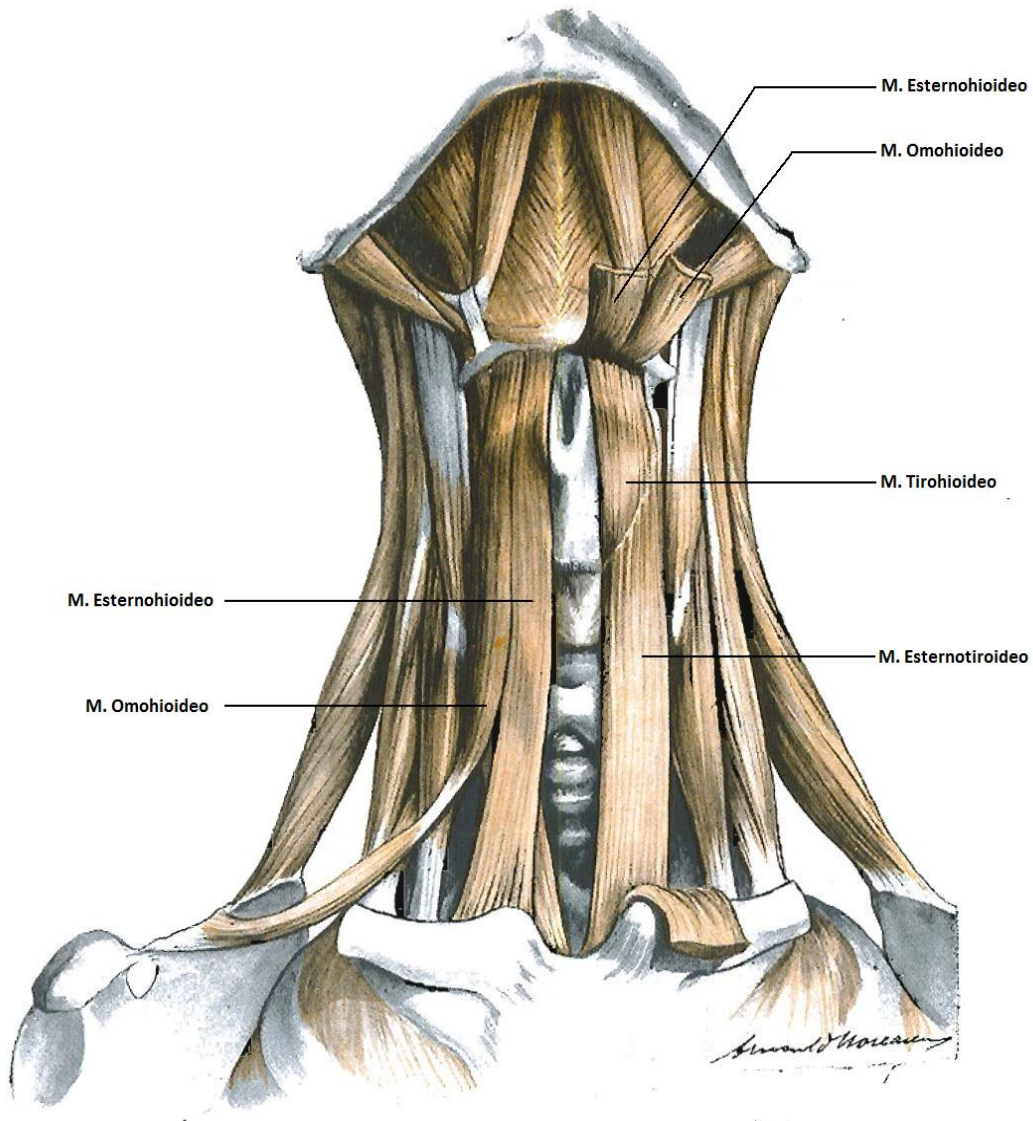
Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 185.

Figura 9. **Grupo muscular lateral**



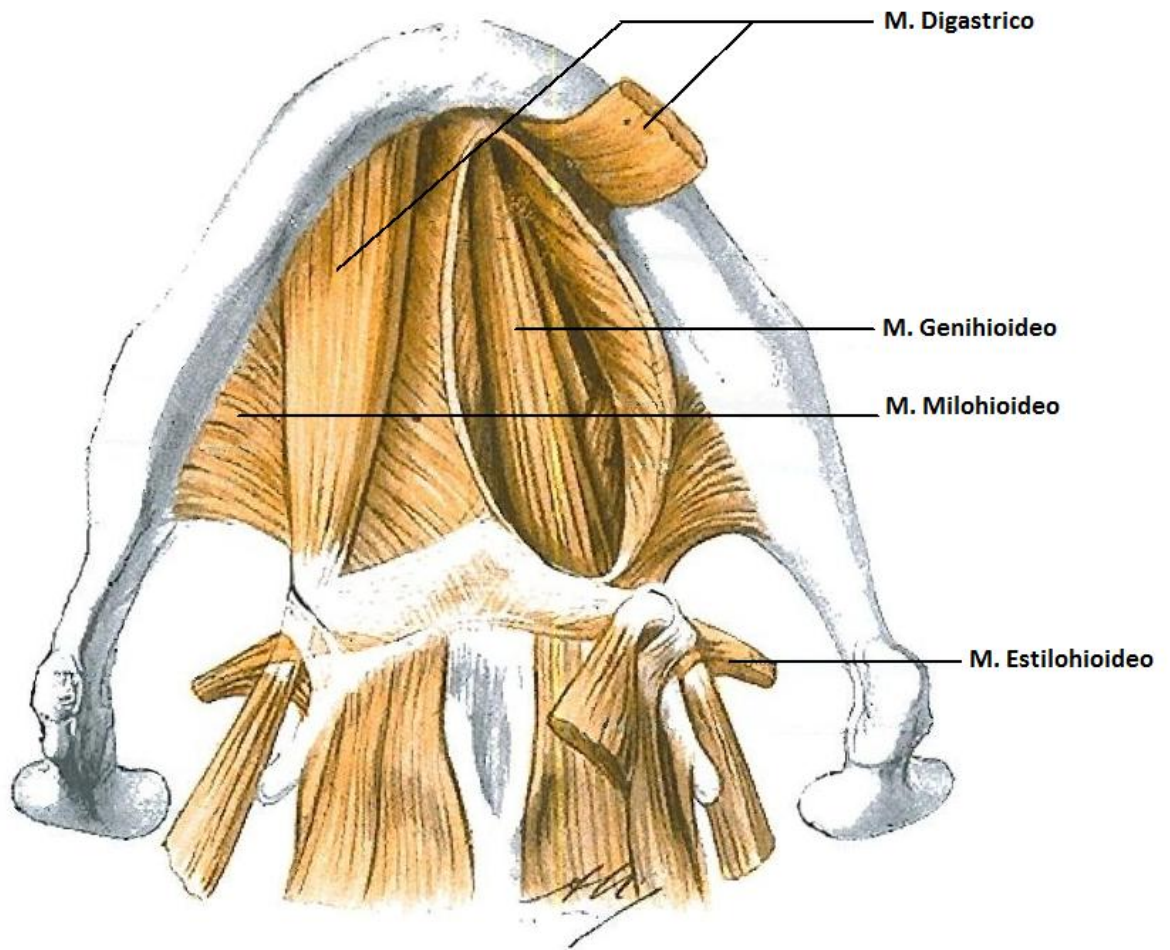
Fuente: ROUVIÈRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 186.

Figura 10. Grupo muscular infrahioideo



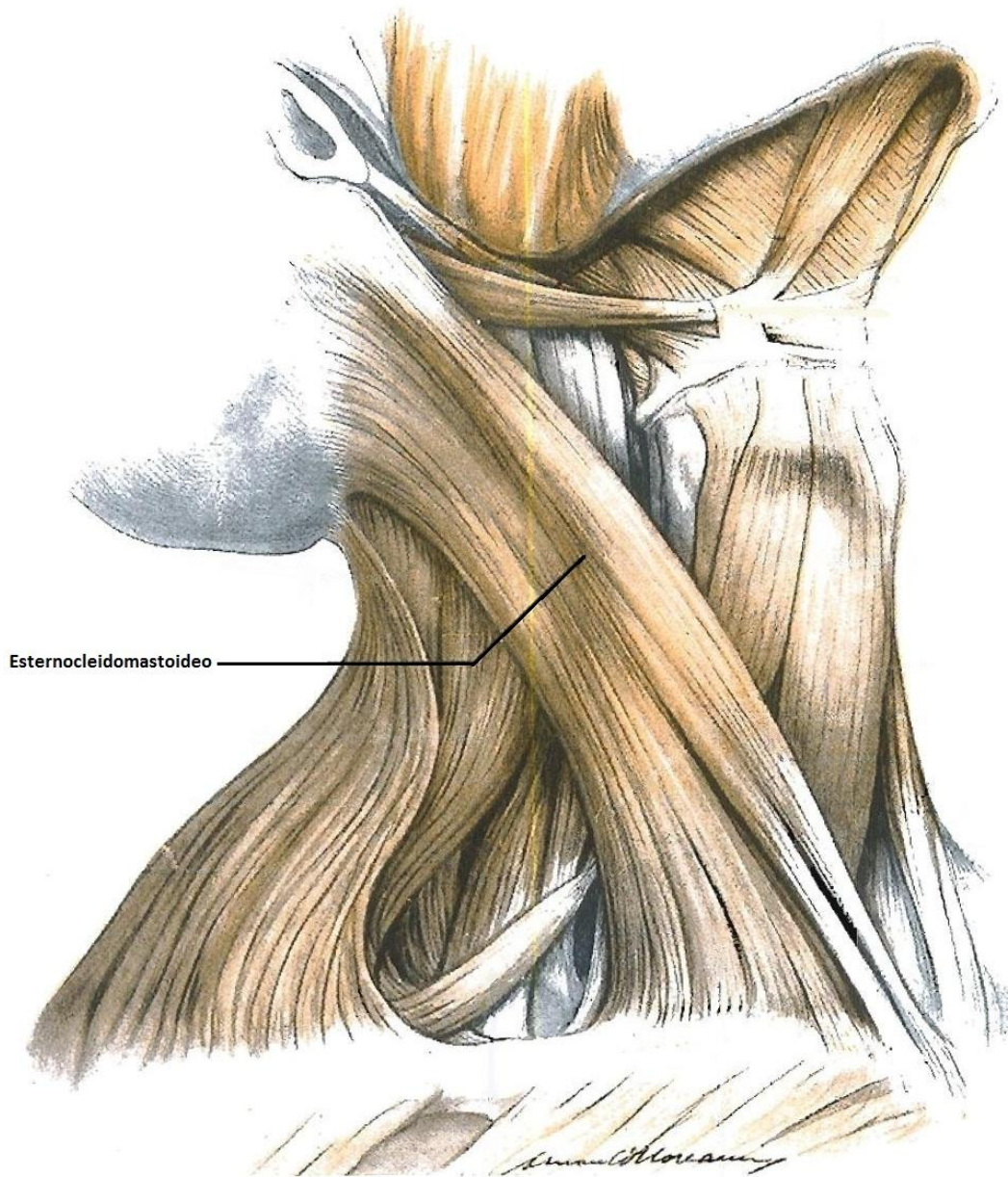
Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 190.

Figura 11. **Músculos suprahioides**



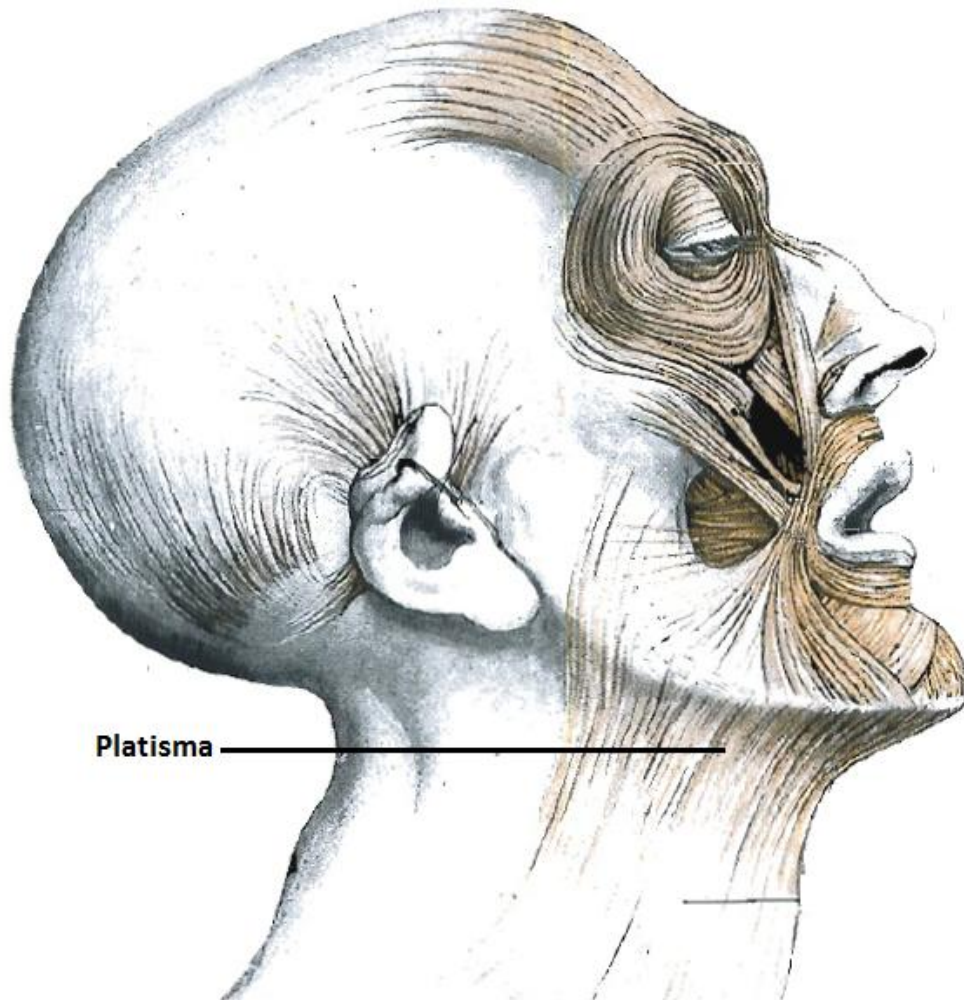
Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 193.

Figura 12. **Grupo muscular ánterolateral**



Fuente: ROUVIÈRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 196.

Figura 13. **Grupo muscular suprafacial**



Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 175.

- **Músculos Suprahioideos:** este grupo comprende cuatro músculos a cada lado, dispuestos en tres planos: el plano profundo está constituido por el músculo Genihioideo; el plano medio por el músculo Milohioideo y el plano superficial por los músculos Digástrico y Estilo-hioideo (figura 11).

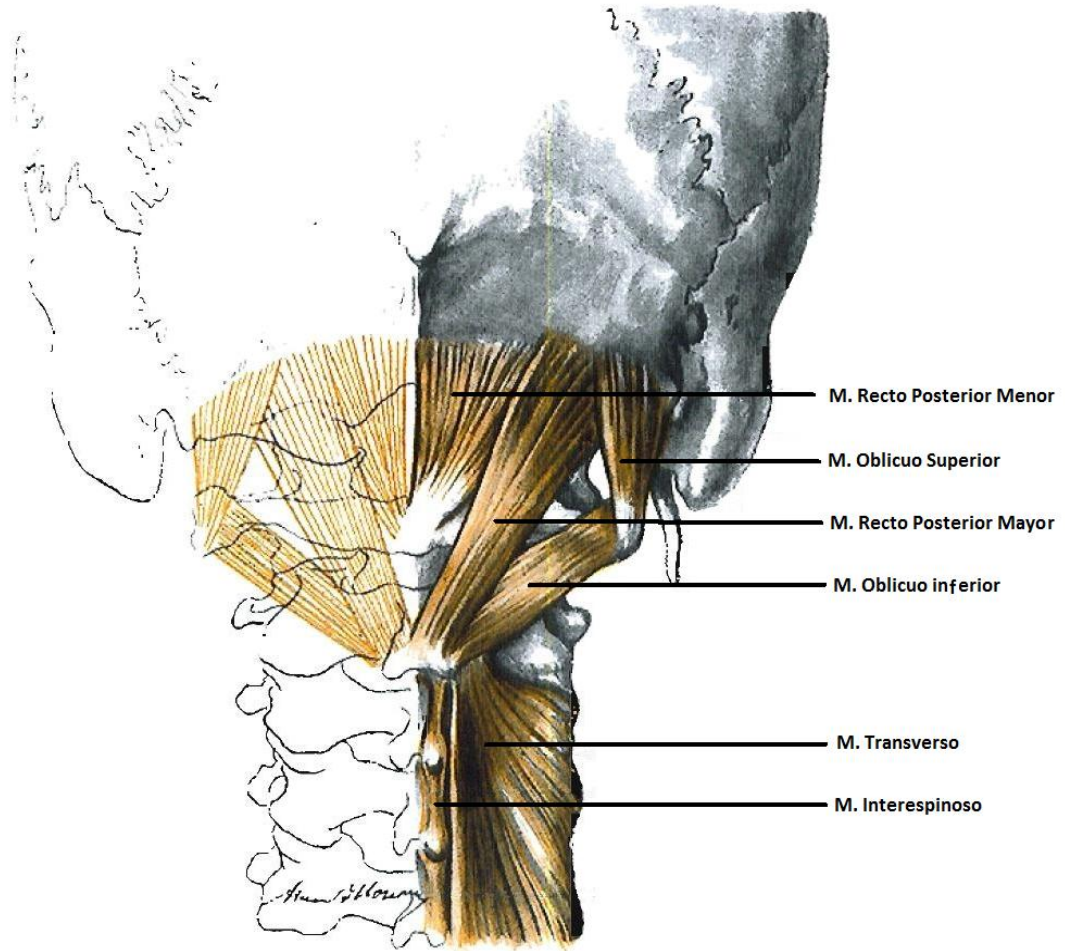
- Grupo Ánterolateral: está constituido únicamente por el Músculo Esternocleidomastoideo (figura 12).
- Grupo Supra-facial: está formado por un único Músculo a cada lado del cuello: el Platisma (figura 13).

Los músculos de la región posterior del cuello o de la nuca se disponen en varios planos. Los músculos más profundos son los más cortos. Los otros son tanto más largos cuanto más superficiales; los que ocupan el plano superficial se extienden inferiormente más allá de la nuca e invaden la región torácica del tronco. En sentido inverso, algunos músculos de la columna del tronco se extienden hasta la región posterior del cuello.

En la nuca se distinguen cuatro planos musculares superpuestos, de profundo a superficial, en el orden siguiente: el plano profundo, situado inmediatamente sobre el esqueleto y las articulaciones: el plano de los músculos semiespinoso y longísimo de la cabeza; el plano de los músculos esplenio y elevador de la escápula y el plano superficial o del músculo trapecio.

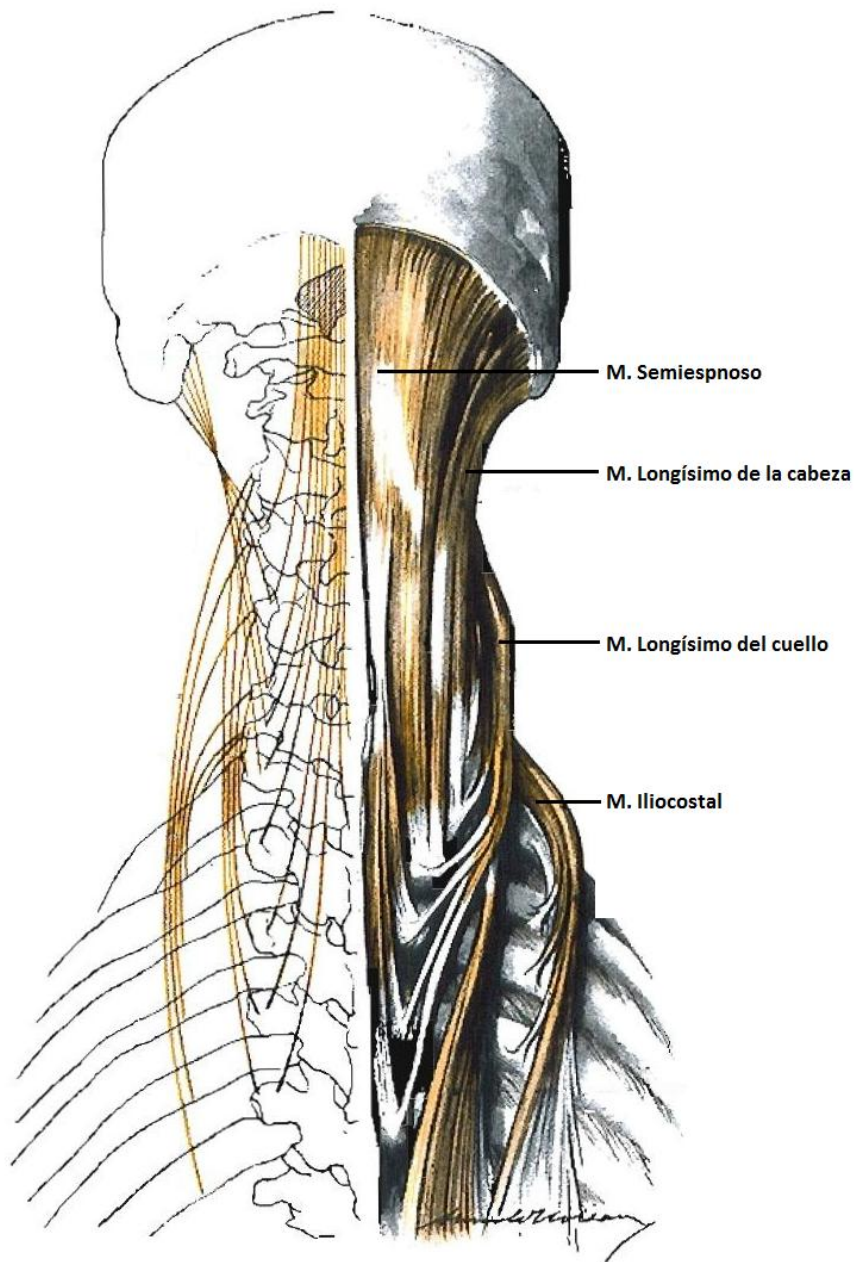
Plano profundo: los músculos que pertenecen a este plano son aquellos que se extienden entre el atlas y el axis o desde el atlas y el axis hasta el hueso occipital, son: el músculo recto posterior menor, recto posterior mayor y oblicuos superior e inferior de la cabeza; la porción cervical del músculo transversoespinoso y los músculos interespinosos (figura 14).

Figura 14. **Plano profundo**



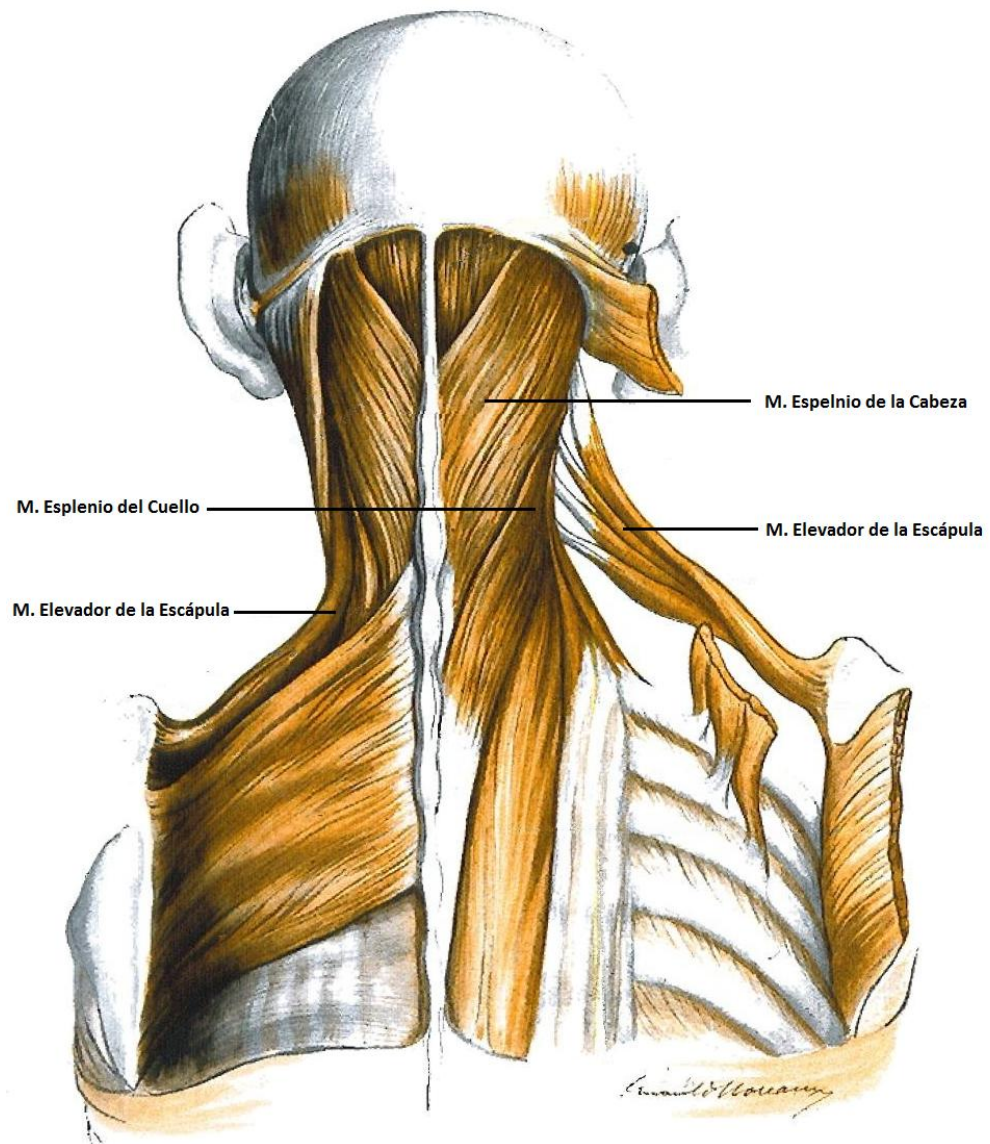
Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 201.

Figura 15. **Músculos semiespinosos y longisimos**



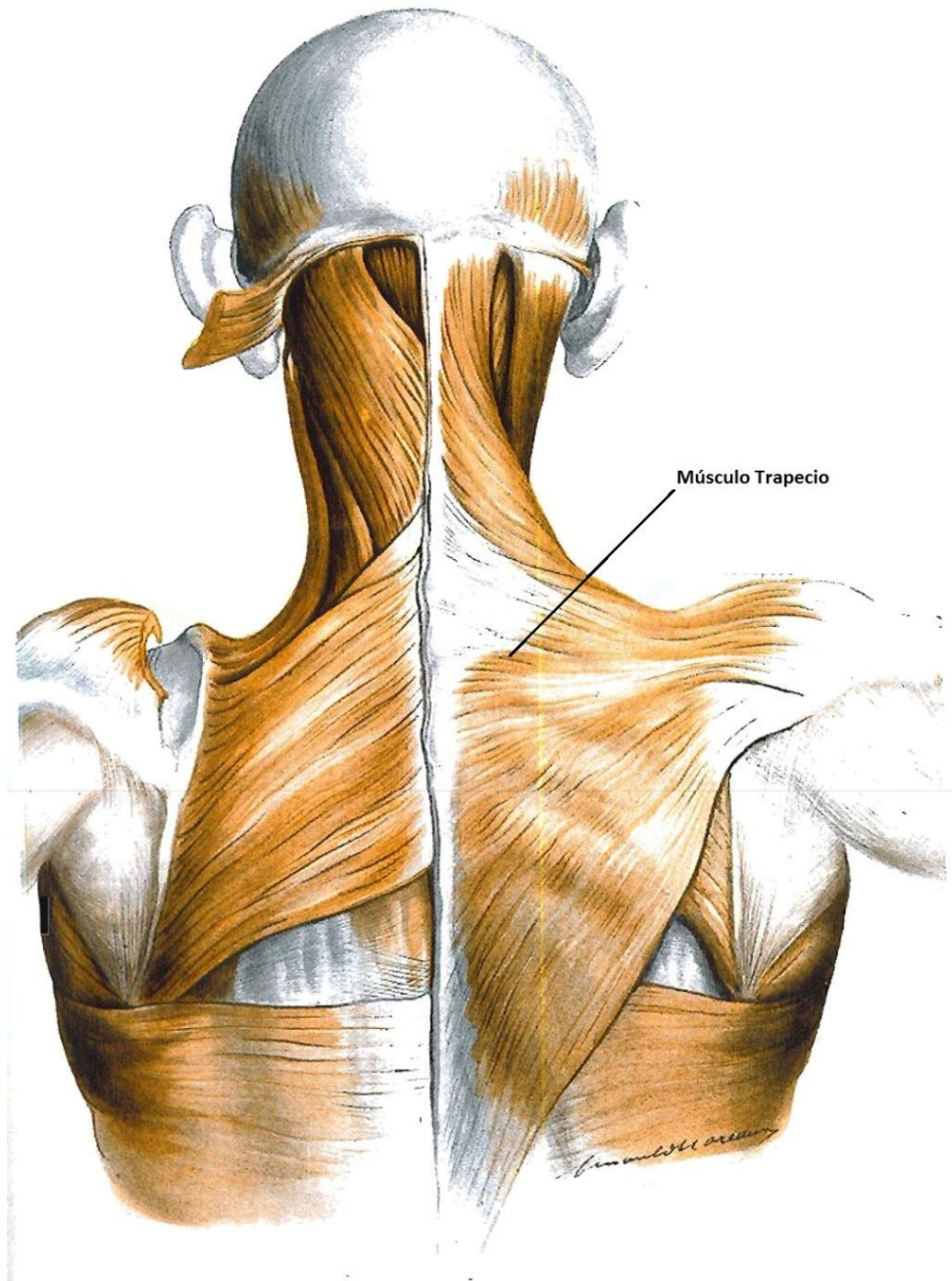
Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 203.

Figura 16. **Músculo esplenio y elevador de la escapula**



Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 205.

Figura 17. **Plano superficial**



Fuente: ROUVIÉRE, Henry. *Anatomía Humana*. p. 207.

Plano de los músculos semiespinoso y longuísimo de la cabeza: este plano comprende cuatro músculos, que se yuxtaponen a cada lado de la línea media en el siguiente orden de medial a lateral: Músculo Semiespinoso de la Cabeza, Músculo Longísimo de la Cabeza, Músculo Longísimo del Cuello y Músculo Iliocostal del Cuello. Estos músculos recubren directamente los del plano profundo (figura 15).

Plano de los músculos esplenio y elevador de la escapula: los músculos esplenio de la escápula forman una única capa muscular que recubre casi en su totalidad el plano de los músculos semiespinoso y longuísimo de la cabeza (figura 16).

Plano superficial: está formado únicamente por un músculo ancho, delgado, aplanado y de forma triangular llamado músculo trapecio (figura 17).

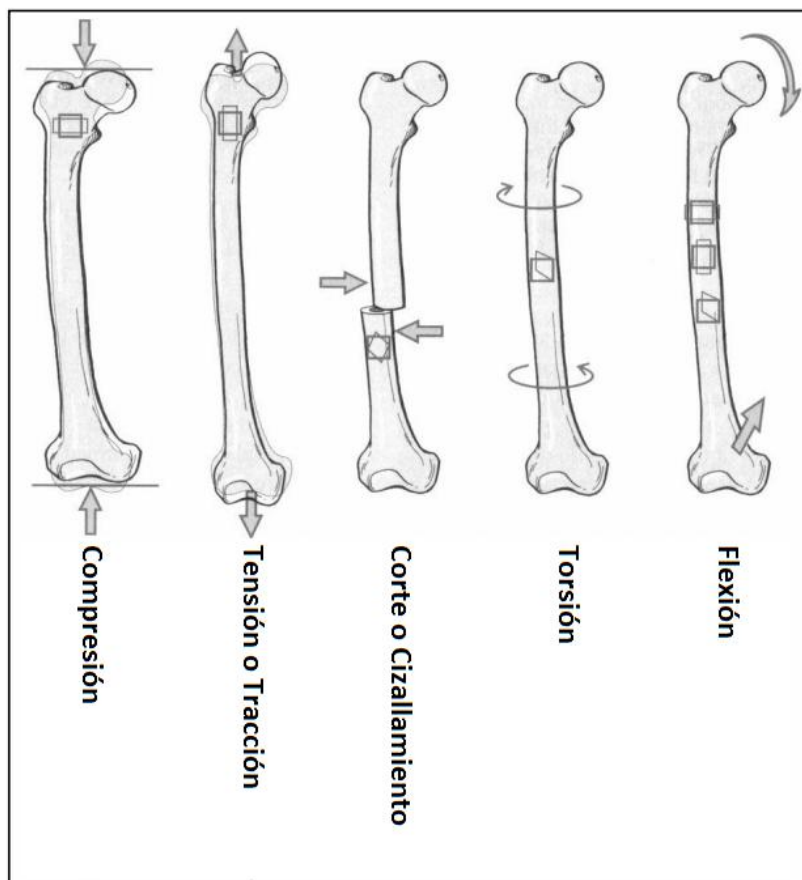
1.2.3. Propiedades mecánicas de las vértebras cervicales

La columna vertebral es una estructura esencialmente mecánica. Cada vértebra se articula con la otra de forma controlada a través de un complejo sistema de articulaciones, ligamentos y palancas. Aunque la columna presenta una estabilidad ligamentosa inherente, la mayor parte de esta estabilidad mecánica se debe a su altísimo desarrollo, tanto de las estructuras neuromusculares dinámicas como de su sistema de control. La columna vertebral cumple tres funciones biomecánicas fundamentales:

- Soporta la mitad superior del cuerpo, lo que representa un 60 % del peso total, que gravita sobre ella en posición erecta.

- Posee una flexibilidad suficiente para permitir los movimientos del tronco en los tres planos, permitiendo no sólo la marcha sino el alcance y la carga de objetos.
- Por último y la más importante, protege las delicadas estructuras nerviosas medulares y radiculares.

Figura 18. **Tipos de esfuerzos aplicados a un hueso**



Fuente: Universidad de Castilla de la Mancha. *Biomecánica de movimiento*. p. 179.

La estabilidad y la resistencia de la columna vertebral vienen dadas de manera intrínseca a través de los ligamentos y discos y extrínsecamente por los músculos. La aplicación a la medicina de una serie de técnicas de ingeniería cada vez más precisas ha permitido conocer las propiedades mecánicas de las diferentes estructuras de la columna.

Puede realizarse el estudio de cada uno de los componentes anatómicos de la columna o considerando a esta como un todo, ya sea en su aspecto global, analizando su comportamiento y movimientos o en detalle de cada uno de sus elementos articulares.

El disco, los huesos y los ligamentos son materiales anisotrópicos, es decir, sus propiedades mecánicas varían según la orientación con que se aplican las fuerzas. Por ello, el estudio completo exige que los materiales se sometan a fuerzas de compresión, tracción, corte, torsión, flexión y a cíclicos de fatiga (figura 18).

1.2.3.1. Vértebras

Probablemente, el primer estudio biomecánico de la columna vertebral humano es el referido a las medidas de fuerza de la vértebra, fue llevado a cabo hace aproximadamente cien años, desde entonces se ha aprendido mucho acerca de las propiedades mecánicas de las vértebras humanas.

Aunque el diseño básico de la vértebra es el mismo en las diferentes regiones de la columna, el tamaño y el volumen aumenta desde la primera vértebra cervical hasta la última vértebra lumbar. Este hecho es una adaptación mecánica al aumento progresivo de las cargas a las cuales están sometidas las vértebras.

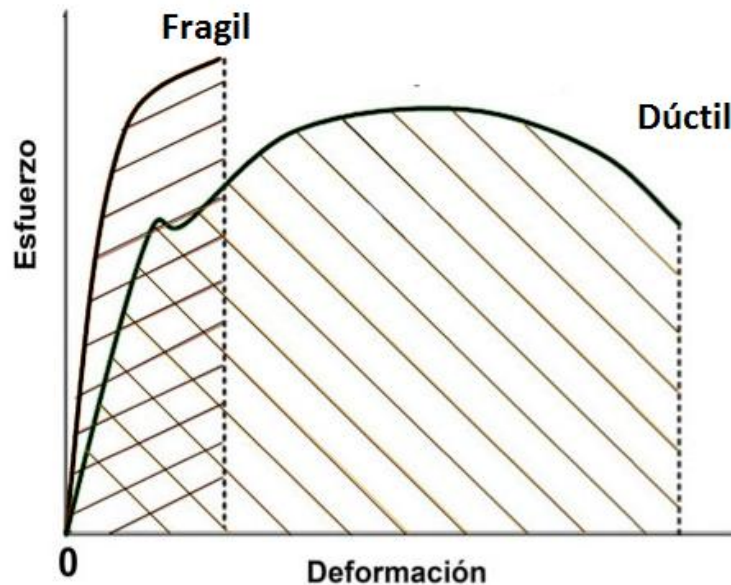
El diseño de los movimientos de la columna depende de la forma y posición de los procesos articulares de la articulación diartrodia. Es la orientación de estas articulaciones en el espacio lo que determina su importancia mecánica.

- Cuerpo vertebral

El cuerpo vertebral soporta grandes esfuerzos antes de fracturarse, dada la enorme capacidad de absorción de energía que posee el hueso esponjoso. En general, la resistencia de la vértebra disminuye con la edad, en especial a partir de los 40 años. Se ha demostrado que existe una correlación entre la resistencia y la masa ósea. Así, la pérdida progresiva de masa ósea se traduce en una menor resistencia. Una pérdida de masa del 25 % supone una disminución de resistencia del 50 %. La pérdida ósea trabecular es mayor en el centro del cuerpo vertebral, de ahí que la fractura por osteoporosis tenga el aspecto característico de un hundimiento central.

También se han estudiado por separado los componentes cortical y esponjoso. El hueso cortical es más rígido que el hueso esponjoso, pero este puede soportar mayores esfuerzos antes de romperse. Cuando la deformación *in-vivo* excede el 2 % de la longitud original, el hueso cortical se fractura, pero el hueso esponjoso puede soportar en cierto modo mayores deformaciones antes de fracturarse. La mayor habilidad para soportar la deformación es debida a la estructura del hueso esponjoso: su porosidad varía del 30 al 90 % comparado con los valores del 5 al 30 % del hueso cortical. La forma de determinar las capacidades que poseen las estructuras óseas es a través de los diagramas de esfuerzo-deformación, los cuales se obtienen a través de ensayos experimentales para cada material (figura 19).

Figura 19. **Diagrama esfuerzo-deformación para materiales frágiles y dúctiles**



Fuente: sgarcia81.wordpress.com. [Consulta: febrero de 2014].

Estructuralmente el hueso esponjoso presenta una orientación preferentemente vertical y transversa de sus trabéculas de interconexión en diversos planos oblicuos se relacionará con la capacidad de resistencia frente a fuerzas de corte o compresión de múltiples direcciones. Por lo que respecta al componente cortical, este participa en un 45 a un 75 % en la resistencia global. Es decir, tanto uno como otro contribuyen sustancialmente a la rigidez del soporte corpóreo vertebral.

Cuando el hueso se carga *in vivo*, la contracción de los músculos insertados en el hueso puede alterar la distribución de la deformación en el hueso.

Los momentos de flexión se aplican a los cuerpos vertebrales durante los movimientos. Durante la flexión se aplican esfuerzos de tensión a la corteza posterior y de compresión a la corteza anterior del cuerpo vertebral. Para llevar a cabo tareas de elevación, se requieren los músculos de la espalda para desarrollar fuerzas considerables. Los esfuerzos en una vértebra cervical típica cambian de tensil a compresiva en una región situada aproximadamente de 0,5 a 1 centímetro anterior al ligamento longitudinal posterior.

A medida que el hueso es más débil y falla de forma más temprana en tensión que en compresión por ello, la contracción de la musculatura paravertebral posterior puede disminuir el esfuerzo tensil sobre el hueso produciendo un esfuerzo de compresión que reduce o neutraliza el esfuerzo de tensión cortical posterior, permitiendo a las vértebras soportar cargas más elevadas de las que de otro modo serían posibles. Sin embargo, el hueso fallará antes de que se produzca el daño sobre el Disco Intervertebral bajo carga compresiva. El modelado de elemento finito de la columna cervical indica que el aumento de los esfuerzos sobre el platillo vertebral puede ser un factor iniciador para la rotura de este componente bajo cargas compresivas.

- Apófisis articulares

El papel de las apófisis articulares es múltiple en el contexto de la biomecánica. En posición erecta soportan un 18 % de las fuerzas de compresión y contribuyen a disminuir la presión intradiscal. En posición de sentado, sin respaldo, es decir, en ligera flexión de la columna, las carillas no actúan; de ahí que paradójicamente la presión intradiscal sea mayor en esta postura que en bipedestación.

La posición de sentado, con respaldo, tiene una doble ventaja: disminuye la presión en las apófisis articulares y también la fuerza de compresión en la parte posterior del anillo.

En definitiva, las carillas articulares protegen al disco de las fuerzas de corte y torsión, pero no están diseñadas para resistir las fuerzas de compresión intervertebral, función que asume casi íntegramente el disco.

- **Pedículo**

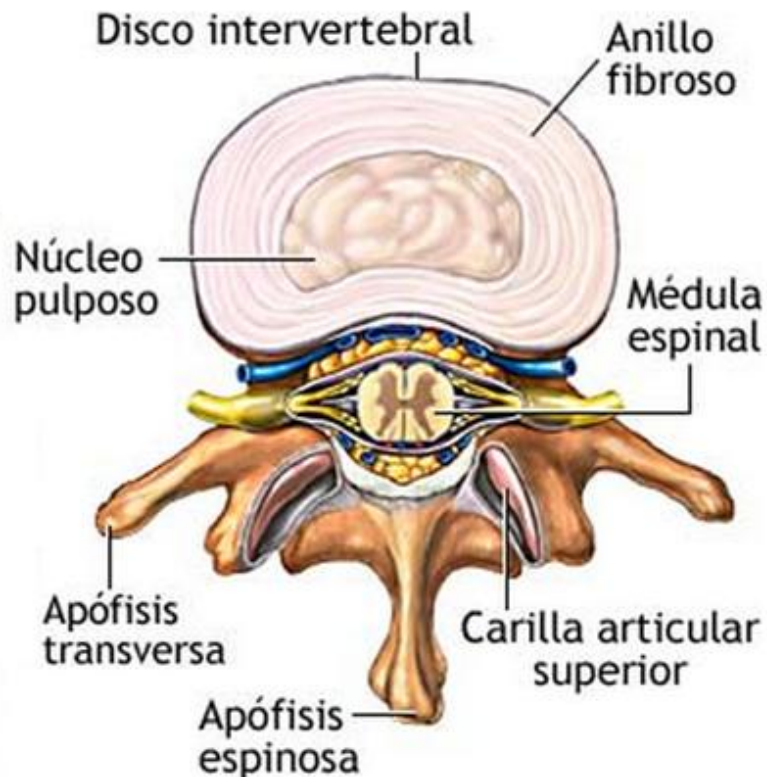
El pedículo resiste cargas de hasta 100 kilogramos, más interesante es el comportamiento del arco neural como unidad funcional. No hay estudios biomecánicos que traten por separado los componentes del arco neural. Cuando se estudia el arco neural (pedículos y láminas) ante fuerzas cíclicas en flexión, extensión o torsión, se observa que las tensiones se distribuyen en una zona común situada en la superficie inferior del pedículo, en la unión de este con la lámina. Puede verse un detalle de estas partes de la vértebra en la figura 4.

1.2.3.2. El disco intervertebral

El disco intervertebral es quizá la estructura anatómica de la columna que recibe una mayor atención, a excepción de la médula espinal. Constituyen del 20 al 33 % de la altura total de la columna vertebral. En el disco intervertebral se distinguen tres partes: el núcleo pulposo, el anillo fibroso y el extremo cartilaginoso del platillo, tales partes se observan en la figura 20.

El núcleo pulposo está localizado en el centro; se compone de una translúcida red de hilos fibrosos finos que yacen en un gel de proteínas que contiene diversos polisacáridos mucosos.

Figura 20. **Estructura de un disco intervertebral**

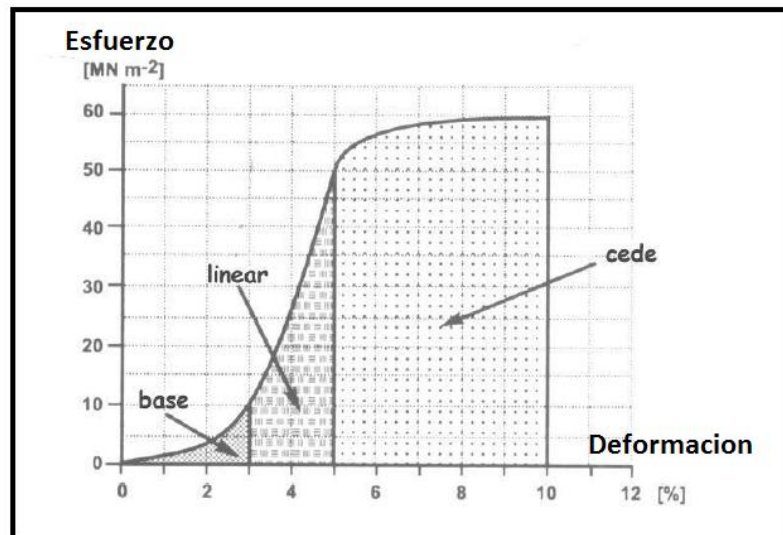


Fuente: www.clinicadam.com. [Consulta: febrero de 2013].

Experiencias realizadas en discos de cadáver muestran que el comportamiento viscoso del núcleo pulposo actúa como un líquido, incluso cuando existen indicios de degeneración. Debido a la especial disposición de las láminas concéntricas del anillo fibroso, estas actúan como un muelle helicoidal que comprime el núcleo.

Así, debido a sus propiedades viscosas y elásticas, el disco (núcleo y anillos) se comporta biomecánicamente como un elemento viscoelástico. De este modo, al someter un disco a compresión, este aumenta su resistencia y permite que la presión intradiscal sea mayor que la fuerza de la carga aplicada.

Figura 21. **Diagrama esfuerzo-deformación para materiales visco-elásticos en tensión**



Fuente: Universidad de Castilla de la Mancha. *Biomecánica del movimiento*. p. 184.

De forma característica, la curva de desplazamiento de la carga es sigmoidea, con la concavidad inicialmente hacia el eje de la carga, seguida de una línea recta y una convexidad hacia el eje de la carga en la fase final, justo antes del fallo (figura 21), este tipo de curva implica que el disco proporciona muy poca resistencia a cargas bajas pero, cuando la carga aumenta, el disco se endurece, así pues, proporciona flexibilidad a cargas bajas y estabilidad a cargas altas.

Por otro lado, el disco resiste poco a la tracción y mucho menos a la torsión, fallando y generando fisuras por su parte posterior. Sin embargo, tolera muy bien las fuerzas de corte, de modo que se necesita una acción intensa y violenta para causar un desplazamiento horizontal.

El disco se deforma al ser sometido a cualquier tipo de carga, tracción, compresión y rotación. No obstante, al suprimirla se produce una recuperación elástica inmediata y progresiva hacia la dimensión original. Sin embargo, no se alcanza la dimensión primitiva de partida hasta que ha pasado un período variable; este comportamiento es típico de los materiales visco-elásticos. Si el proceso de relajación se repite de forma cíclica, el disco tarda cada vez más en recuperar su estado inicial. La tolerancia a la fatiga es baja. Con el proceso de degeneración, esta capacidad visco-elástica de retorno se va perdiendo y la carga se distribuye de manera menos uniforme sobre el platillo vertebral.

1.2.3.3. Ligamentos

Son estructuras uniaxiales, efectivos en el transporte de cargas a lo largo de la dirección en la cual se disponen las fibras.

En este sentido, se parecen mucho a una goma: resisten inmediatamente fuerzas tensionales, pero se doblan cuando son sometidos a fuerzas de torsión. La naturaleza ha diseñado los segmentos móviles de la columna con el fin de que cuando son sometidos a diferentes fuerzas complejas y vectores de fuerza rotatoria, los ligamentos proporcionen resistencia a las cargas (fuerzas tensionales). Los ligamentos poseen tres funciones biomecánicas de gran importancia:

- Fijan las actitudes posturales, lo cual disminuye el gasto muscular. En flexión completa y con los ligamentos íntegros, el segmento intervertebral es suficientemente rígido para resistir la mitad del movimiento flexor del tronco.
- Protegen la médula espinal, restringiendo la movilidad. Todos los ligamentos se elongan y contraen pasivamente y están dotados de una capacidad elástica que disminuye con la edad. Con lo que se degeneran, pudiendo aparecer roturas fibrilares. El ligamento amarillo es la estructura del organismo con mayor cantidad de fibras elásticas, lo cual permite su elongación durante la flexión, al igual que los otros ligamentos que se repliegan, evitando así que protruya dentro del canal.
- Protegen al resto de estructuras vertebrales y absorben energía cinética frente a las fuerzas aplicadas en velocidad. En un movimiento de hiperflexión forzada los ligamentos capsulares ofrecen gran resistencia, ya que poseen una capacidad de estiramiento aproximada del 20 % al 25 % de su longitud inicial.

La estabilidad de la columna depende de forma primaria de los componentes de tejido blando, especialmente en la columna cervical. Los ligamentos espinales son funcionales principalmente en distracción a lo largo de la línea de sus fibras. La fuerza y la limitada extensibilidad de los ligamentos ayudan a mantener la estabilidad, especialmente alrededor de la unión cráneo-cervical. Los ligamentos alares tienen una fuerza *in vitro* de 200 N y los ligamentos transversos tienen una fuerza *in vitro* de 350 N. La fuerza de los ligamentos se relaciona tanto con las demandas anatómicas como con la flexibilidad requerida lo que es un ejemplo clásico de que la forma es consecuencia de la función.

Todos los ligamentos tienen un alto contenido de colágeno excepto el ligamento amarillo, que es excepcional por tener un gran porcentaje de elastina. El ligamento amarillo está sometido a tensión incluso cuando la columna está en una posición neutra o un poco extendida y así preesfuerza el disco en cierto grado y proporciona algún apoyo intrínseco a la columna. Las propiedades elásticas también ayudan a limitar la deformación interna de estos ligamentos durante la extensión, lo que podría potencialmente comprimir los elementos neurales.

1.2.3.4. Músculos

La fuerza y el control muscular son imperativos para mantener el equilibrio de la cabeza y el cuello. En la columna cervical, la fuerza muscular tiene también un papel a la hora de reducir los esfuerzos sobre los huesos. Los momentos de flexión se aplican a los cuerpos vertebrales durante distintos movimientos. Durante la flexión, los esfuerzos de tensión se aplican a la corteza posterior y la compresión a la corteza anterior del cuerpo vertebral. Se han calculado cargas sustanciales sobre la columna cervical durante la flexión del cuello, particularmente en los segmentos móviles cervicales inferiores.

1.2.3.5. Elementos neurales

La biomecánica de los elementos neurales no se ha estudiado tan bien como la biomecánica de la columna vertebral óseo-ligamentosa, pero el conocimiento base está creciendo. Hasta la fecha, ciertos parámetros básicos se han establecido. La columna cervical experimenta cambios significativos en longitud durante la flexión y extensión. Así, mientras que hay cierta elasticidad longitudinal en la médula espinal, tolera mal la traslación axial.

Son las fuerzas de traslación las que típicamente producen la lesión neurológica. Se estima una tolerancia comprensiva de entre 2,75 kilonewton y 3,44 kilonewton para la columna cervical adulta antes de que se produzca una lesión neurológica significativa. Las lesiones de la médula espinal pueden resultar también de los movimientos extremos o repentinos de flexión-extensión, especialmente en el lado superficial del canal espinal.

1.2.4. Mecánica de las articulaciones de la cabeza y del cuello

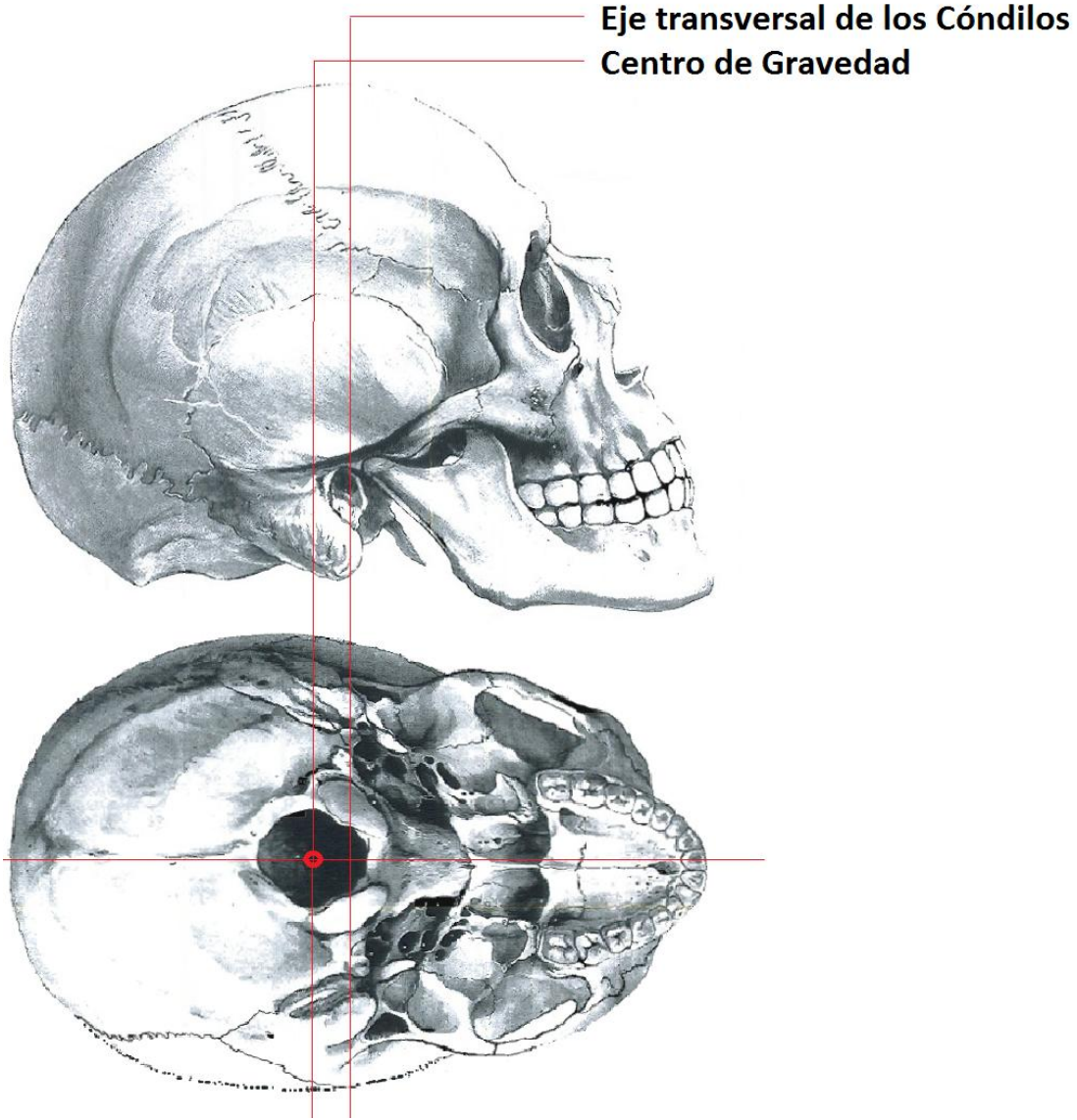
Las articulaciones juegan un papel importante en la movilidad del cuello y en conjunto con los músculos proporcionan el equilibrio estático y dinámico de la cabeza. En general, son las articulaciones quienes limitan la capacidad de movimiento del cuello, aunque la forma de los huesos y músculos también incide en la capacidad de movimiento, es la articulación la que proporciona los grados de libertad necesarios para el mismo.

La mecánica de las articulaciones se refiere al estudio del equilibrio y la capacidad del movimiento derivado de la morfología de las articulaciones.

1.2.4.1. Equilibrio de la cabeza sobre la columna vertebral

Cuando la vertical del centro de gravedad de la cabeza pasa por el eje transversal de los cóndilos del hueso occipital (figura 22), la cabeza se halla en equilibrio inestable, ya que el centro de gravedad se sitúa superiormente a dicho eje; la cabeza entonces se encuentra desequilibrada tal cual un ovoide sobre su punta.

Figura 22. **Posición del centro de gravedad de la cabeza con respecto al eje de rotación ubicado en los cóndilos**



Fuente: elaboración propia, con programa Painte.net.

El mantenimiento del equilibrio requiere la intervención de los músculos antagonistas de los movimientos de inclinación que la cabeza tiende a ejecutar. *In vivo*, el peso de la cabeza es aproximadamente de 4,14 kilogramos y su centro de gravedad se localizaría un centímetro posterior a las apófisis clinoides posteriores. La vertical trazada desde este centro es sólo ligeramente anterior al eje transversal de los cóndilos occipitales. La gravedad tendería a causar la caída de la cabeza anteriormente si la conicidad de los músculos de la nuca y la resistencia elástica del ligamento nucal no se opusieran, esto es lo que representa el verdadero agente de equilibrio cefálico.

Sin embargo, el equilibrio de la cabeza es precario y debe ser continuamente mantenido por la acción de los músculos de la nuca y del cuello en el curso de sus cambios de posición en el espacio. Los músculos intervienen cuando esta inclinación es efectiva en la posición más habitual de la cabeza, cuando se mira directamente hacia el frente la vertical del centro de gravedad de la cabeza es anterior al eje de los cóndilos. En este caso, la cabeza mantiene el equilibrio sobre la columna vertebral mediante un mínimo esfuerzo de los músculos de la nuca. Por el contrario, cuando la cabeza se inclina posteriormente, la vertical de su centro de gravedad es posterior al eje de los cóndilos y el equilibrio de la cabeza se mantiene gracias a la contracción de sus músculos flexores.

El plano Horizontal Vestibular permite determinar la posición fisiológicamente normal de la cabeza en el espacio. Este plano fisiológico es aquel en el cual la mirada puede explorar el suelo durante la marcha en búsqueda de alimento. En este caso la cabeza debe ser sostenida activamente por acción de los músculos de la nuca lo cual no ocurre en el plano de la cabeza que se levanta para mirar a lo lejos, que es cuando se necesita un menor gasto de energía.

1.2.4.2. Movimientos de la cabeza sobre la columna vertebral

La cabeza puede ejecutar tres tipos principales de movimientos. Movimiento de flexión y de extensión, movimiento de inclinación lateral y movimientos de rotación.

- Movimiento de flexión y de extensión: estos movimientos se localizan en las articulaciones Atlanto-occipitales y se efectúan en torno a un eje transversal que pasa por el centro de curvatura de los cóndilos occipitales.

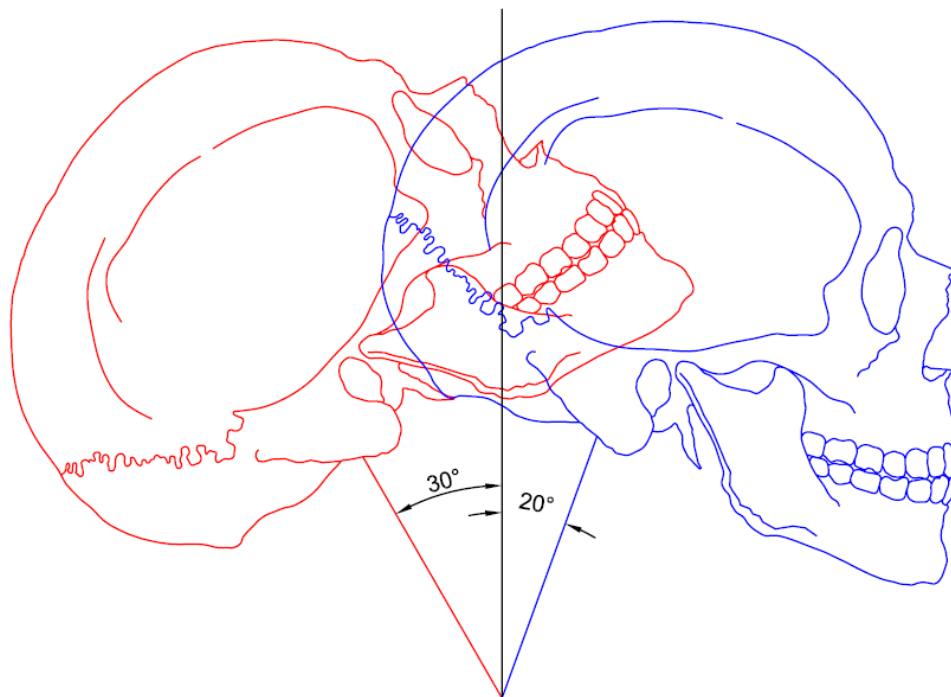
En la flexión, el mentón desciende hacia el tórax, la extensión produce el movimiento inverso, la amplitud del movimiento de flexión es de 20 grados, la del movimiento de extensión es de 30 grados; por tanto, la amplitud total es de 50 grados, como puede observarse en la figura 23; no obstante, los movimientos de flexión y de extensión de la cabeza pueden ser más amplios, en la flexión extrema de la cabeza, el mentón puede llegar a ponerse en contacto con el pecho, en ese caso, una gran parte del movimiento se realiza en las articulaciones de todas las vértebras cervicales.

- Movimientos de inclinación lateral: los movimientos se realizan en las mismas articulaciones atlanto-occipitales. Se efectúan en torno a un eje medio antero-posterior que pasa por el centro de curvatura transversal de los dos cóndilos.

Los cóndilos occipitales representan, en efecto, los segmentos de una misma esfera maciza, que se deslizan en los segmentos análogos de una esfera hueca; las caras articulares superiores del atlas.

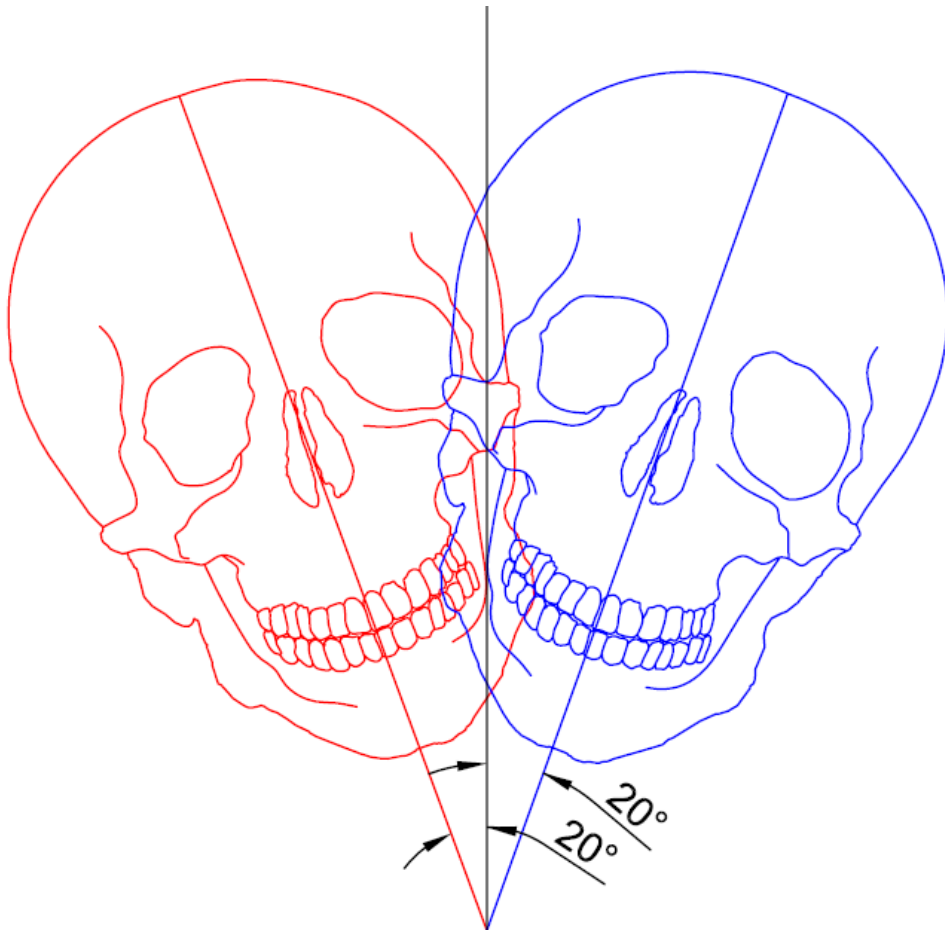
La amplitud máxima del movimiento de inclinación lateral de un solo lado, localizado en las articulaciones atlanto-occipitales, es de 20 grados. Está limitada por la tensión de las membranas atlanto-occipitales, la membrana tectoria y el ligamento alar del lado opuesto, cuando el movimiento de inclinación es más acentuado, es ejecutado por toda la columna cervical.

Figura 23. **Ángulo máximo de flexión y extensión**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2014.

Figura 24. **Ángulo máximo de rotación lateral**

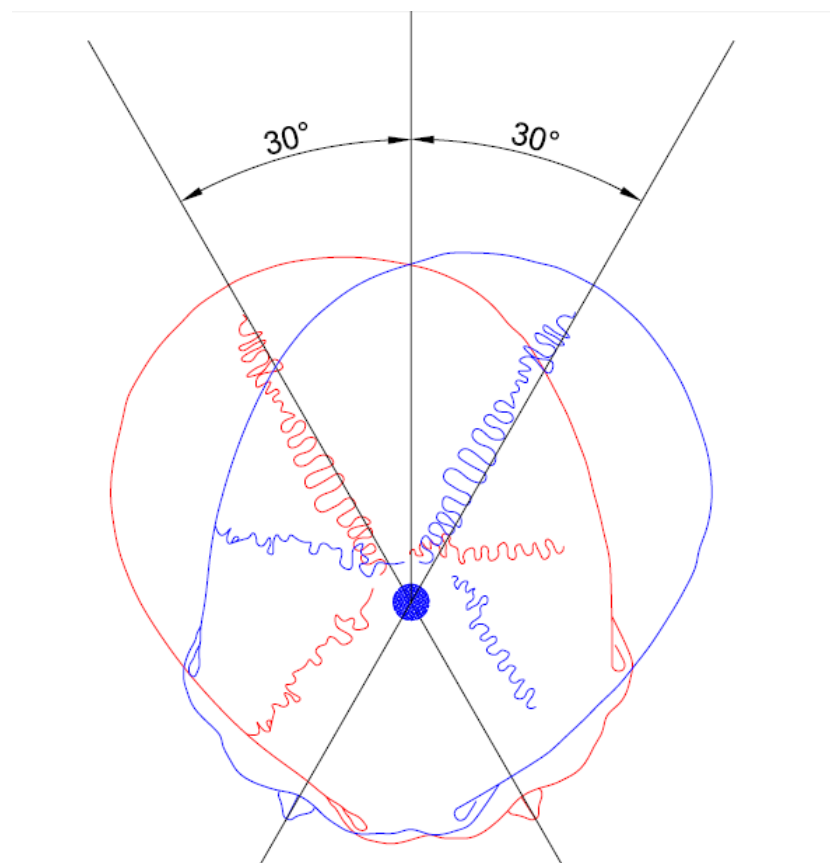


Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2014.

Los movimientos de inclinación lateral y los movimientos de flexión y de extensión pueden producirse también en las articulaciones Atlanto-axiales laterales; no obstante, estos movimientos son de extensión limitada.

- Movimientos de rotación: se localizan en las articulaciones Atlanto-axiales medias y laterales. En los movimientos de rotación, el atlas, que arrastra consigo la cabeza, gira sobre el axis alrededor de un eje vertical que pasa por el diente del axis.

Figura 25. **Ángulo de rotación de la cabeza**



Fuente: elaboración propia, con programa AutoCAD 2014.

Las masas laterales del atlas se deslizan en sentido inverso sobre las caras articulares superiores del axis, en este movimiento, el atlas no se mantiene en un mismo plano horizontal.

Las superficies opuestas en las articulaciones atlanto-axiales laterales son arriba convexas y, cuando la cara se halla orientada anteriormente, estas superficies entran en contacto por su parte más saliente.

Cuando se realizan los movimientos de rotación, una de las masas laterales se dirige anteriormente, se desliza sobre la vertiente anterior de la superficie axial convexa y, en consecuencia, desciende un poco; la otra masa lateral es desplazada posteriormente, se desliza sobre la vertiente posterior de la convexidad axial y se abate del mismo modo.

El abatimiento máximo que puede experimentar el atlas se mide por la distancia vertical que separa el punto más saliente del punto más deprimido de la superficie axial es aproximadamente de 2 milímetros. El movimiento del atlas sobre el axis es un movimiento de tornillo, que consiste en una progresión ascendente o descendente. La mayor amplitud del movimiento de rotación de un lado, ejecutado por las articulaciones del atlas con el axis, no excede los 30 grados. Sin embargo, el movimiento de rotación de la cabeza puede alcanzar aproximadamente 80 grados a la derecha y a la izquierda. En este caso, la mayor parte de la columna vertebral participa en el movimiento.

1.3. Cinemática

La cinemática es el estudio del movimiento de los cuerpos rígidos sin tener en cuenta otras fuerzas relevantes. La cinemática de la columna describe los movimientos fisiológicos y patológicos que se producen en las distintas unidades vertebrales. La unidad tradicional de estudio en la cinemática es el segmento móvil o la unidad funcional vertebral. Como se describió previamente, cada segmento móvil consiste en dos vértebras adyacentes y sus tejidos blandos interpuestos.

La medición de su biomecánica básica implica la aplicación de fuerzas a un cuerpo vertebral y la medición inmediata de los movimientos que se producen. Los movimientos pueden ser tanto rotacionales como de traslación. Un grado de libertad se define como un movimiento en el que un cuerpo rígido puede trasladarse hacia atrás y hacia adelante o a lo largo de una línea recta o rotar alrededor de un eje en particular. Así, cada cuerpo vertebral puede tanto trasladarse o rotar en cada uno de los tres planos ortogonales para un total de seis grados de libertad (figura 26).

Cuando tanto la rotación o la traslación de un cuerpo a lo largo de un eje se asocian consistentemente con una rotación o traslación simultánea a lo largo de otro eje, los movimientos se acoplan. Los movimientos acoplados se expresan normalmente como desplazamientos en las direcciones X, Y o Z y como rotaciones alrededor de los tres ejes ortogonales.

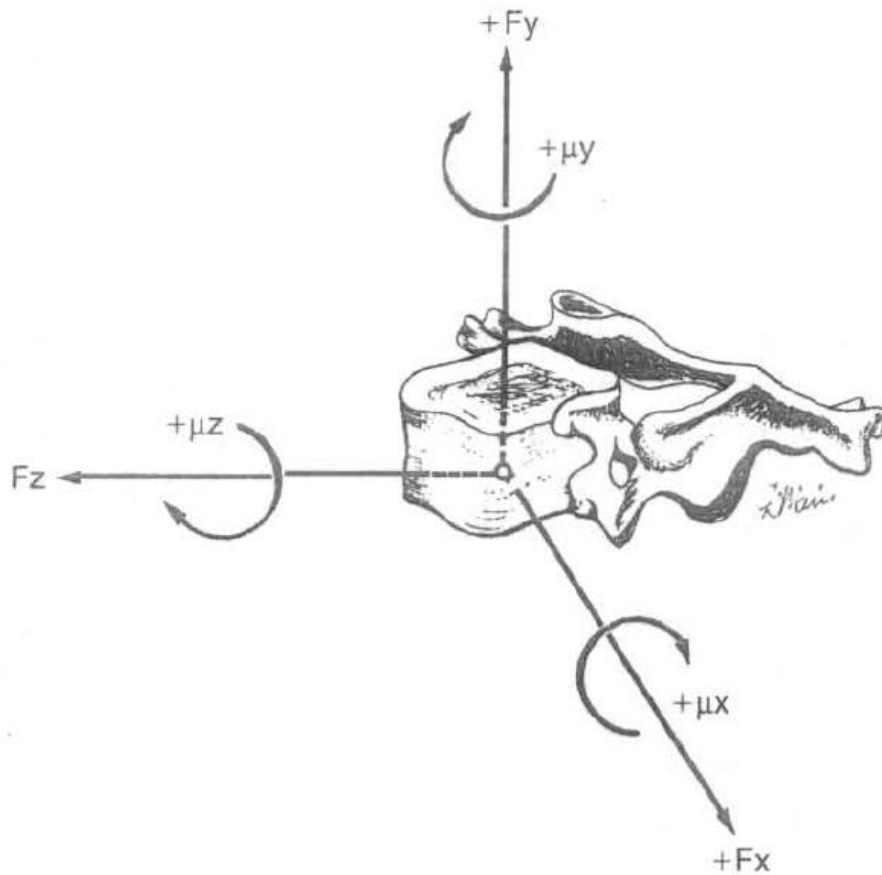
Un más profundo análisis que implique columnas vertebrales completas es más complejo y mientras siga aportando resultados interesantes, el análisis del segmento móvil es importante para su comprensión básica.

1.3.1. Rango de movimiento

Las mediciones del rango de movimiento cervical se basan en estudios radiográficos o investigaciones *post mortem*.

Los inclinómetros y distintos equipos optoelectrónicos y electromagnéticos usados clínicamente para la evaluación no invasiva del movimiento de la columna cervical no son tan precisos; en particular el movimiento acoplado se cuantifica pobremente. El rango establecido de rotación axial activa hacia un lado en C1 y C2 es de 27 a 49 grados.

Figura 26. **Ilustración de los seis grados de libertad que posee una vértebra**



Fuente: NORDIN, Margareta. *Biomecánica básica del sistema Músculo-esquelético*. p. 308.

Aproximadamente 90 grados de rotación axial tienen lugar en la columna cervical subaxial (C3-C7), alrededor de 45 grados a cada lado desde la posición neutra. Incluso es posible una mayor inclinación lateral: aproximadamente 49 grados hacia cada lado desde la posición neutra, proporcionando un total de alrededor de 98 grados. El rango de flexión y extensión es aproximadamente 64 grados; alrededor de 24 grados de extensión y 40 grados de flexión.

El movimiento en cada plano está uniformemente distribuido a lo largo de los segmentos móviles. El rango total medio de la traslación antero-posterior en los segmentos móviles espinales subaxiales es 3,5 +/- 0,3 milímetros dividido desigualmente; 1,9 milímetros para la cizalla anterior y 1,6 milímetros para la cizalla posterior.

La carga de cizalla lateral causa un rango total promedio de movimiento lateral de 3,0 milímetros +/- 0,3 milímetros, dividido igualmente entre la derecha y la izquierda; la tensión provoca 1,1 milímetros de distracción y la compresión, 0,7 milímetros de pérdida de altura vertical.

La gran flexibilidad de la columna cervical permite a la cabeza posicionarse en una amplia variedad de formas, permitiéndole a uno, con idéntica facilidad, contemplar un avión por encima de la cabeza, echar un vistazo por encima del hombro o buscar un objeto por debajo de una mesa. Un análisis del movimiento combinado de la columna cervical usando el electrogoniómetro produjo un destacable rango de movimiento: 122° +/- 18° de flexión y extensión, 144° +/- 20° de rotación axial y 88° +/- 16° de inclinación lateral. Todos los movimientos primarios se reducen con la edad. El sexo no tiene influencia en el rango de movimiento cervical.

1.3.1.1. Cinemática anormal

La cinemática anormal generalmente se refiere al movimiento excesivo dentro de las unidades espinales funcionales; sin embargo, la cinemática anormal puede también referirse a patrones atípicos de movimiento como el acoplamiento anormal o un movimiento paradójico. El movimiento paradójico se ve cuando el patrón global del movimiento de un lado de la columna es en una dirección mientras que el patrón local es en la dirección opuesta.

Por ejemplo, la flexión paradójica se ve cuando se produce la flexión en una única unidad espinal funcional, aunque la columna se extienda globalmente. Estos tipos de movimientos anormales describen un patrón de movimiento conocido como inestabilidad.

1.3.1.2. Estabilidad espinal

El concepto de estabilidad espinal es una noción intrigante y a veces confusa. A los médicos se les pide frecuentemente que revisen una serie de radiografías para determinar si la columna es estable. Exactamente ¿Qué es estabilidad?, ¿cómo se determina? Y, ¿qué sucede si no está presente? El término estabilidad espinal ha adquirido diferentes significados, dependiendo del contexto en el que se emplee. White y Panjabi “describen el término clínicamente como la pérdida de la habilidad de la columna bajo cargas fisiológicas para mantener su patrón de desplazamiento de modo que no haya déficit neurológico inicial o adicional, ni deformidad importante ni dolor incapacitante”¹ (1990).

Usando esta definición, las cargas fisiológicas son aquellas que se producen durante las actividades normales y no se considera el dolor como incapacitante si se puede controlar con medicamentos que no contengan narcóticos.

La estabilidad está condicionada por muchos factores. Hay diferentes consideraciones anatómicas en las diferentes regiones de la columna. Ciertamente, la anatomía ligamentaria desempeña un gran papel en la estabilidad de la columna, al igual que los elementos musculares y óseos.

¹ White A.: Clin. Orthop. 1970, 120:85

Se puede analizar la inestabilidad considerando la inestabilidad cinemática y la inestabilidad estructural o de algún componente. La inestabilidad cinemática se centra tanto en la cantidad de movimientos (demasiado o poco) como en la calidad del movimiento presente (alteraciones en el patrón normal) o en ambas.

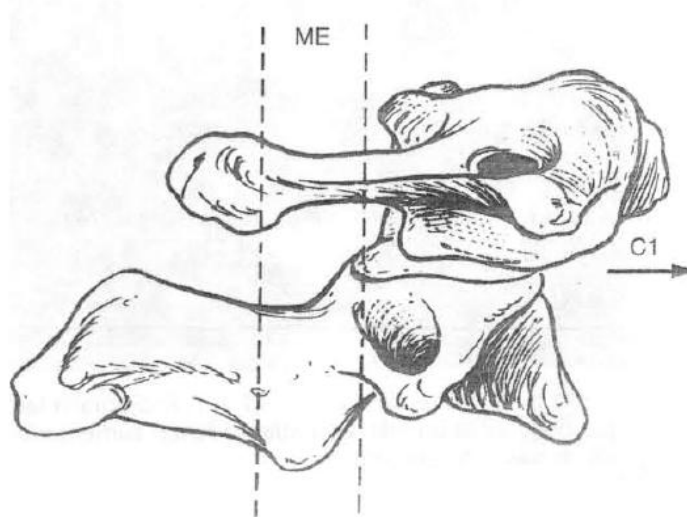
Las sinartrosis entre los cuerpos vertebrales confían su estabilidad al inmensamente fuerte anillo fibroso. Las articulaciones apofisarias diartrodias son estabilizadas por la capsula, por los ligamentos interespinoso y supraespinoso y por los ligamentos amarillos. Este grupo de ligamentos se llaman el complejo ligamentario posterior. La estabilidad de la columna depende en gran medida de este complejo.

1.3.1.3. Complejo occipito–atlantoaxial

El ligamento transversal del atlas completa la cubierta en la que se inserta el diente. El ligamento permite rotar al diente, pero limita su traslación anterior. El ligamento es inelástico y no permitirá más de 2 o 3 milímetros de subluxación anterior de la primera sobre la segunda vértebra. El desplazamiento anterior de C1 sobre C2 de 3 a 5 milímetros es normalmente indicativo de una ruptura del ligamento transversal, mientras que desplazamientos de 5 a 10 milímetros sugieren el daño de algún ligamento adicional; un desplazamiento mayor de 10 milímetros se produce con la ruptura de todos los ligamentos.

Las traslaciones o desplazamientos anteriores de C1 sobre C2 se valoran radiográficamente midiendo la distancia desde el anillo anterior del atlas a la parte posterior del diente (figura 27). La subluxación posterior del atlas se puede producir sólo si se fractura el diente o si hay diente hipoplástico.

Figura 27. **Desplazamiento de C1 sobre C2**



Fuente: NORDIN, Margareta. *Biomecánica básica del sistema Músculo-esquelético*. p. 313.

1.3.1.4. Columna cervical subaxial

La musculatura de la columna y los discos intervertebrales son las estructuras anatómicas más significativas a la hora de proporcionar la estabilidad cervical. Asimismo, se destaca la importancia de los ligamentos supraespinoso e interespinoso además de los ligamentos nucales.

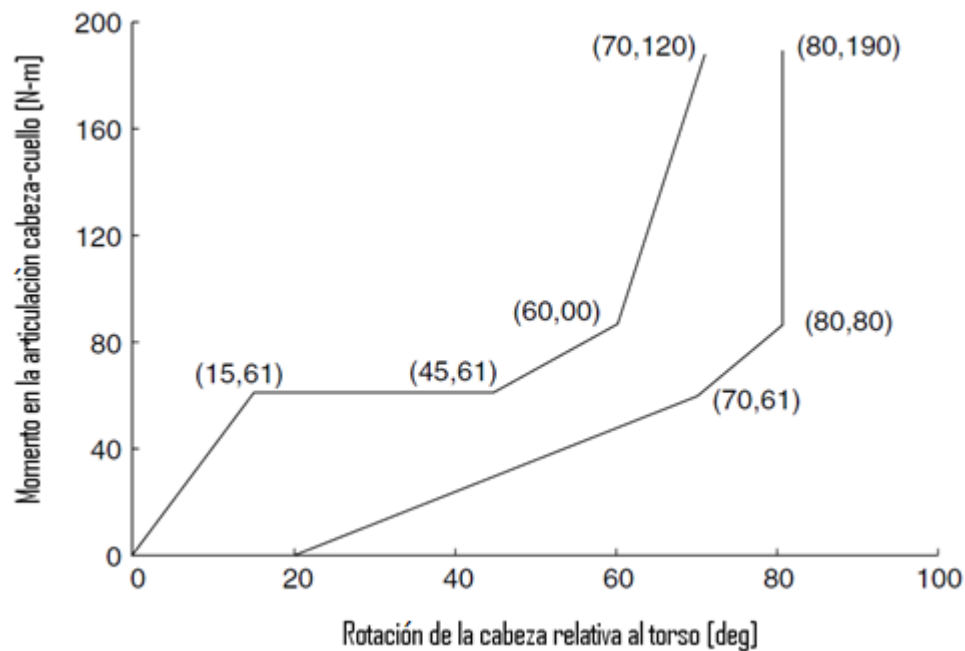
Se piensa que el ligamento nual desempeña un papel principal en la propiocepción y correcto funcionamiento de los músculos para-vertebrales. La sección secuencial experimental de los ligamentos tanto de anterior a posterior como de posterior hacia anterior sugiere que si una unidad espinal funcional tiene todos sus elementos anteriores más una estructura adicional o todos sus elementos posteriores más una estructura anterior intacta permanecerá estable bajo condiciones de carga fisiológica normal.

Para proporcionar algún margen clínico de seguridad, cualquier segmento móvil debería ser considerado inestable si todos los elementos anteriores o todos los elementos posteriores están destruidos o son incapaces de cumplir su función.

1.4. Cargas máximas y mecanismos de lesión del cuello

En esta sección se estudian las capacidades del cuello para soportar cierto tipo de esfuerzos, desde la respuesta mecánica del cuello ante perturbaciones de sus funciones normales, hasta la forma en la cual se puede lesionar si se lleva más allá de sus límites fisiológicos.

Figura 28. Respuesta del cuello en flexión



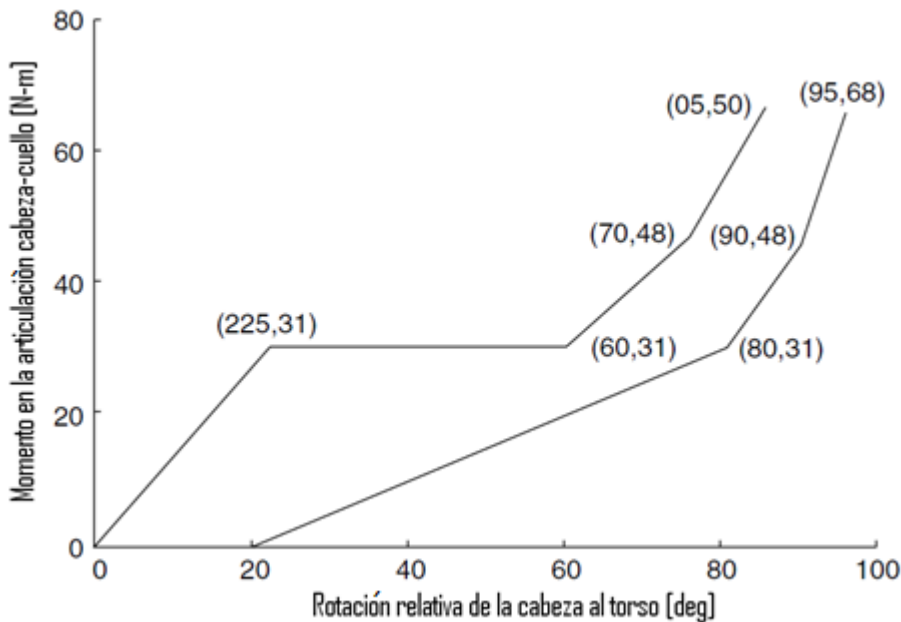
Fuente: PETERSON, Donald R. *Biomechanics principles and applications*. p. 6-5.

1.4.1. Respuesta mecánica del cuello

La respuesta mecánica de las vértebras cervicales fue estudiada por Mertz y Patrick (entre otros), quienes cuantificaron la respuesta en términos de la rotación relativa de la cabeza con respecto al torso como una función del momento de flexión de los cóndilos occipitales. Los ensayos de carga se realizaron en flexión y extensión, y se muestran en la figura 28 y figura 29 respectivamente.

Los datos mostrados en las gráficas fueron tomados de ensayos realizados con voluntarios para la región de bajo esfuerzo y para los esfuerzos más altos se tomaron los datos utilizando maniqués.

Figura 29. Respuesta del cuello en extensión



Fuente: PETERSON, Donald R. *Biomechanics principles and applications*. p. 6-5.

El principal mecanismo de lesión del cuello se da durante los accidentes automovilísticos, así mismo, caídas pueden ser un mecanismo importante de lesión y no menos importante resultan las lesiones por la realización de actividades cotidianas, como por ejemplo, permanecer sentado mucho tiempo en posición incómoda frente a la computadora.

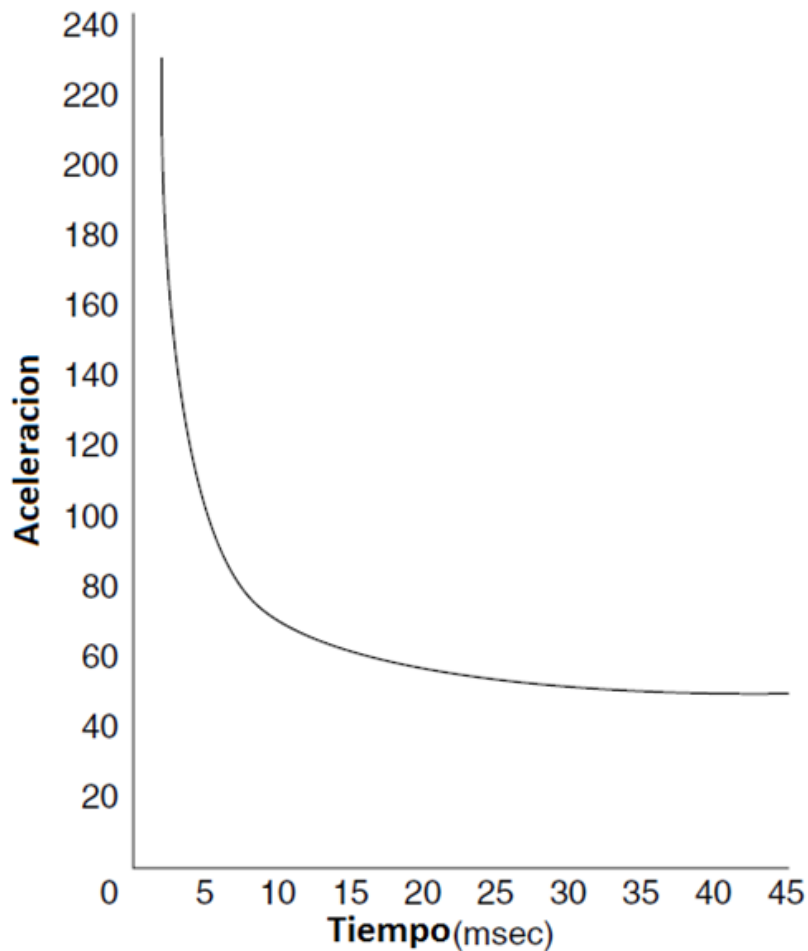
Actualmente, no existen valores de tolerancia universalmente aceptados para los distintos tipos de lesiones del cuello, pues existen diferentes mecanismos de lesión y de diferentes niveles de gravedad. La gravedad de las lesiones oscila desde las más peligrosas que atentan contra la vida del paciente, en las cuales se causa daño sobre la médula espinal, hasta lesiones menores sobre el tejido blando, las cuales no pueden ser identificadas utilizando radiografías o resonancia magnética.

1.4.2. Tolerancia de la cabeza

Como es de esperarse, el parámetro que produce más lesiones en la cabeza y en el cuello y por lo tanto, el más medido es la aceleración. Es por lo tanto natural expresar la tolerancia humana a las lesiones en función de la aceleración.

El primer estudio realizado de la respuesta humana a la aceleración fue la Curva de Tolerancia de Wayne State, proporcionada por Lissner en 1960 y subsecuentemente modificada por Patrick en 1965 (figura 29), adicionando datos de animales y de voluntarios a los datos originales de los cadáveres. Esta curva muestra la capacidad que posee la cabeza de resistir distintas aceleraciones en función del tiempo.

Figura 30. **Curva de Tolerancia de Wayne State**



Fuente: PETERSON, Donald R. *Biomechanics principles and applications*. p. 6-9.

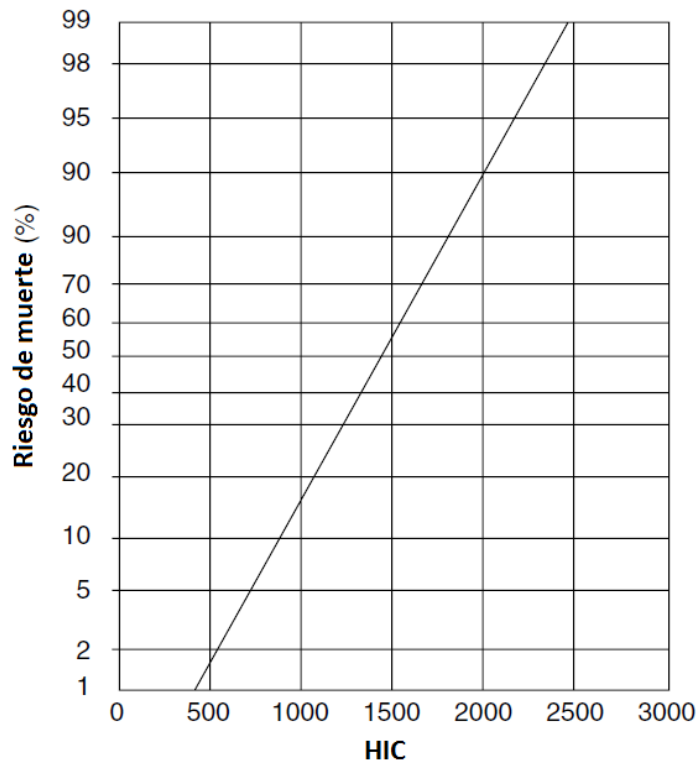
La cabeza es capaz de resistir altas aceleración por intervalos cortos de tiempo y una sobreexposición representa daños. Cuando la curva se traza en una escala logarítmica, esta se vuelve una línea recta con una pendiente de -2,5.

Esta pendiente fue utilizada como exponente por Gadd en 1961 en su propuesta del índice de gravedad, conocido como GSI o Índice de Gravedad de Gadd, por sus siglas en inglés (*Gadd Severity Index*).

$$GSI = \int_0^T a^{2.5} dt$$

Donde a es la aceleración instantánea de la cabeza y T es la duración del impulso. Si la integral excede el valor de 1 000, se tiene un daño severo.

Figura 31. **Valores de HIC versus riesgo de muerte**



Fuente: PETERSON, Donald R. *Biomechanics principles and applications*. p. 6-9.

Una modificación de la GSI se conoce como HIC o Criterio de Lesión de la Cabeza (Head Injury Criterion), propuesto por Versace en 1970 para identificar la región en donde se produce más daño en la cabeza en la curva del impulso de aceleración, encontrando el valor máximo de la siguiente integral.

$$HIC = (t1 - t2) \left[(t1 - t2)^{-1} \int_{t1}^{t2} a(t) dt \right]^{-2.5}$$

Donde $a(t)$ es la aceleración instantánea de la cabeza, y $t1 - t2$ es el intervalo en donde el HIC es máximo. En la figura 31 se aprecia la gráfica de valores de HIC contra riesgo de muerte. Al alcanzar un valor de HIC de 1 000, se calcula que aproximadamente el 16 % de la población sufre heridas severas o fatales, por tal motivo, este criterio es utilizado para el diseño de los equipos de seguridad en los vehículos y equipos de protección de la cabeza.

2. SENSORES MICROELECTROMECA'NICOS MEMS

Construir dispositivos a peque'ñas escalas durante mucho tiempo ha sido un reto y una motivaci3n para la ingenieria, ya sea por razones cientificas o esteticas. Durante el siglo XX el surgimiento de los dispositivos electronicos tuvo un gran impacto en la vida diaria, antes de la concepci3n del transistor los dispositivos electronicos estaban basados en el tubo al vacio inventado en 1906 por Lee de Forest, el transistor fue un gran salto hacia adelante en la reducci3n del tama'no, requerimientos de energa y portabilidad de los dispositivos electronicos.

A mediados del siglo XX, los dispositivos electronicos se empezaron a producir a gran escala para su utilizaci3n como componentes individuales (por ejemplo, tubos al vacio, conmutadores, resistores y capacitores). Sin embargo, todos los dispositivos electronicos contruidos con base en estos componentes consumian mucha potencia y su proceso de fabricaci3n tenia costos demasiado elevados. La fiabilidad de estos dispositivos tambi3n era pobre debido a la gran cantidad de componentes necesarios.

La obra maestra de esta tecnologa se resume en la primera computadora digital, la ENIAC (*electronic numerical integrator and computer*); computadora que fue desarrollada por la Universidad de Pennsylvania por orden del departamento de la defensa para la realizaci3n de c3lculos balisticos. La necesidad de la ENIAC demostr3 la importancia de las computadoras para asistir el desarrollo de las ciencias y la ingenieria, las cuales se encontraban emergiendo a gran velocidad.

Sin embargo, la ENIAC consistía en miles de dispositivos electrónicos, los cuales necesitaban ser reemplazados frecuentemente, consumían gran cantidad de potencia y perdían demasiado calor.

Una gran cantidad de eventos clave ocurrieron durante 1950 lo que motivo el desarrollo de la electrónica a un mayor ritmo, más allá del transistor semiconductor. El desarrollo del transistor de silicio de tecnología planar y su proceso de fabricación, colocaron el escenario y los equipos para el desarrollo de los dispositivos integrados monolíticos sobre un solo substrato a pequeñas escalas. El desarrollo de esta tecnología para la manufactura de circuitos integrados inicio la revolución de la microelectrónica, la cual continuó con la producción de dispositivos microelectrónicos cada vez más y más pequeños.

La tecnología de los dispositivos micro-electromecánicos o MEMS, (acrónimo inglés de Micro ElectroMechanical Systems) también conocida como tecnología de microsistemas en Europa MST (Micro Systems Tecnology) fue inspirada por el desarrollo de la revolución de la microelectrónica y la visión del Dr Feynman. MEMS y MST fueron concebidos debido a las necesidades comerciales y tecnológicas surgidas a finales del siglo XX. El desarrollo de la tecnología MEMS utiliza en su mayoría los materiales y métodos desarrollados para la microelectrónica. La tabla I, es una línea de tiempo histórica con algunos de los eventos clave en el desarrollo de la tecnología MEMS.

La tecnología MEMS es el resultado de una larga historia de desarrollo de tecnología iniciado con el desarrollo del transistor y el inicio de su utilización para reemplazar el tubo al vacío en las aplicaciones electrónicas en los 50 seguidos del desarrollo de máquinas y mecanismos desarrollados a través de la llegada de la microelectrónica.

En los primeros días del desarrollo del transistor, las propiedades piezoresistivas de los materiales semiconductores empezaban a ser investigadas. Este avance proporcionó el vínculo entre los materiales electrónicos y los transductores mecánicos. Este vínculo fue explotado tempranamente en la línea de tiempo del desarrollo de los MEMS para crear celdas de carga y sensores de presión. Las escalas a las que se desarrollan los dispositivos MEMS van desde unos pocos milímetros hasta dimensiones en nanómetros.

Básicamente los sistemas microelectromecánicos, son híbridos entre sensores y actuadores a pequeña escala, que utilizan tanto dispositivos eléctricos y electrónicos, como dispositivos mecánicos, es decir, se trata de máquinas completas que pueden realizar una tarea específica. Estos sistemas pueden incluir microprocesadores, amplificadores, motores, electroválvulas, pistones, engranajes, resortes y fuentes de poder, las cuales proporcionan la energía necesaria para llevar a cabo su tarea.

El amplio rango de aplicaciones que pueden cubrir los MEMS van desde aplicaciones para automóviles, *Smart phones*, computadoras portátiles, entre otros. Por ejemplo, se puede utilizar el acelerómetro para detectar impactos y activar las bolsas de aire en los vehículos o el mismo dispositivo para detectar la caída de las computadoras, para que esta pueda autoprotgerse y en el caso de los teléfonos inteligentes, para detección de movimiento para un sinnúmero de aplicaciones ya conocidas por los usuarios. Así mismo, los dispositivos MEMS se utilizan en investigaciones en biología, ingeniería Genética, Medicina, ya que permiten la manipulación de objetos a nivel celular.

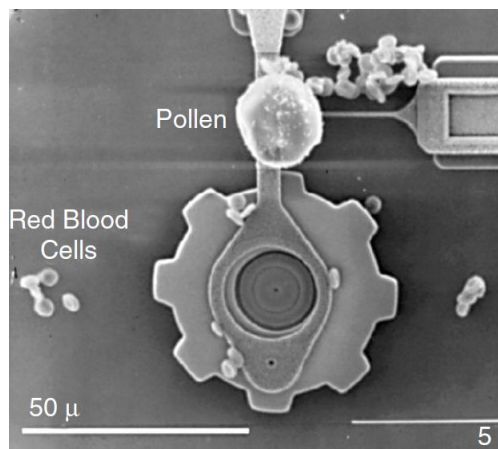
Tabla I. **Eventos clave para la evolución de la microelectromecánica**

	Evento
1947	Desarrollo de la ENIAC
1947	Invención del transistor bipolar
1954	Estudio del efecto piezoresistivo
1958	Primer celda de carga de silicio comercial
1959	Proceso de fabricación planar para microelectrónica
1960	Richard Feynman premiado por el desarrollo de un motor eléctrico menos de 1/64 de pulgada
1961	Se demuestra el uso del silicio en sensores de presión
1965	Se enuncia la Ley de Moore
1979	desarrollo de la boquilla micromecanizada para inyección de tinta
1982	Se utiliza el silicio como material mecánico
1982	Transductor desechable de presión sanguínea
1985	Richard Feynman premiado por producir texto a una escala 1/25,000
1986	desarrollo del proceso LIGA
1991	desarrollo de la bisagra de polisilicio
1993	primer acelerómetro comercial
1996	primer procesador digital de luz comercial
2002	introducción del giroscopio

Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 5.

De igual forma en la industria, en el caso de sensores de presión, celdas de carga y para sistemas de navegación. En las figuras de la 32 a la 34 muestra los alcances que han tenido los dispositivos MEMS en la actualidad.

Figura 32. **Comparación de escalas de los MEMS con materiales biológicos (polen y glóbulos rojos)**



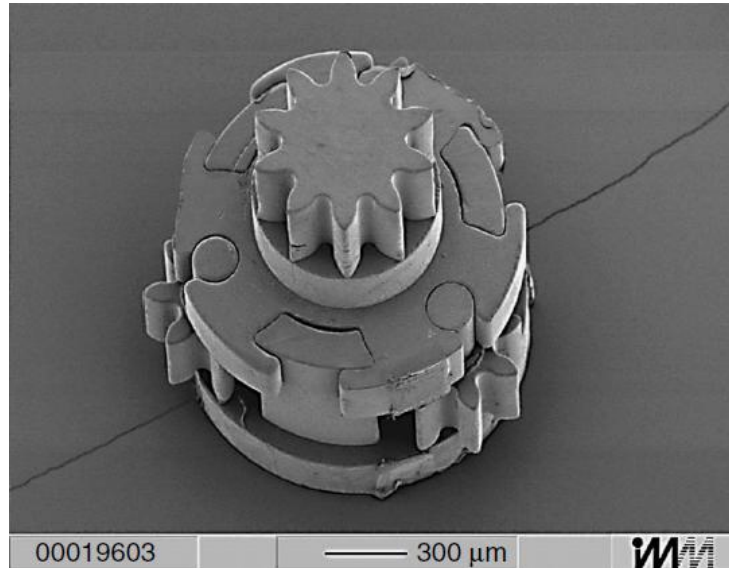
Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 9.

Figura 33. **Robot móvil creado con tecnología MEMS, incluye motor, control y su fuente de poder**



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 11.

Figura 34. **Arreglo de engranajes planetarios construido con tecnología MEMS**



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 83.

2.1. Materiales

Los dispositivos MEMS y sus estructuras son fabricados utilizando los procesos y técnicas convencionales para la fabricación de circuitos integrados, tales como: litografía, deposición y grabado, junto a una amplia gama de técnicas de micromecanizado especialmente desarrolladas para esta tecnología. Las técnicas tomadas de la industria de circuitos integrados son en esencia bidimensionales y el control sobre los parámetros tridimensionales sólo se logra por el apilamiento de varias capas bidimensionales, las cuales generalmente son obleas de silicio.

Sin embargo, proceder de esta forma presenta límites prácticos y económicos, principalmente porque el número de capas que pueden apilarse se encuentra limitado, así mismo, como la capacidad de conseguir ciertas formas tridimensionales.

Las técnicas de micromaquinado permiten estructuras que pueden extenderse hacia las tres dimensiones, sin embargo, se debe tener en cuenta que estas estructuras son simples extrusiones de las láminas bidimensionales o se encuentran gobernadas por las propiedades de la estructura cristalina del material. En general, el desarrollo de los dispositivos MEMS se auxilia en varias tecnologías para conseguir su objetivo, dependiendo de la aplicación. El principal material para la construcción de estos dispositivos es el silicio, sin embargo, también se utilizan metales como el cobre, el aluminio, el oro entre otros, además de polímeros, vidrio y cuarzo.

2.1.1. Silicio

La inmensa mayoría de dispositivos semiconductores se fabrican con silicio monocristalino. El silicio es el segundo elemento más abundante de la corteza terrestre por detrás del oxígeno, representa el 28 % de la corteza terrestre. Se obtiene a partir de la sílice SiO_2 mediante un proceso de reducción y purificación. Posteriormente, mediante un proceso de cristalización se obtiene el silicio monocristalino.

El proceso de obtención del silicio monocristalino consta de cinco etapas. En primer lugar se reduce la sílice de la arena a altas temperaturas en presencia de carbono. Se obtiene así silicio muy impuro.

En una segunda etapa, se hace reaccionar este silicio con cloro para obtener triclorosilano SiHCl_3 que es un compuesto líquido, que se puede conseguir en alto grado de pureza mediante un proceso de destilación fraccionada.

Este triclorosilano ultra puro es descompuesto térmicamente a 1 000 grados Celsius en atmósfera de hidrógeno y se obtiene silicio policristalino ultra puro. La última etapa del proceso consiste en obtener un mono cristal de silicio a partir de este silicio policristalino. Existen dos técnicas básicas para conseguirlo: el método Czochralski y el método de zona flotante.

2.1.1.1. Método Czochralski

Este método consiste en fundir el silicio monocristalino en un crisol. En el extremo inferior de un soporte vertical se coloca un pequeño cristal de silicio, denominado simiente cristalina, que se pone en contacto con el silicio fundido, justo en la superficie del crisol se imprime un movimiento de giro y lenta elevación al soporte vertical.

La simiente cristalina se funde un poco cuando hace contacto con el silicio fundido, pero al hacerla girar se consigue que los átomos de silicio fundido vayan agrupándose a su alrededor y al enfriarse por dejar de estar en contacto directo con el silicio fundido debido al movimiento de elevación del soporte, vayan fijándose en las posiciones que determina la simiente cristalina, de forma que los nuevos átomos de silicio van continuando la estructura cristalina de la simiente. Se obtiene, por este método un lingote cilíndrico de silicio monocristalino, de unos 15 centímetros de diámetro y algunos metros de altura.

2.1.1.2. Método de Zona Flotante

Este método parte de una columna vertical de silicio policristalino sujeta en sus extremos por dos soportes. Una bobina de una espira, por la que circula una corriente de radiofrecuencia, rodea dicha columna y produce una fusión localizada del silicio en la columna en la sección de la bobina.

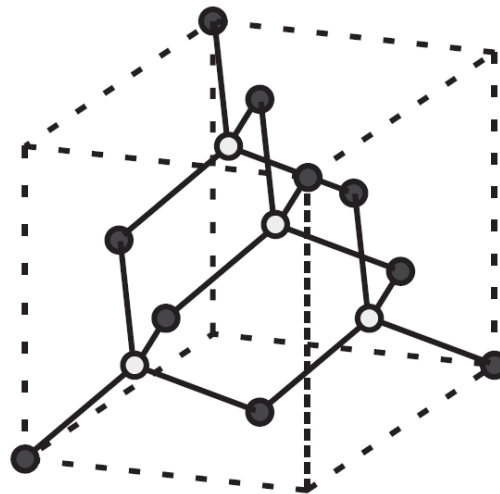
Esta bobina se puede desplazar verticalmente a lo largo de toda la extensión de la columna de silicio. La bobina empieza a fundir el silicio del extremo inferior en la que hay un simiente cristalino como en el caso anterior y al subir lentamente provoca que la zona fundida del centro de la bobina vaya desplazándose hacia arriba. Al desplazarse la bobina, la zona fundida que queda por debajo de la bobina recristaliza siguiendo una estructura monocristalina. La zona fundida queda por tanto, flotante entre dos zonas sólidas.

El silicio tiene la propiedad que los átomos de impureza prefieran la fase líquida a la sólida, por lo que, el proceso de cristalización va acompañado de otro de purificación.

El lingote monocristalino conseguido de esta forma suele contener menos impurezas que el logrado por el método de Czochralski. Finalmente, el cilindro monocristalino obtenido es cortado en discos u obleas de unos 350 micrómetros de espesor, que es el material de partida para la fabricación de dispositivos y circuitos integrados.

Para fabricar un dispositivo se requiere un conjunto de operaciones y procesos básico que permiten crear regiones N y P dentro de un mismo cristal, depositar capas aislantes y conductoras sobre la superficie del silicio, eliminar estas capas en unas regiones y conservarlas en otras; conectar mediante pistas metálicas las distintas partes de un dispositivo y estos entre sí, de forma que puedan construirse las estructuras deseadas.

Figura 35. **Estructura del cristal de silicio**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 8.

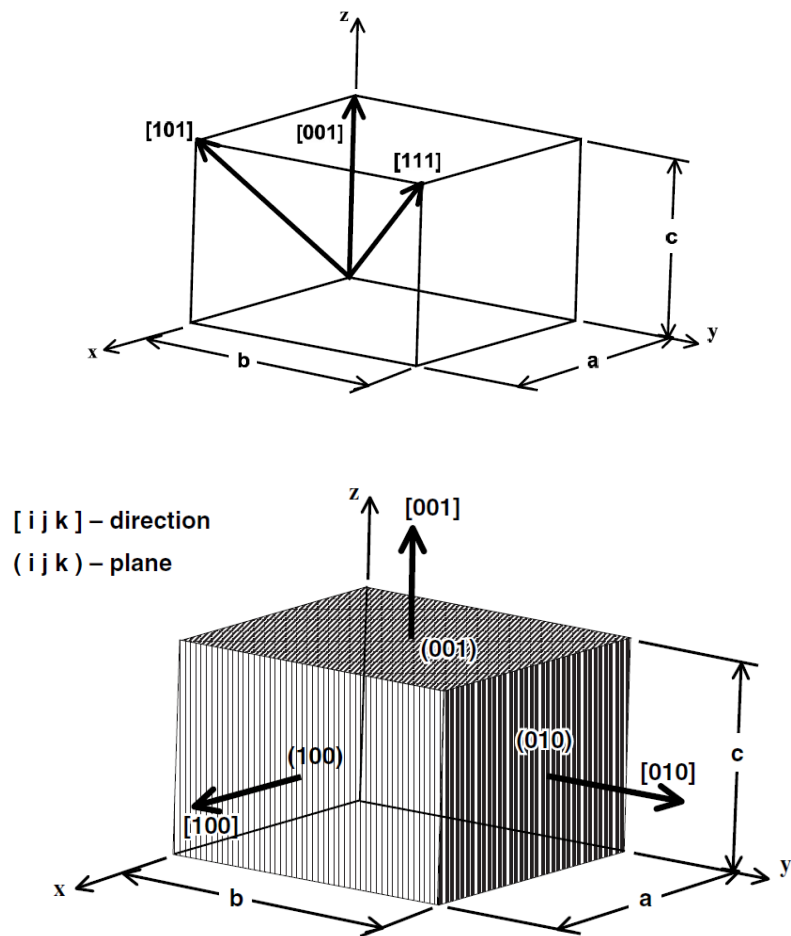
Las principales razones para hacer del silicio el material preferido en la construcción de dispositivos MEMS son las siguientes.

- Se trata de un material de alta pureza, barato y totalmente disponible
- Existe un gran número de técnicas accesibles para su proceso.

- Posee un gran potencial para su integración en circuitos de control y procesamiento de señales.

Entre otras razones, las propiedades físicas y mecánicas del silicio le dan una poderosa ventaja para su uso en sensores microelectromecánicos.

Figura 36. Índices de Miller y planos de las estructuras cristalinas



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 22.

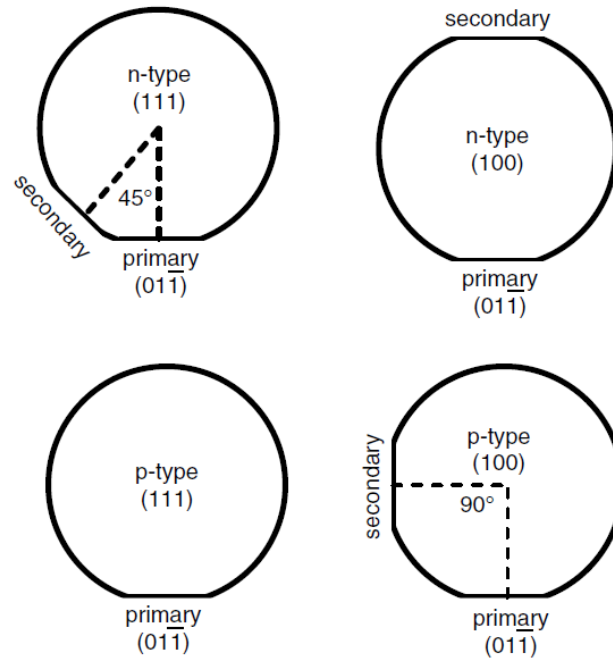
El silicio monocristalino o cristal de silicio posee una estructura de diamante, es decir, se trata de una red cúbica centrada en las caras con dos átomos asociados con cada punto de la estructura (uno sobre el vértice y otro en el punto $[\frac{1}{4}, \frac{1}{4}, \frac{1}{4}]$). La estructura cristalina se muestra en la figura 35. Los planos del cristal y sus respectivas direcciones se encuentran asignados por los Índices de Miller, como se muestra en la figura 36.

Cualquiera de los ejes principales del cubo pueden designarse como $[1, 0, 0]$ y sus planos respectivos planos perpendiculares se designan como $\{1, 0, 0\}$. Así mismo, los planos $\{1, 1, 1\}$ son perpendiculares a la dirección $[1, 1, 1]$, los cuales son paralelos a las diagonales del cubo. El silicio fabricado en masa generalmente posee orientaciones $\{1, 0, 0\}$ y $\{1, 1, 1\}$. Sin embargo, otras orientaciones pueden obtenerse de fabricantes especializados.

Esta orientación identifica el plano de la parte superior de la superficie de la oblea. Un primer corte se realiza en el borde de estas obleas en el plano $\{1, 1, 0\}$ y un segundo corte se realiza en otra dirección para indicar la orientación de la oblea y el tipo de material ya sea tipo P o tipo N, como se muestra en la figura 37; las impurezas agregadas al material le dan una resistividad entre 0,001 hasta 10 000 ohmios por centímetro.

Para el proceso común de fabricación de obleas, se tiene una resistividad típica de entre 10 y 30 ohmios-centímetro, lo que corresponde a un nivel de impurezas de aproximadamente 3×10^{14} centímetros⁻³ en material tipo N y de 9×10^{14} centímetros⁻³ para el material tipo P.

Figura 37. **Cortes estandarizados en las obleas de silicio**



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 29.

En la tabla II se muestran algunas de las propiedades del cristal de silicio. Se debe recordar que estas propiedades son anisotrópicas y por tanto, la orientación del plano de silicio se debe tomar en cuenta en el diseño de cualquier dispositivo mecánico.

En los últimos años, las obleas SOI (silicon on insulator) han llegado a tener alta demanda para su uso en aplicaciones MEMS, otros materiales utilizados en el micromaquinado son el vidrio, el cuarzo, la cerámica, los plásticos, los polímeros y los metales. El cuarzo y el vidrio son usados a menudo en los sensores microelectromecánicos; a continuación se hace una descripción de estos materiales.

Tabla II. **Propiedades del silicio cristalino**

Modulo de elasticidad	$7 \times 10^9 N/m^2$
Dureza Knoop	$850 kg/mm^2$
Modulo de Young en la dirección [100]	160 GPa
Relación de Poisson dirección [100]	0.28
Densidad	$2.33 g/cm^3$
Constante de red	5.435 Å
Coeficiente de expansión térmica	$2.6 \times 10^{-6} K^{-1}$
Conductividad térmica	$157 W/m \times K$
Calor específico	$0.7 J/g \times K$
Punto de fusión	1410 °C
Energía de la banda prohibida	1.12 eV
Constante dieléctrica	11.9
Rigidez dieléctrica	$3 \times 10^7 V/m$
Movilidad electrónica	$1450 cm^2/V \times s$
Movilidad de huecos	$505 cm^2/V \times s$

Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. P.9.

2.1.2. Cuarzo y vidrio

El cuarzo puede hallarse en su forma natural en minas, sin embargo, es más común producirlo de forma sintética. Estos cristales de cuarzo poseen una estructura trapezoidal y de igual forma que el silicio posee propiedades anisotrópicas y por lo tanto, es selectivo para el grabado de sus cristales en distintos planos.

Tabla III. **Propiedades mecánicas del vidrio y el pírex**

Propiedad	Cuarzo	Pírex
Modulo de Young	107 <i>GPa</i>	64 <i>GPa</i>
Relación de Poisson	0.16	0.20
Densidad	2.65 g/cm^3	2.33 g/cm^3
Constante dieléctrica	3.75	4.6
Co. de expansión térmica	$0.55 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$	$3.25 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Conductividad térmica	1.38 $\text{W}/\text{m} \times \text{K}$	1.13 $\text{W}/\text{m} \times \text{K}$
Calor específico	0.787 $\text{J}/\text{g} \times \text{K}$	0.787 $\text{J}/\text{g} \times \text{K}$
índice de refracción	1.54	1.47

Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.10.

A diferencia del silicio, sin embargo, esta propiedad del cuarzo más que una ventaja se considera una desventaja pues debido a esta propiedad se obtiene una pobre definición en los bordes de las estructuras. La propiedad del cuarzo que lo vuelve útil para su uso en los sensores MEMS es su propiedad piezoeléctrica. El cuarzo se utiliza para fabricar osciladores, giroscopios y acelerómetros.

El vidrio puede ser grabado en una solución de ácido hidrófluorhídrico y generalmente se une electrostáticamente al silicio para crear estructuras más complejas. Ambos, el fosfosilicato y el borosilicato de vidrio pueden usarse. Una de las formas más favorables de vidrio es el Pírex, el cual está compuesto de borosilicato con un coeficiente de expansión térmica de $3.25E-6$ [$1/C^\circ$], el cual es muy similar al silicio. Algunas de las propiedades del cuarzo y del Pírex se muestran en la Tabla III.

2.2. Técnicas de fabricación

Las técnicas utilizadas en MEMS consisten en una combinación de las técnicas convencionales desarrolladas para la fabricación de circuitos integrados y una variedad de técnicas desarrolladas específicamente para los dispositivos MEMS. Existen en esencia tres formas convencionales de procesamiento del silicio, la deposición, la litografía y el grabado. El proceso más común de deposición, incluye el proceso de crecimiento térmico de óxidos, deposición química de vapor, epitaxia, deposición física de vapor, difusión e implantación de iones.

Los tipos de litografía consisten principalmente en la que se realiza utilizando materiales fotosensibles y la que se realiza por medio de un haz de electrones y por último, el proceso de grabado se divide en grabado químico húmedo y grabado químico seco.

Muchas de estas técnicas convencionales han sido modificadas para su uso en MEMS. Por ejemplo, el uso de resinas fotosensibles, litografía en escala de grises o grabado profundo con iones reactivos.

Otros procesos y técnicas que no son usadas en el proceso convencional de la fabricación de circuitos integrados y que han sido desarrollados específicamente para MEMS incluyen micromaquinado de superficie, unión de obleas, galvanoplastia, LIGA (acrónimo alemán para Lithographie, Galvansgormung, Abformung), haz de iones para grabado y deposición, principalmente.

2.2.1. Deposición

El objetivo de este proceso es depositar capas de distintos materiales sobre una oblea de silicio, cuyo espesor pueda ser controlado durante el proceso.

2.2.1.1. Crecimiento térmico

El dióxido de silicio se forma sobre las obleas de silicio tanto en un ambiente oxigenado húmedo como en uno seco. Esto se consigue en un horno a temperaturas entre 750 grados Celsius y 1 200 grados Celsius. Para óxidos que se forman a presión atmosférica, el grosor de la capa de óxido puede ser tan pequeña como 1,5 nanómetros o tan grande como 2 micrómetros. Por cada micrón de dióxido de silicio que se forma, 0,45 micrómetros de silicio se consume y esto genera un apreciable esfuerzo de compresión en la interface.

Además, existe gran diferencia entre los coeficientes de expansión térmica del silicio y del dióxido de silicio, lo que deja al óxido en compresión luego de enfriarse de la temperatura de crecimiento, añadiéndose al esfuerzo intrínseco que surge durante el crecimiento. El esfuerzo es por supuesto, un tema importante en los dispositivos MEMS y no puede ser ignorado.

La capa gruesa de óxidos puede causar un arqueamiento en los substratos inferiores, las membranas de óxido independientes se torcerán y deformarán; y las estructuras en voladizo tenderán a enroscarse si estos esfuerzos no son controlados adecuadamente.

2.2.1.2. Deposición física de vapor

El proceso de deposición física o PVD (physical vapor deposition) es un método para depositar materiales sin la necesidad que ocurra una reacción química para llevar a cabo la deposición. El método de deposición física tiene la capacidad de depositar finas capas de conductores o aislantes, los cuales son utilizados en aplicaciones MEMS para recubrimiento óptico o para conducción eléctrica. Los dos procesos de deposición física convencionales son por evaporación y por pulverización catódica.

- Evaporación

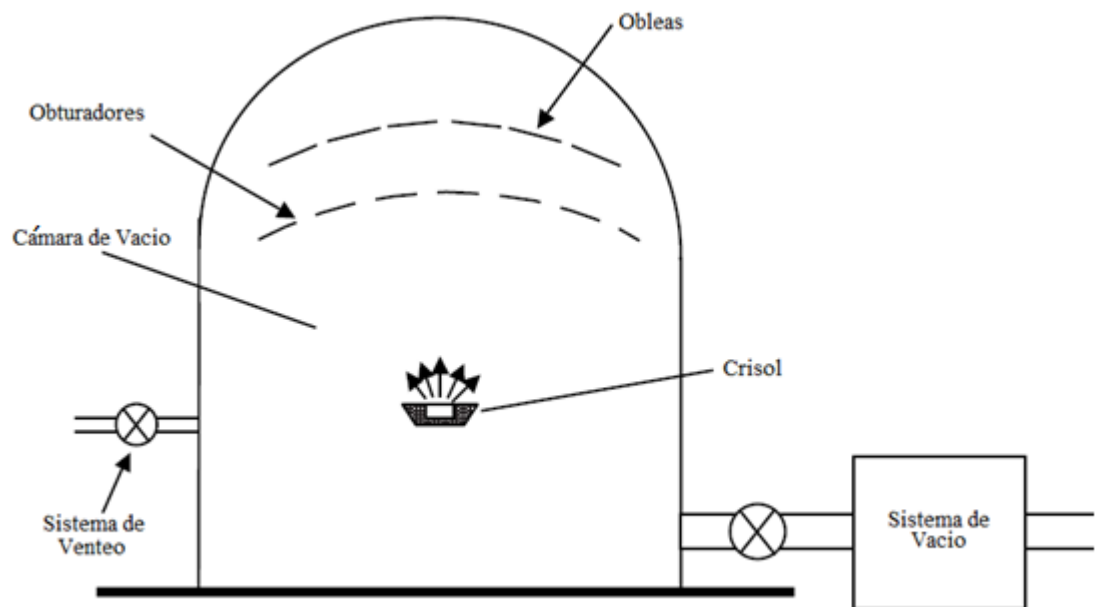
El proceso físico por el cual se libera material de una muestra fundida debido a una elevada presión de vapor se denomina evaporación. El proceso por el cual se libera material de un sólido a elevadas presiones de vapor se denomina sublimación. La mayoría de los procesos prácticos se llevan a cabo por evaporación desde una muestra fundida (estado líquido).

En la figura 38 se muestra el esquema de una cámara de evaporación, las características más importantes que debe tener un evaporador son:

- Una cámara de alto vacío y su sistema de bombeo asociado.

- Un crisol conteniendo el material que será depositado con su respectivo sistema de calentamiento.
- Una estructura para el soporte de las obleas que sujetarán las muestras a ser cubiertas.

Figura 38. **Esquema de un evaporador**



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 32.

Asimismo, el evaporador debe poseer un sistema obturador para el control del tiempo de la deposición y para el control de crisoles múltiples si se van a depositar distintas capas.

El crisol se encuentra fabricado frecuentemente de nitrato de boro y contiene la carga de material fundido para ser depositado. Existe un sinnúmero de métodos disponibles para calentar la carga del material.

La forma más simple es calentamiento por resistencia, sin embargo, para temperaturas extremadamente altas de evaporación, el elemento resistivo podría también evaporarse, dando lugar a contaminantes. Calentamiento inductivo y calentamiento por haz de electrones son métodos alternativos para esta aplicación.

La evaporación es un fenómeno de deposición que depende de la línea de visión del material fundido hacia la oblea. Muchas obleas pueden ser organizadas alrededor del crisol con varias orientaciones para incrementar el rendimiento y mejorar la deposición para características en particular.

A bajas presiones y elevadas temperaturas, los materiales exhiben una presión de vapor P_v . (asociada a la sublimación), para materiales que interesan en la fabricación de MEMS, las presiones de vapor típicas son menores a 0,13 Pa. La teoría cinética de los gases puede relacionar la presión de la cámara de evaporación P_v , y la temperatura T, con el flujo de átomos que dejan la superficie de la muestra fundida J.

$$J = \sqrt{\frac{P_v^2}{2\pi kTM}}$$

Donde P_v es la presión de vapor, k es la constante de Boltzman, T es la temperatura en Kelvin, M es la masa atómica y J es el flujo atómico. El flujo másico depositado durante el proceso de evaporación puede ser calculado a partir de la ecuación anterior y un factor geométrico aproximado de la cantidad de material fundido depositado sobre la superficie, dado que la evaporación se produce en un radio en función de su línea de visión. Esta información puede ser utilizada para determinar los tiempos de deposición y el espesor del material.

- Pulverización catódica o Sputtering

La pulverización catódica es un proceso físico en el que se produce vaporización de los átomos de un material sólido denominado blanco, mediante el bombardeo de este por iones energéticos. Este es un proceso utilizado en la formación de películas delgadas sobre materiales y técnicas de grabado.

La pulverización catódica es causada principalmente por el intercambio de momento lineal entre los iones y los átomos del material, debido a las colisiones. El proceso de pulverización catódica utiliza un plasma formado por altos voltajes en un gas a baja presión (13,3 Pa) a través de un par de electrodos colocados uno al lado del otro. Los iones proceden de un gas inerte contenido en la cámara. El bombardeo del cátodo por iones de alta energía inicia el proceso de pulverización. Cuando los iones impactan la superficie del material, les pueden suceder varias cosas, dependiendo de la energía de los iones, entre ellas:

- Rebotan fuera de la superficie.
- Son absorbidos por la superficie y producen calor.
- Penetran la superficie y depositan su energía dentro del material.
- Eyección de átomos de la superficie del cátodo (pulverización).

Los átomos pulverizados poseen más energía que los átomos evaporados lo cual incrementa la superficie sobre la cual se pueden mover los átomos.

Aumentando la superficie de movilidad se produce una mejor cobertura por cada etapa, mejor que lo que se consigue con el proceso de evaporación. El gas utilizado para producir los iones de alta energía en general es el Argón. Las películas de material pulverizado se pueden depositar a temperatura ambiente, este tipo de deposición no depende de la temperatura del sustrato, sin embargo, el sustrato se puede calentar para promover la adhesión o prevenir la ruptura de la capa.

Existen muchas variaciones del proceso de pulverizado iónico para lograr efectos especiales en la oblea.

- Pulverizado reactivo: se trata de una combinación química entre material pulverizado y el gas del ambiente que reaccionan para formar un compuesto.
- Pulverizado con tríodo: un filamento extra en la cámara, el cual se usa para aumentar la velocidad de pulverización produciendo electrones adicionales.
- Pulverizado con magnetrón: un campo magnético es utilizado para aumentar la densidad de electrones, lo cual también incrementa la velocidad de pulverizado.

2.2.1.3. Deposición química de vapor

Las capas de sólidos, tales como el dióxido de silicio, nitrato de silicio y el silicio policristalino pueden depositarse sobre la superficie de una oblea por el proceso CVD (Chemical Vapor Deposition), la capa inicia su formación debido a la reacción es gaseosa en la superficie. Los tres tipos más comunes de CVD son CVD a baja presión (LPCVD), CVD de plasma mejorado (PECVD) y CVD a presión atmosférica (APCVD), para cada etapa, la cobertura, la uniformidad, la composición y el esfuerzo depositado en la capa está determinada por el tipo de gas, por la temperatura y presión de operación.

Para el PECVD, las propiedades de la capa también se ven afectadas por la densidad de potencia de la radiofrecuencia, la frecuencia y por el ciclo de trabajo de operación de cada reactor, en el caso de la APCVD, existe un límite para la cantidad de masa que puede depositarse, razón por la cual el diseño del reactor es importante. A continuación se describen las principales formas y aplicaciones del CVD.

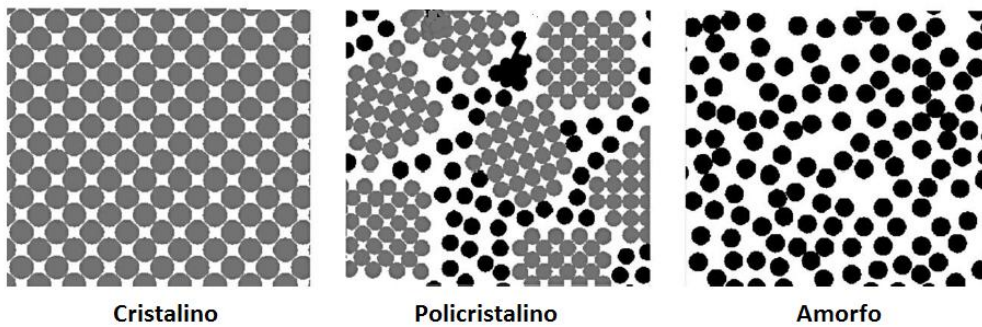
- Formación de silicio policristalino y silicio amorfo

Las capas depositadas por LPCVD son usadas extensamente en la industria de circuitos integrados. El silicio amorfo y el silicio policristalino (figura 39), usualmente se consiguen depositando silano (SiH_4) por medio de LPCVD. Aunque el silicio policristalino puede ser depositado por PECVD, esto generalmente se realiza únicamente para depositar sobre grandes áreas o para finas capas en pantallas de cristal líquido.

Las propiedades de las capas LPCVD de silicio policristalino dependen de la presión parcial del silano en el reactor.

El tamaño final del grano del silicio amorfo se determina por lo general por la temperatura a la que la película es recocida después de la deposición.

Figura 39. **Distintas disposiciones de los cristales de silicio**



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p.19.

En dispositivos MEMS el recocido puede usarse para el control de los esfuerzos en las películas de silicio amorfo y silicio policristalino. El esfuerzo residual en una película de silicio amorfo puede ser a lo más 400 megapascales y puede ser de tensión o compresión dependiendo de la temperatura de deposición. La transición de esfuerzo de tensión a compresión es fuerte y depende también de otros parámetros, haciendo difícil el control del esfuerzo en la película depositada.

El esfuerzo residual en el silicio policristalino depositado a 615 grados Celsius puede reducirse a 10 megapascales en compresión por recocido durante 30 minutos a 1 100 grados Celsius en N_2 y en el silicio amorfo depositado a 580 grados Celsius se reduce a 10 megapascales en tensión luego de un recocido durante 30 minutos a 1 000 grados Celsius en N_2 .

Quizá lo más importante, es que el gradiente de esfuerzo residual se reduce casi a cero. Otro método alternativo es el de depositar alternadamente capas de silicio amorfo cultivado a 570 grados Celsius y silicio policristalino cultivado a 615 grados Celsius. El Silicio amorfo es tensil y el silicio policristalino es compresivo. Por ajuste de grosores en la distribución de las multicapas, es posible controlar ambos esfuerzos y el gradiente de esfuerzo en una capa de silicio policristalino depositado.

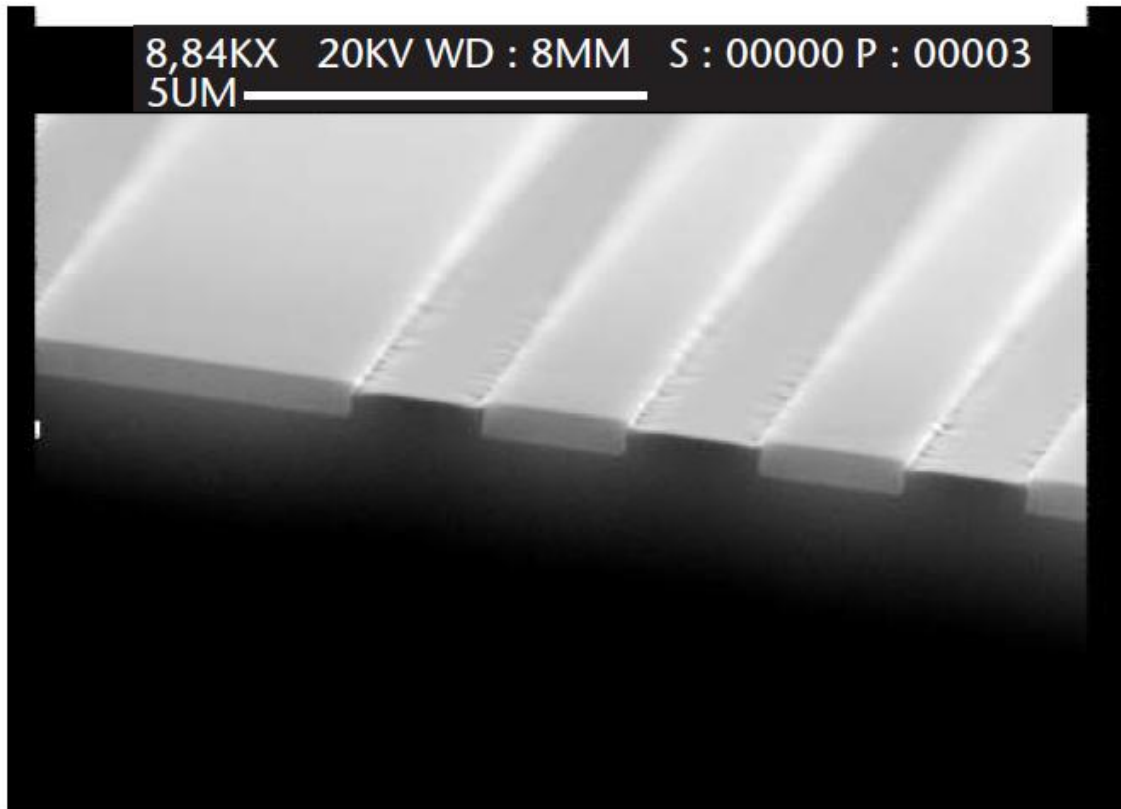
- Crecimiento epitaxial

El crecimiento epitaxial es una técnica de fabricación, en la cual a partir de una de las caras de un cristal de material semiconductor o un sustrato, se hace crecer una capa uniforme y de poco espesor con la misma estructura cristalina de la base. Mediante esta técnica se puede controlar de forma precisa el nivel de impurezas en el semiconductor, que son quienes definen su naturaleza, ya sea de tipo P o bien de tipo N.

El silicio epitaxial puede cultivarse por APCVD o LPCVD. Los rangos de temperaturas a los que se hacen esto es entre 900 grados Celsius a 1 250 grados Celsius para APCVD y de 700 grados Celsius a 900 grados Celsius para LPCVD. La epitaxia puede usarse para depositar capas de silicio con perfiles de dopaje claramente definidos que se pueden utilizar para detener el grabado, como por ejemplo, detener el grabado electroquímico.

Puede usarse también para engrosar las capas de SOI (silicon on insulator) silicio depositado sobre un aislante. La propiedad más utilizada del silicio epitaxial para aplicaciones MEMS es su capacidad de producir un crecimiento selectivo, es decir, crecimiento sólo en determinadas direcciones.

Figura 40. **Crecimiento de barras de forma selectiva**



Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.14.

El dióxido de silicio y el nitruro de silicio en las obleas previene el crecimiento epitaxial del silicio y una capa de silicio amorfo o silicio policristalino normalmente se deposita en el lugar. Sin embargo, este proceso de deposición puede verse suprimida por la adición de ácido clorhídrico HCl a la reacción de los gases. El HCl evita la nucleación y el crecimiento de espuria en el dióxido o nitruro de silicio. Un ejemplo del crecimiento epitaxial selectivo se muestra en la figura 40.

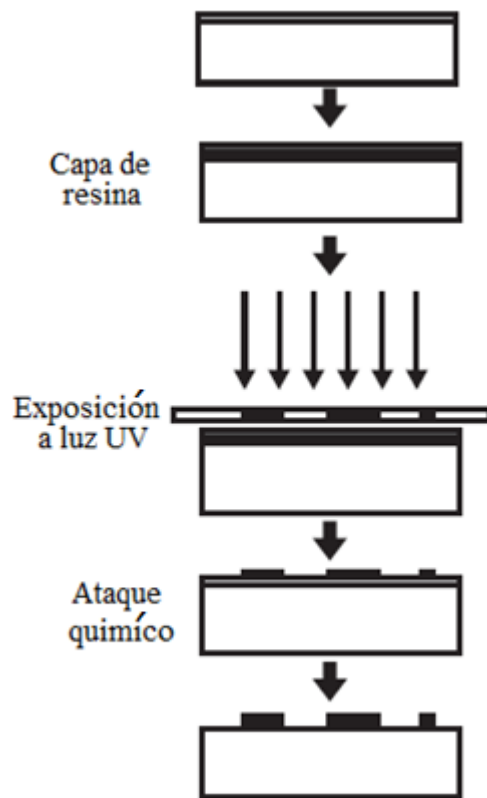
2.2.2. Litografía

El objetivo de este proceso es transferir un diseño sobre una capa de material que recubre la superficie del silicio (por ejemplo, una capa de SiO_2 o de Si_3N_4 o de algún metal). Se trata de otro proceso clave para la fabricación de dispositivos semiconductores. Su realización consta de las siguientes etapas:

- Se recubre la superficie de la oblea con resina fotosensible que es un tipo de plástico cuyas propiedades químicas cambian cuando es expuesto a la radiación ultravioleta.
- Se coloca una máscara sobre la resina fotosensible. La mascarilla está construida de cuarzo, transparente a la radiación ultravioleta, en cuya parte posterior tiene dibujado con material opaco a la radiación (cromo en general) el diseño a transferir sobre la superficie del silicio.
- Se ilumina el conjunto formado por el silicio, la resina fotosensible y la máscara con radiación ultravioleta. En las áreas en que la máscara es transparente la radiación alcanza la resina fotosensible y rompe o une las cadenas del polímero según el tipo de resina. En las áreas opacas de la máscara, la radiación no llega a la resina fotosensible y esta no experimenta cambios.

A continuación, se procede al revelado de la resina fotosensible, que consiste en introducir la oblea y la resina fotosensible que la cubre en el líquido de revelado el cual disuelve la resina fotosensible iluminada y deja intacta la no iluminada también existen otras resinas llamadas negativas (donde la radiación une las cadenas) en las que el revelador disuelve las partes no iluminadas y deja intactas las expuestas a la luz ultravioleta. El proceso de fotolitografía se muestra en la figura 41.

Figura 41. **Etapas de la litografía**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.net.

En el caso de la litografía con haz de electrones la resina se expone a un energético haz de electrones que se barre a través de toda la oblea. El haz es apagado y encendido para crear un patrón sobre la resina, la cual también puede ser positiva o negativa. La resina para haz de electrones en general no es tan gruesa como la fotoresina, siendo esta del orden de 0,2 a 0,9 micrómetros.

Los tamaños característicos de la capa de resina para haz de electrones son del orden de los 10 nanómetros. Este tamaño característico obtenido con la litografía convencional en general no es útil para los dispositivos MEMS, sin embargo, han surgido cambios y mejoras en las técnicas de litografía expandiendo más allá sus límites. La litografía de doble cara y la litografía en escala de grises y láminas de resina fotosensible más gruesas han conseguido que se utilice más este proceso.

2.2.2.1. Litografía de doble cara

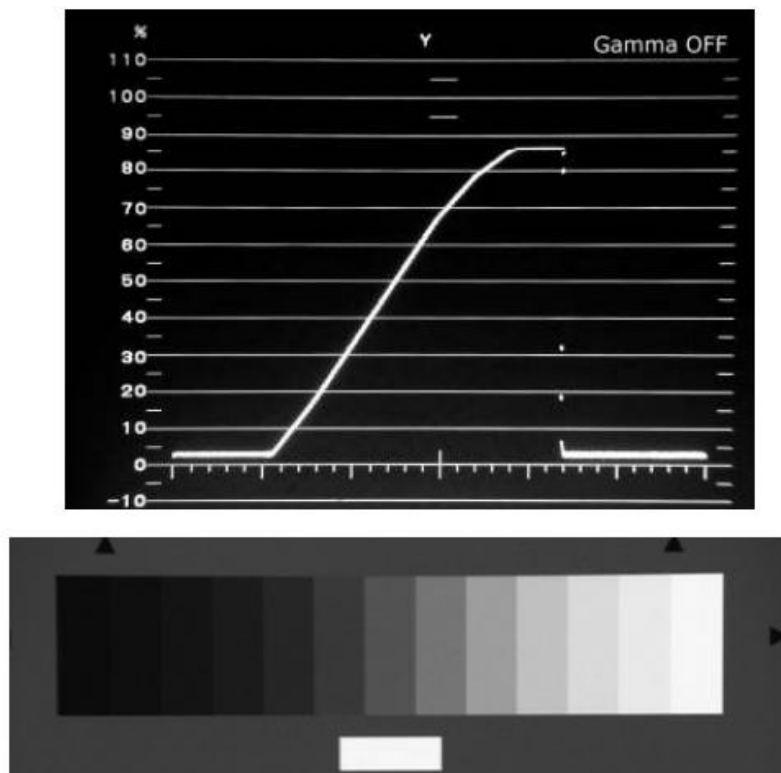
La mayoría de dispositivos MEMS requieren un proceso de litografía de doble cara, en la mayoría de los casos esto significa que los patrones en cada uno de los lados de la oblea se deben alinear uno con otro. Aunque algunos de los desarrolladores han logrado hacer el grabado completo a través de un solo lado de la oblea, las dificultades que esto representa la vuelven una opción poco atractiva. Existen equipos especiales para el alineamiento de las dos caras, algunos equipos utilizan procesamiento de imágenes y se alinean auxiliándose de marcas guías sobre las obleas.

La parte frontal de la oblea es entonces expuesta a través de la mascarilla, la cual se sujeta al equipo. El alineamiento se puede lograr con una precisión en el orden de un micrómetro.

2.2.2.2. Litografía de escala de grises

Esta es una técnica en la cual se pueden formar características topográficas (distintos niveles) en la resina fotosensible. La cantidad de resina removida en cada ciclo depende de la exposición en Joules por metro cuadrado $[J/m^2]$, para determinar la cantidad de resina a ser removida en función de la exposición UV se utiliza la curva Gamma, la cual que también es utilizada en procesamiento de imágenes y en ajustes de contrastes en video.

Figura 42. Curva gama y su escala de grises equivalente

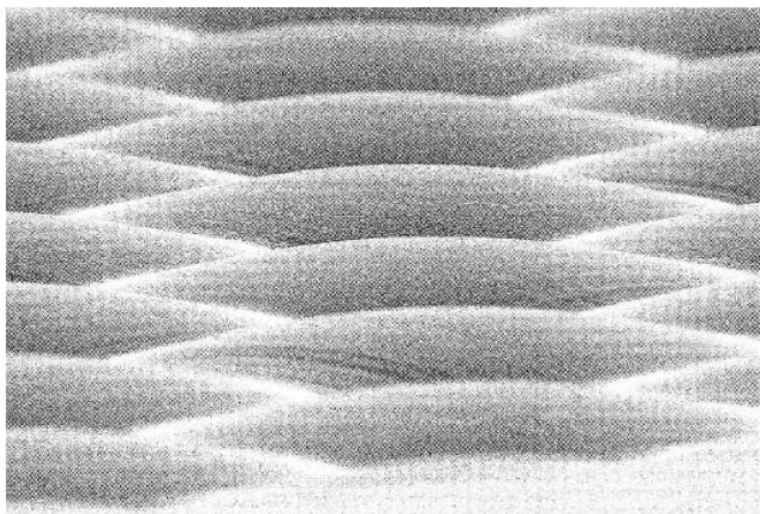


Fuente: www.alfonsoparra.com. [Consulta: febrero de 2014].

La exposición en cada uno de los diferentes puntos de la resina puede controlarse haciendo diferentes niveles de gris en las mascarillas. Estos niveles se forman por arreglos de micropuntos y el nivel de gris puede controlarse por el número o el tamaño de los puntos en cada pixel. Un factor importante es que los puntos no representan en si la gráfica de la máscara, sino solamente se utilizan para reducir la exposición.

El número de niveles de gris que puede obtenerse con una oblea de cinco pasos puede obtener características del orden de 0,5 micrones, en la práctica 30 niveles son suficientes para la mayor cantidad de aplicaciones, en principio las características formadas en la resina se pueden transferir al sustrato inferior por grabado, por ejemplo, con un haz de iones de Miller. Una de las aplicaciones de esta técnica es la fabricación de microlentes y conjuntos de los mismos. En la figura 43 puede verse una estructura fabricada con este método.

Figura 43. **Microlentes fabricados con litografía en escala de grises**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.19.

2.2.3. Grabado

Varios de los trabajos realizados en los dispositivos MEMS utilizan micromaquinado por grabado químico húmedo y aunque en el proceso de fabricación de circuitos integrados predomina el grabado seco, la mayoría de los procesos realizados en la fabricación de MEMS se sigue realizando con grabadores químicos húmedos. En ambos tipos de grabado, húmedo y seco, se debe tener en cuenta la isotropía del grabado y la selectividad del mismo para el material de la mascarilla y de los materiales expuestos, la selectividad del grabado está definida por la velocidad con la que se graba una película con respecto a otra en las mismas condiciones.

El grabado húmedo se utiliza para grabar dióxido de silicio, nitruro de silicio y aluminio. Estos son grabadores isotrópicos, lo cual significa que graban al mismo ritmo en todas las direcciones. Los grabadores húmedos para el silicio, por otro lado, pueden ser tanto isotrópicos como anisotrópicos. Los grabadores anisotrópicos para silicio, graban en el silicio cristalino con preferencias en ciertas direcciones del cristal. Para todos los grabadores químicos húmedos utilizados en MEMS, el grabador y el material de la máscara se eligen para dar una alta capacidad selectiva de grabado.

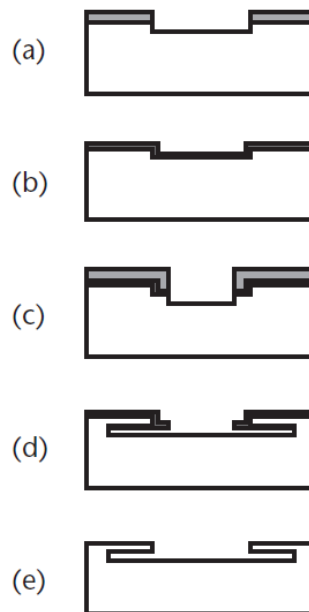
El tipo más común de grabado adaptado para MEMS es el grabado profundo en el substrato de silicio, a menudo se refiere a este proceso como micromaquinado de volumen, este proceso puede llevarse a cabo tanto húmedo como en seco y en cada caso se puede obtener además isotrópico o anisotrópico.

El grabado en seco se lleva a cabo en plasma débilmente ionizado a bajas presiones.

La mayoría de grabadores secos son combinados con grabado físico y químico. El proceso de grabado químico es capaz de dar una buena selectividad y se obtienen perfiles isotrópicos, por otro lado el grabado físico tiene baja selectividad y produce daños debido al bombardeo de iones, sin embargo, el grabado físico tiene la capacidad de producir perfiles anisotrópicos, lo cual es extremadamente importante para la fabricación de semiconductores micrométricos.

En la figura 44 se puede apreciar la secuencia de un grabado húmedo, primero se graba una zanja en el silicio, luego el silicio se oxida, se hace más profunda la zanja, se remueve la resina para luego grabar en húmedo el silicio anisotrópicamente y por último el óxido es removido.

Figura 44. **Secuencia del proceso de grabado húmedo en silicio [1 1 1]**

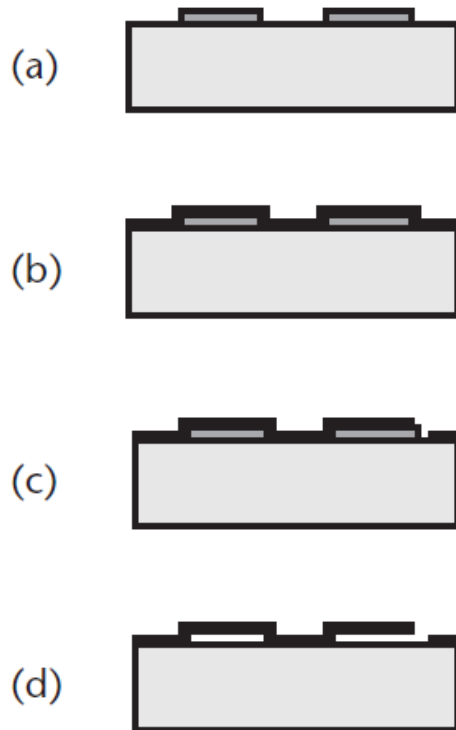


Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.26.

2.2.4. Micromaquinado de superficie

Aunque la tecnología más popular de fabricación de sensores es el micromaquinado volumétrico utilizando grabado seco o húmedo por debajo de la superficie del silicio, el micromaquinado de superficies provee una técnica complementaria en el cual los materiales son agregados por encima de la superficie. Estos materiales a menudo actúan como separadores o capas de sacrificio que son removidas en etapas posteriores para producir estructuras aisladas y partes móviles.

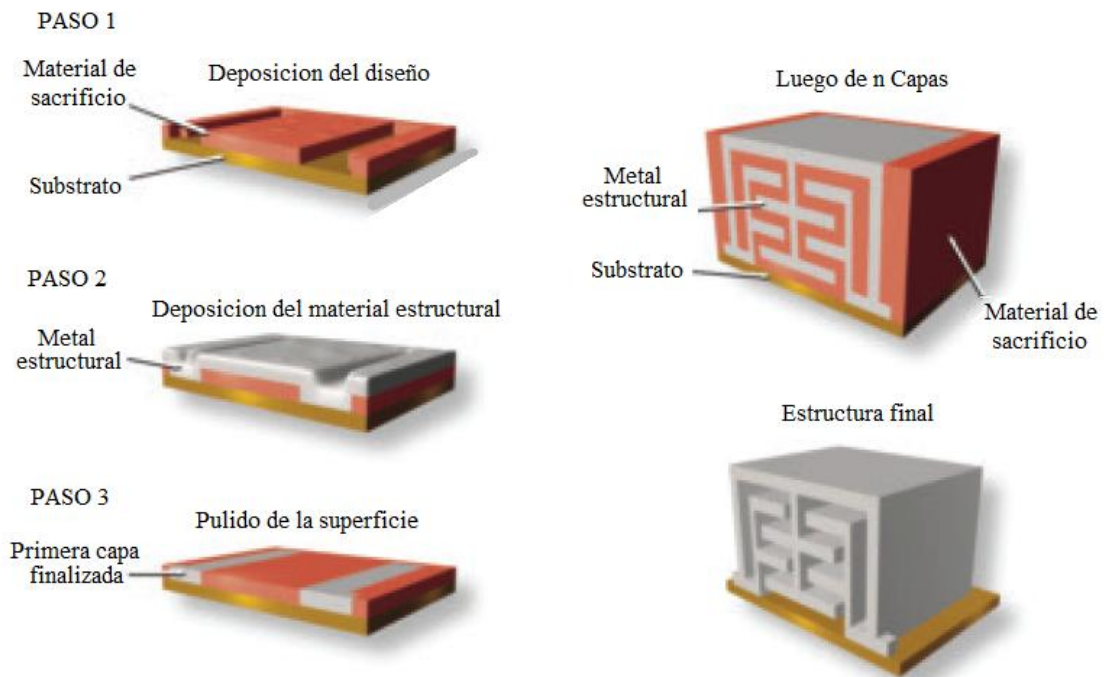
Figura 45. **Secuencia de micromaquinado de superficie**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 28.

En la figura 45 se ilustra una superficie típica de micromaquinado superficial usando dióxido de silicio como material de sacrificio y silicio policristalino como material estructural. En la mayoría de los procesos básicos el óxido generalmente se deposita por CVD debido a que el grabado es mucho más rápido que el crecimiento térmico. Se graban agujeros en el óxido para formar puntos de anclaje para la capa estructural. El silicio policristalino es depositado y modelado y el óxido es grabado lateralmente por debajo de las estructuras utilizando un ataque de ácido hidrofúorhídrico. Las estructuras constituidas de esta manera pueden diseñarse para moverse ya sea horizontal o verticalmente, hacia adentro y hacia afuera del plano de la oblea.

Figura 46. **Proceso de micromaquinado de varias capas**



Fuente: KENEDY, Bill. *Micromanufacturing Magazine*. p. 26.

Estructuras más complejas pueden lograrse apilando cuatro o cinco capas alternadas de silicio policristalino y dióxido de silicio (figura 46). Aunque existen otras combinaciones de materiales de sacrificio y estructurales, tales como el silicio policristalino y el nitruro de silicio, el níquel y el cobre, el níquel y el Ni/Fe. El reto del micromaquinado es el control de las propiedades mecánicas de la capa estructural para prevenir la formación de esfuerzos internos residuales y para asegurar que las estructuras libres no se peguen a la superficie de la oblea luego del secado.

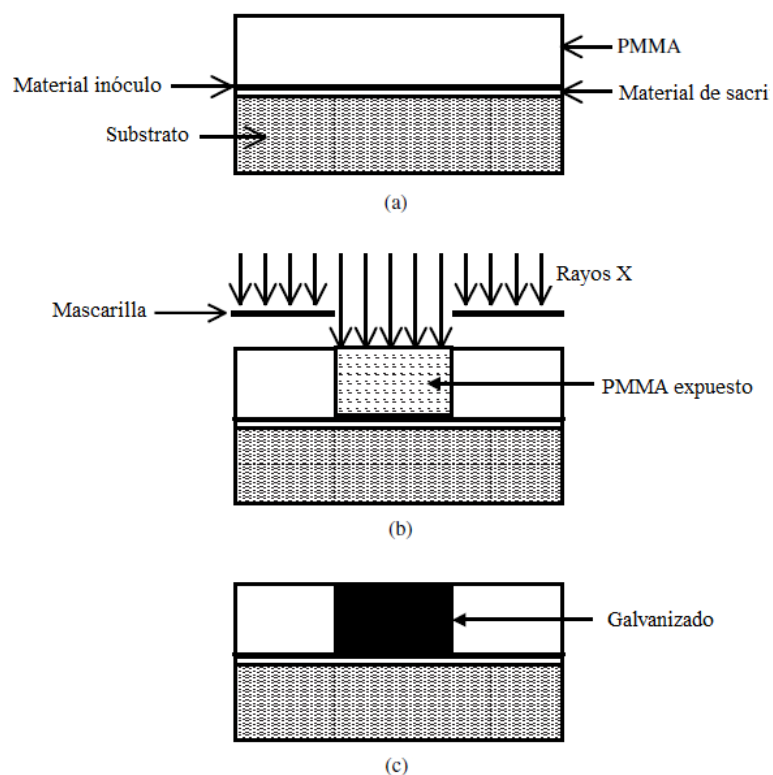
El control de esfuerzos en la capa del silicio policristalino se consiguen con el control cuidadoso de la deposición y las condiciones del recocido. Otro método es el de depositar alternativamente capas de silicio amorfo a 570 grados Celsius, el cual produce esfuerzos de tensión, y silicio policristalino a 615 grados Celsius, el cual es compresivo. En la superficie micromaquinada. Luego de liberar las estructuras por grabado húmedo, se enjuagan varias veces en agua y por último se enjuaga en un líquido hidrofóbico como el hexano (C_6H_{14}) o tolueno (C_7H_8).

2.2.5. LIGA

El proceso LIGA (Lithographie, Galvanoformung, Abformung) tiene la capacidad de construir estructuras complejas de material metálico con altas relaciones de aspecto con espesores por encima de los milímetros. Este proceso utiliza litografía de rayos X, capas gruesas de resina y metales galvanizables para formar estructuras complejas. Debido a que se utiliza un sincrotrón para irradiar las superficies expuestas, el recubrimiento del sustrato debe estar hecha de materiales transparentes a los rayos X (por ejemplo, nitruro de silicio o silicio policristalino).

La mascarilla utilizada para transferir el diseño, por otro lado debe ser de material opaco a los rayos X, en general estos materiales son aquellos que poseen un número atómico alto. El oro por ejemplo es un excelente material para fabricación de mascarillas.

Figura 47. **Etapas del proceso LIGA**



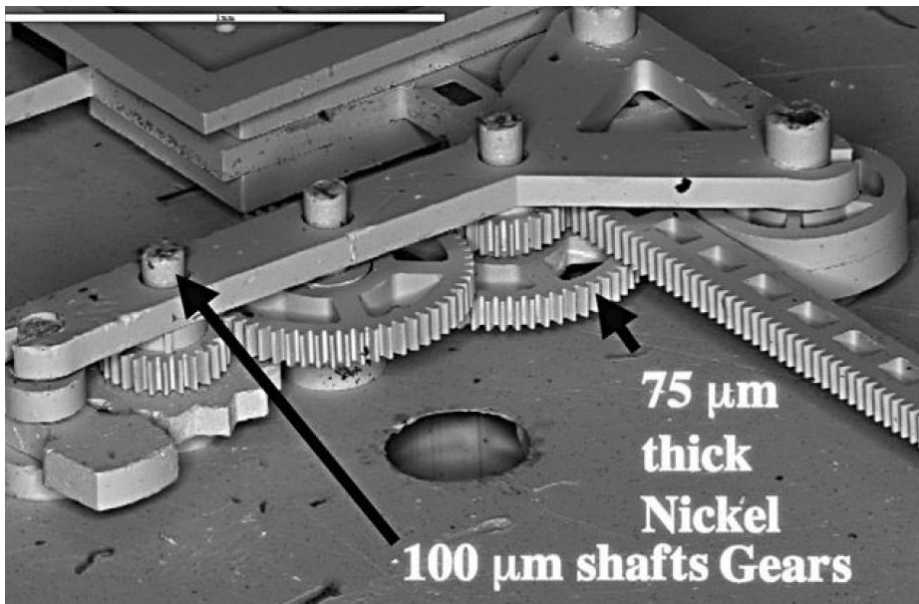
Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. p. 80.

La secuencia de fabricación del proceso LIGA se muestra en el diagrama esquemático que aparece en la figura 47, el proceso empieza con la deposición del material de sacrificio usado para la separación del dispositivo LIGA del sustrato luego de la fabricación. El material de sacrificio debe tener una buena adhesión al sustrato y sin embargo, debe estar listo para ser removido en cualquier momento.

Una delgada capa de material inoculo es depositada, esta se utiliza como base para el galvanizado. Frecuentemente se utilizan materiales como el titanio o el níquel. Luego, una gruesa capa de resina es aplicada, en general se utiliza polimetilmetacrilato (PMMA). Un sincrotrón proporciona la fuente de alta energía para producir un haz de rayos X concentrado, el cual es necesario para la exposición de la gruesa capa de resina.

El sistema de exposición de la máscara y la radiación del sincrotrón puede producir paredes laterales totalmente verticales en la capa de PMMA, lo cual es una excelente característica en materiales para micromaquinado. El siguiente paso es la de galvanizar el espacio vacío del material base y pulir la parte superior de la pieza. Para finalizar el PMMA y el material de sacrificio se remueven para producir una pieza completa LIGA.

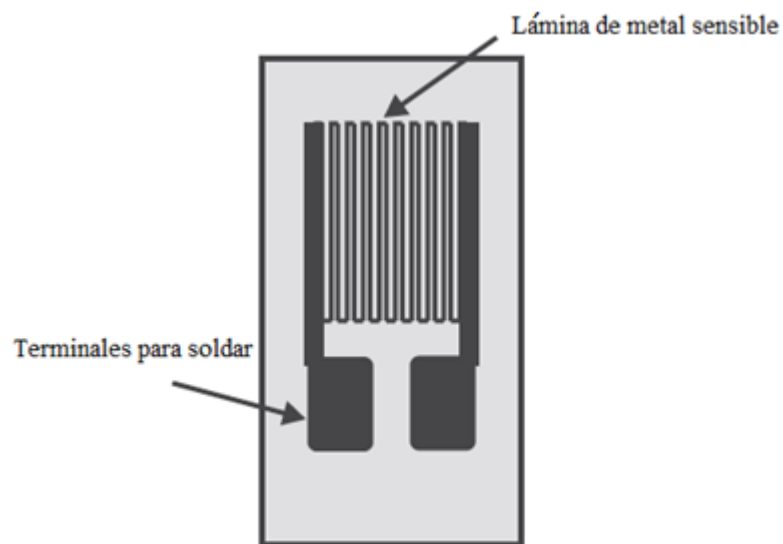
Figura 48. **Mecanismo complejo fabricado utilizando el proceso LIGA**



Fuente: ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design* . p. 81.

El proceso LIGA posee la ventaja de producir partes metálicas lo que permite la construcción de actuadores ferromagnéticos. Sin embargo, el ensamblado de los dispositivos LIGA para producción a gran escala sigue siendo un reto. En la figura 48 se muestra un mecanismo ya ensamblado de partes fabricadas con el proceso LIGA. Alternativamente, con el proceso LIGA se pueden fabricar moldes de metal para inyección de plástico y así producir las piezas deseadas con algún polímero.

Figura 49. **Galga extensiométrica típica**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 85.

2.3. Fundamentos para la fabricación de microsensores mecánicos

Para la apropiada selección de materiales para la construcción de dispositivos MEMS se deben considerar, principalmente las propiedades mecánicas y las eléctricas. Propiedades como la piezoresistividad y la piezoelectricidad representan los fundamentos de estas tecnologías.

2.3.1. Piezoresistividad

La piezoresistividad deriva su nombre del griego *piezin* que significa presionar, es un efecto que exhiben varios materiales al presentar un cambio de resistencia en función de la presión aplicada. El efecto fue descubierto por primera vez por Lord Kelvin en 1856, quien noto que la resistencia de los cables de cobre y de hierro aumentaba bajo tensión. Además observó que el que el hierro mostraba un mayor cambio en su resistencia que el cobre.

La primera aplicación del efecto piezoresistivo no apareció sino hasta 1930, casi 75 años luego de que Lord Kelvin lo descubriera. Utilizándose para la construcción de celdas de carga utilizando pequeñas láminas de metal montadas sobre una película de soporte, pegado a alguna superficie. Una celda de carga típica se muestra en la figura 49.

La sensibilidad de la celda de carga generalmente se encuentra en función del factor de galga, se trata de una cantidad adimensional que está dada por:

$$GF = \frac{\text{cambio relativo de resistencia}}{\text{deformación unitaria}} = \frac{\Delta R/R}{\Delta L/L} = \frac{\Delta R/R}{\varepsilon}$$

Donde R es la resistencia inicial de la celda de carga y ΔR es el cambio de resistencia. $\Delta L/L$ es, por definición, la deformación unitaria y se denota con la letra épsilon ε , es una cantidad adimensional. Para todos los materiales elásticos, existe una relación entre el esfuerzo σ y la deformación ε , esta relación obedece a la Ley de Hook, así existe una deformación lineal en función de la fuerza aplicada.

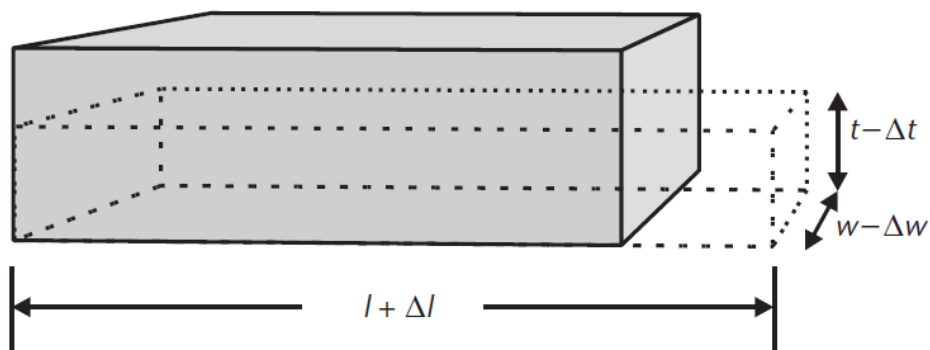
La constante de proporcionalidad es el módulo de elasticidad o módulo de Young, el cual es propio para cada material y se encuentra dado por:

$$E = \frac{\text{Esfuerzo}}{\text{Deformación}} = \frac{\sigma}{\varepsilon} (\text{N/m}^2)$$

El módulo de Young del silicio es de 190 gigapascales, el cual es cercano al del acero inoxidable (alrededor de 200 gigapascales). Para un material dado, mientras mayor sea su módulo de Young, menor será la deformación que sufra.

Cuando un material elástico es sometido a un esfuerzo a través de su eje axial este sufre una deformación sobre su eje ortogonal. Por ejemplo, si un bloque rectangular es estirado a lo largo, su ancho y su grosor se reducirán. En otras palabras, un esfuerzo de tensión a lo largo del bloque resultará en un esfuerzo de compresión en las direcciones ortogonales.

Figura 50. **Ilustración de la deformación que sufre un objeto según su relación de Poisson**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 86.

La relación entre la deformación axial y la deformación transversal se conoce como el módulo de Poisson. La mayoría de los materiales elásticos poseen un módulo de Poisson de alrededor de 0,3, en el caso del silicio es 0,22. El efecto en un bloque rectangular se ilustra en la figura 49.

Si se asume que la resistencia del bloque R está dada por:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

Donde l es la longitud del objeto, ρ su resistividad y A su área transversal.

Se sustituye el valor de A, considerando el hecho de que $A = w \cdot t$

$$R = \frac{\rho l}{wt}$$

Luego se deriva parcialmente sobre todas las dimensiones y se ordena para llegar a la expresión final.

$$R = \frac{l}{wt} \delta\rho + \frac{\rho}{wt} \delta l - \frac{\rho l}{w^2 t} \delta w - \frac{\rho l}{wt^2} \delta t$$

Organizando los términos resulta que:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - \frac{dw}{w} - \frac{dt}{t}$$

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon_l + \nu\varepsilon_l + \nu\varepsilon_l$$

$$GF = \frac{dR/R}{\varepsilon_l} = \frac{d\rho/\rho}{\varepsilon_l} + (1 + 2\nu)$$

Esta última ecuación indica claramente que existen dos efectos que contribuyen con el factor de galga. El primer término es el efecto piezoresistivo, y el segundo es el efecto geométrico, dado que la relación de Poisson se encuentra usualmente entre 0,2 y 0,3, la contribución al factor de galga del efecto geométrico se encuentra entre 1,4 y 1,6. Los sensores que muestran un cambio de resistencia en función del esfuerzo aplicado se conocen como galgas extensiométricas o celdas de carga.

Las celdas de carga de semiconductores poseen un factor de galga bastante alto, el silicio tipo P posee un factor de galga que supera los +200 y el silicio tipo N posee un factor de galga por debajo de los -125. La polaridad negativa del factor de galga indica que la resistencia del material decrece al aumentar la deformación.

Adicionalmente a la alta sensibilidad a la deformación que exhiben, las celdas de carga de semiconductor también son sensibles a la temperatura.

Existen varios métodos de compensación adoptados cuando se utilizan semiconductores en las celdas de carga.

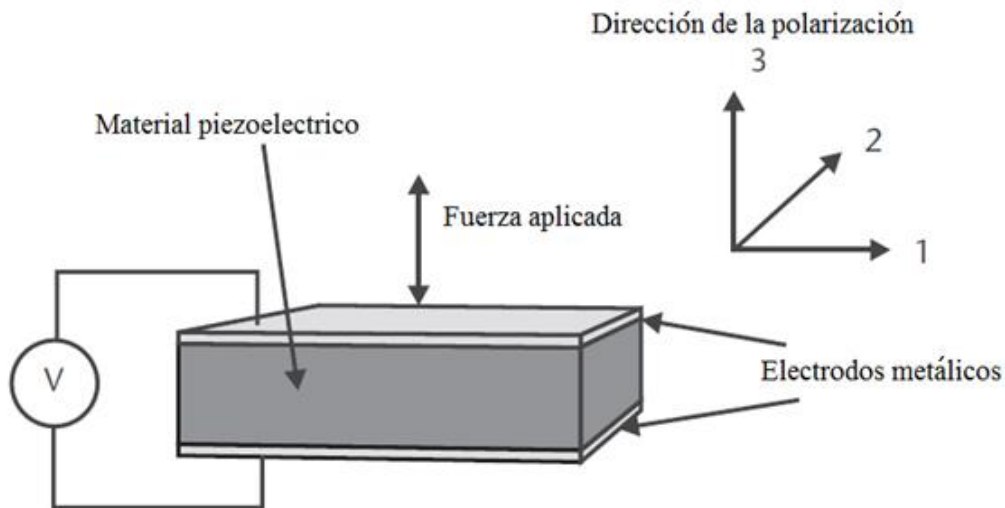
En esencia el coeficiente de movilidad de los portadores mayoritarios se ve afectado por el esfuerzo aplicado. Con un material tipo P la movilidad de los huecos decrece y por tanto la resistividad aumenta. En el caso del material tipo N, el coeficiente de movilidad de los electrones aumenta y la resistencia disminuye en presencia de un esfuerzo.

El efecto es altamente dependiente de la orientación de los cristales. El silicio policristalino y el silicio amorfo son ambos piezoresistivos.

2.3.2. Piezoelectricidad

Cierto tipo de cristales poseen la propiedad de producir carga eléctrica cuando se les aplica un esfuerzo mecánico (efecto principal). Así mismo, se deforman en respuesta a un campo eléctrico aplicado (efecto inverso). Este es un efecto inusual y debido a esto el material puede ser utilizado como sensor o como actuador. Este efecto fue descubierto por primera vez en el Cuarzo por Jacques and Pierre Curie en 1880. El origen físico de la piezoelectricidad surge debido a la asimetría de las cargas contenidas en la estructura cristalina. Tales cristales a menudo son denominados acentrosimetricos y debido a esa falta de simetría, poseen características anisotropicas.

Figura 51. Ilustración del efecto piezoeléctrico y su eje de polarización



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 89.

Debido a su simetría, la estructura cúbica cristalina del silicio hace que este no sea piezoeléctrico. Mientras otros materiales como la cerámica, el zirconato de titanio PZT, y el polímero polivinilidenofluorhídrico PVFD son ferroeléctricos. Los materiales ferroeléctricos son aquellos que exhiben polarización espontánea al aplicarles un campo eléctrico. En otras palabras, los materiales ferroeléctricos deben ser polarizados para que muestren un comportamiento piezoeléctrico. En analogía con los materiales ferromagnéticos en muchos aspectos.

En un material ferroeléctrico expuesto a la temperatura que excede el punto de Curie, este perderá sus propiedades piezoeléctricas, por tanto, existe un límite hasta donde pueden ser utilizados como sensores o actuadores.

El punto de Curie del PZT tipo 5H se encuentra alrededor de los 195 grados Celsius y su valor de temperatura máxima operativa en general es menor a este valor, además, el coeficiente piezoeléctrico del material varía con la temperatura, a este fenómeno se le conoce como efecto piroeléctrico. Este efecto también puede ser explotado, por ejemplo, el PZT se utiliza como base para arreglos de sensores infrarrojos.

Debido a la naturaleza anisotrópica de los materiales piezoeléctricos, se necesita algún sistema de identificación en cada uno de los ejes para especificar sus parámetros. Por convención, la dirección de polarización es tomada en el tercer eje (eje z) con los ejes 1 y 2 (x, y) perpendiculares.

Por ejemplo, el material mostrado en la figura 51 posee los electrodos perpendiculares al eje z y por lo tanto, este es el tercer eje. Un parámetro importante en los materiales piezoeléctricos es el coeficiente de carga d_{ij} (Coulomb/Newton).

El cual está relacionado con la cantidad de carga generada en la superficie del material en el eje i en relación a la fuerza aplicada en el eje j . Por ejemplo, si la fuerza aplicada y la carga generada se encuentran ambos a través del grosor del material, es decir, en el tercer eje, entonces, el coeficiente de carga se denota como d_{33} . Si una fuerza F_3 es aplicada sobre la muestra piezoeléctrica, la carga generada está dada por:

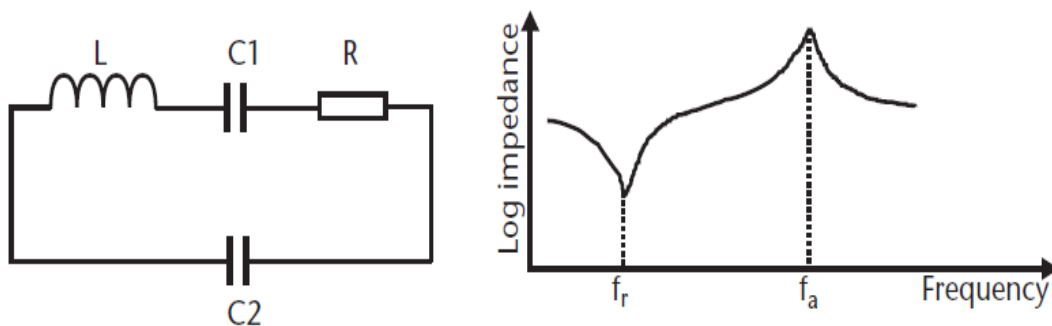
$$Q_3 = d_{33}F_3$$

Y el voltaje producido por un bloque rectangular de área A , espesor t y una permitividad relativa ϵ_r , es:

$$V_3 = \frac{Q_3}{C} = \frac{d_{33}F_3t}{\epsilon_0\epsilon_rA}$$

El modelo equivalente aproximado de un material piezoeléctrico se ve en la figura 52. Se trata de un circuito resonante serie-paralelo. Asimismo, se muestra una gráfica de la impedancia *versus* la frecuencia.

Figura 52. **Modelo equivalente de un material piezoeléctrico**



Fuente: BEEBY, Sthepen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 92.

La impedancia muestra dos picos, el resonante y el antiresonante a distintas frecuencias. La resonancia mecánica del dispositivo se encuentra representada por el circuito RLC serie, en donde la masa es equivalente al inductor, el resorte al capacitor C_1 y el resistor al amortiguador. Así también el material piezoeléctrico posee propiedades dieléctricas que combinadas con los electrodos forman un capacitor con capacitancia C_2 .

La Tabla IV muestra algunas propiedades de varios tipos de material piezoeléctrico. Estos valores en realidad son solamente promedios, pues en general los fabricantes en volumen de materiales piezoeléctricos tienen una elevada tolerancia, alrededor del 20 % en los valores de las propiedades piezoeléctricas. La medición de las propiedades de las capas depositadas sobre algún sustrato es bastante complicada.

Tabla IV. **Materiales piezoeléctricos más comunes**

Material	Forma	d_{33} (pC/N)	permitividad relativa
Cuarzo	Monocristalino	2	4
PVDF	Polímero	20	12
Titanato de bario	Cerámico	190	2000
PZT	Cerámico	300 a 600	400 a 3000
Oxido de Zinc	Monocristalino	12	12
Niobato de litio	Monocristalino	6 a 16	30

Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 91.

El cuarzo es ampliamente utilizado como material piezoeléctrico, se puede encontrar en relojes como elemento resonante en los osciladores de cristal, sin embargo, no existen métodos para depositar el cuarzo como una capa delgada sobre un sustrato de silicio.

El PVDF es un polímero a base de carbono, este material se encuentra disponible para su uso industrial como una ligera y flexible hoja de un grosor típico entre 9 y 800 micrómetros. Posee la ventaja de que es posible montar películas de PVDF sobre un sustrato, sin embargo, este debe ser polarizado luego del proceso de deposición para obtener comportamiento piezoeléctrico. El Titanato de bario (BaTiO_3) y el PZT son dos ejemplos de materiales cerámicos piezoeléctricos y cada uno de ellos puede depositarse sobre el silicio utilizando una gran variedad de métodos incluyendo pulverización catódica y serigrafía entre otras. El PZT se caracteriza principalmente por su alto valor de d_{33} y lo cual es deseable en materiales piezoeléctricos.

En general, debido a los voltajes relativamente altos que requieren los actuadores piezoeléctricos para generar algún desplazamiento en el rango de los micrones, estos no son utilizados a menudo, en el caso de desplazamientos subnanométricos, sin embargo, estos materiales proporcionan un excelente método de actuación. En contraparte su alta sensibilidad a pequeños desplazamientos significa que pueden ofrecer grandes ventajas como sensores micromaquinados.

2.3.3. Capacitancia

La estructura física de los sensores capacitivos es relativamente simple. La técnica, sin embargo, provee una forma precisa de capturar el movimiento de un objeto.

Esencialmente el dispositivo comprende el arreglo de uno o más electrodos fijos y uno o más móviles. Generalmente, se caracterizan por su inherente no linealidad y su sensibilidad a la temperatura, sin embargo, la facilidad con que se puede acondicionar la señal lo convierte en una opción muy importante. A continuación en la figura 53 se ilustran tres configuraciones para un capacitor de placas planas paralelas.

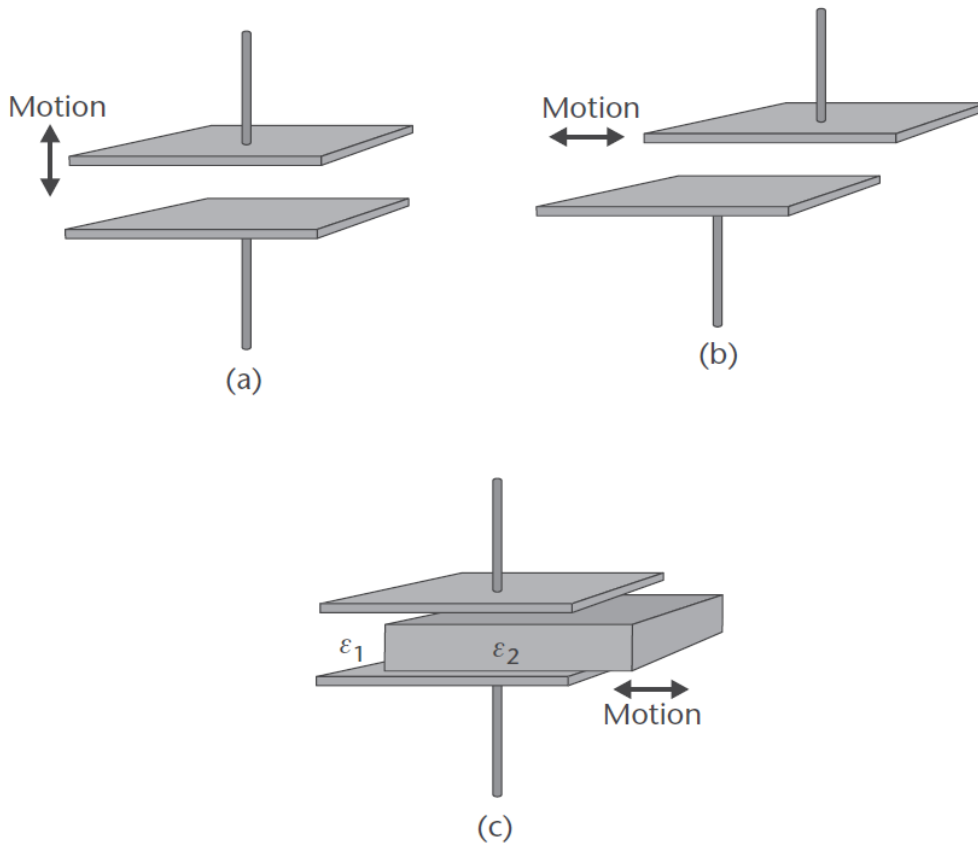
Para un sencillo capacitor de placas planas paralelas, ignorando los efectos de borde, la capacitancia se encuentra dada por:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{d}$$

Donde ϵ_0 es la permitividad del espacio libre y ϵ_r es la permitividad relativa del material entre las placas, A es el área de traslape y d es la separación entre cada una de las placas. La ecuación muestra que la capacitancia puede variar si cambiamos una o más de sus variables. La figura 53(a) muestra el caso más simple en donde el electrodo inferior es fijo y el electrodo superior se mueve, en este caso la separación d es quien varía. Y por lo tanto, la capacitancia varía de una forma no lineal.

En la figura 53(b) se ilustra un dispositivo donde la separación de las placas es fija y el área de traslape varia. En esta configuración se tiene una relación lineal entre la capacitancia y el área de traslape. La figura 53(c) muestra una estructura en la que se tienen dos electrodos fijos con distancia y área constantes. El movimiento es aplicado al material dieléctrico, el cual se encuentra en medio de ambas placas.

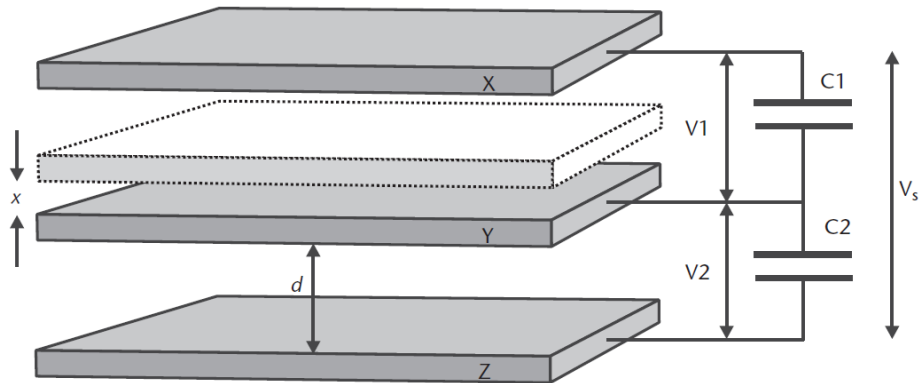
Figura 53. Posibles configuraciones para un capacitor de placas planas paralelas



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 92.

Un problema común en todos estos dispositivos es que la temperatura afecta a cualquiera de los tres parámetros de sensado, resultando en un cambio en la señal de salida. Este efecto debe ser compensado de alguna manera, ya sea por circuitos adicionales de acondicionamiento de señal o preferiblemente por el diseño geométrico.

Figura 54. Capacitor diferencial



Fuente: BEEBY, Sthepen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 93.

En la figura 54 se muestra un sensor de capacitancia diferencial, el cual es similar en naturaleza al capacitor de placas móviles, excepto que este posee un electrodo fijo adicional. Cualquier efecto de temperatura es común en ambos capacitores y por lo tanto, se cancelan entre ellos, dado que la señal de salida es función de la diferencia entre el capacitor superior y el capacitor inferior. Si asumimos que los electrodos externos X y Z son fijos y que el electrodo central Y se mueve hacia de X, entonces mientras la separación entre las placas X y Y disminuye, la distancia entre Y y Z aumenta.

Si la distancia que separa las placas es d y el electrodo se mueve una distancia x , entonces la relación entre el voltaje diferencial de salida y la desviación de la placa se encuentra dada por:

$$(V_2 - V_1) = V_s \left[\frac{x}{d} \right]$$

Donde V_s es el voltaje de la fuente de alimentación. Por lo tanto, este arreglo proporciona una relación lineal que se mantiene en el rango donde $x < d$ y es capaz de detectar un desplazamiento de unos pocos picómetros.

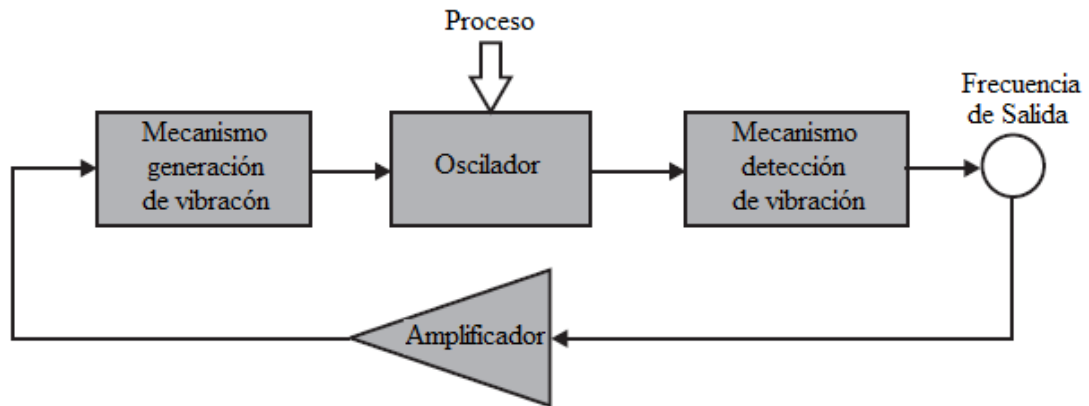
La estructura del capacitor es relativamente sencilla de fabricar y los dispositivos tipo membrana se usan a menudo como base para sonadores de presión y micrófonos. Estructuras más elaboradas, tales como capacitores intercalados, son usadas cuando el efecto de borde no puede ser ignorado. Con tales dispositivos, la simple ecuación de un capacitor de placas planas paralelas proporciona únicamente una cruda estimación del cambio de capacitancia esperado.

Existen una variedad de técnicas para medir los cambios de capacitancia incluyendo los amplificadores de carga (a menudo utilizados con dispositivos piezoeléctricos), técnicas de balance de carga, medición de impedancia en puentes AC y varias de las configuraciones de osciladores. Existe una variedad de circuitos integrados comerciales disponibles que pueden utilizarse para la medición de cambios de capacitancia desde unos pocos femtofaradios hasta cientos de picofaradios.

2.3.4. Resonancia

Un oscilador es una estructura diseñada para vibrar a una frecuencia particular. Los osciladores pueden fabricarse a partir de una gama de materiales monocristalinos y utilizando varios procesos de micromaquinado. La frecuencia de resonancia de tales microresonadores es extremadamente estable. Permitiéndoles ser usados como patrones de tiempo o como un elemento sensible a la oscilación. La fabricación de tales dispositivos, sin embargo, es compleja y requiere un encapsulado de alto rendimiento.

Figura 55. Diagrama en bloques de un autoresonador



Fuente: BEEBY, Sthepen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.98.

En la figura 55 se muestra el diagrama en bloques típico de un sensor autoresonante. Un sensor autoresonante se diseña de tal forma que su frecuencia natural de oscilación es una función de la medición que éste se encuentra realizando. La medición, que toma energía del proceso, generalmente altera la rigidez, masa o forma del resonador. Esto produce un cambio en la frecuencia del resonador. Los otros componentes de un sensor autoresonante son la unidad de vibración o mecanismo de excitación y el mecanismo de detección.

La unidad de excitación genera la vibración en la estructura mientras el mecanismo de detección es sensible a estas vibraciones. La frecuencia de la onda detectada forma la salida del sensor y esta señal es retroalimentada a la unidad mecánica por medio de un amplificador manteniendo la estructura en resonancia durante toda la medición.

En aplicaciones de medición de variables mecánicas, el mecanismo más común es el acoplamiento del resonador a la medición es aplicando una deformación a través de la estructura. Cuando se usa de esta manera se pueden obtener celdas de carga resonantes de buena calidad.

El acople se consigue colocando el resonador en un lugar adecuado específicamente diseñado sobre la estructura de tal forma que se deforme bajo la aplicación de la variable de proceso. La salida del resonador puede usarse para mostrar la deflexión de la estructura de detección y de este modo proporcionan una indicación de la magnitud de la variable medida.

Cuando se utiliza como una celda de carga resonante, la deformación efectiva aplicada aumenta la rigidez del resonador, lo cual resulta en un aumento de su frecuencia natural. Este principio es aplicado comúnmente en sensores de fuerza, sensores de presión y en acelerómetros.

Es posible acoplar la variable medible con la masa del oscilador, esto se puede conseguir envolviendo la estructura en un líquido o un gas, revistiendo el resonador en un material químicamente sensible o depositando material sobre el resonador. La presencia de líquidos o gases envolventes incrementa la inercia efectiva del resonador y disminuye su frecuencia de resonancia. Sensores de nivel y de densidad, por ejemplo, poseen sensores de masas acopladas.

2.3.4.1. Excitación o inducción de la vibración y mecanismos de detección

La naturaleza piezoeléctrica de los materiales GaAs y el cuarzo permiten fácilmente la excitación y la detección de formas de vibración resonantes.

Se deben depositar y formar adecuadamente en la superficie del resonador los materiales adecuados para la formación de los electrodos.

El lugar y la geometría de los electrodos debe ser diseñado cuidadosamente para maximizar el acople mecánico–eléctrico para que opere de la forma deseada. Optimizando este acople se puede generar la excitación de la forma deseada y maximizando la correspondiente detección de señales de vibración.

Tabla V. **Pares excitación – detección de fenómenos utilizados en auto resonadores**

Excitación	Detección
Piezoeléctrico	Piezoeléctrico
Magnético	Magnético
Electro térmico	Piezoresistivos
Opto térmico	Óptico

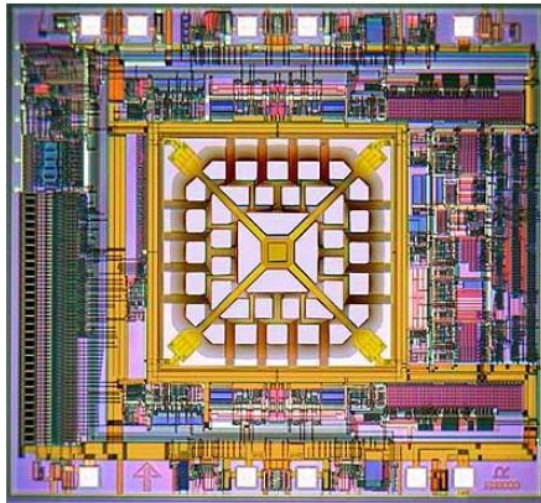
Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 99.

La excitación y la detección de resonancia en microresonadores de silicio no es nada sencilla debido a que el silicio no es intrínsecamente piezoeléctrico. Por lo tanto, otros mecanismos deben ser fabricados encima o al lado de la estructura del resonador. Existen gran cantidad de mecanismos adecuados, los cuales están basados en los principios ya conocidos. Por ejemplo, la resonancia se puede inducir y detectar electrostáticamente utilizando piezoresistores implantados.

Desde que se implantan los piezoresistores es posible utilizarlos directamente para medir la deformación de la estructura de detección, la complejidad añadida por el resonador, se justifica por el alto rendimiento en las aplicaciones de medición. Los distintos tipos de mecanismos de excitación y de detección utilizados con resonadores de silicio se detallan en la tabla V.

Muchos de los mecanismos enlistados pueden utilizarse tanto para excitar como para detectar las vibraciones del sensor, ya sea de forma simultánea o en conjunto con otro mecanismo. Los dispositivos que combinan en un solo elemento la excitación y la detección de las vibraciones en la estructura se denominan resonadores de un puerto. Aquellos que poseen elementos separados son llamados resonadores de dos puertos.

Figura 56. **Fotomicrografía de un acelerómetro de dos ejes coloreado artificialmente**



Fuente: www.memsic.com. [Consulta: febrero de 2014].

Que tan adecuados resultan estos mecanismos para producir o detectar una vibración resonantes depende de varios factores: la magnitud de las fuerzas de accionamiento, el factor de acople, la sensibilidad del mecanismo de detección, los efectos del mecanismo elegido sobre el rendimiento y el comportamiento del resonador y todas las consideraciones prácticas pertinentes para la fabricación del resonador y su ambiente final de uso.

2.4. El acelerómetro

Como su nombre lo indica es un transductor que se utiliza para medir las aceleraciones que experimentan los objetos, es uno de los sensores más utilizados para la detección y medición de movimiento. Este tipo de dispositivos poseen una amplia gama de aplicaciones en medición y control de la navegación inercial. Los acelerómetros implementados con MEMS tienen un extenso mercado en la industria automovilística, de teléfonos inteligentes y otros dispositivos. En la figura 56 se aprecia la estructura de un acelerómetro micromaquinado.

2.4.1. Principio de funcionamiento

Existen muchos tipos de acelerómetros que se han desarrollado utilizando distintas tecnologías de micromaquinado, sin embargo, la gran mayoría utiliza comúnmente como elemento mecánico de transducción una masa de prueba o masa sísmica, la cual se encuentra acoplada a un mecanismo de suspensión en un marco de referencia fijo, como se muestra en la figura 57.

Cualquier fuerza inercial produce una aceleración que actúa sobre la masa de prueba, de acuerdo con la Segunda Ley de Newton.

$$mx''(t) + bx'(t) + kx(t) = f(t)$$

Idealmente, este sistema se puede escribir en forma de función de transferencia luego de aplicarle la transformada de Laplace a la ecuación del sistema mecánico, en donde obviamente la posición x es una función del tiempo.

$$\mathcal{L}[mx'' + bx' + kx = f(t)]$$

$$m(\mathcal{L}[x'']) + b(\mathcal{L}[x']) + k(\mathcal{L}[x]) = F(s)$$

$$m(X(s)s^2 - sx(0) - x'(0)) + b(X(s)s - x(0)) + k(X(s)) = F(s)$$

$$mX(s)s^2 + bX(s)s + kX(s) = F(s) \text{ para } x'(0) = 0 \text{ y } x(0) = 0$$

$$X(s)[ms^2 + bs + k] = mA(s)$$

$$X(s)\left[s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}\right] = A(s)$$

$$\frac{X(s)}{A(s)} = \frac{1}{s^2 + \frac{b}{m}s + \frac{k}{m}}$$

Donde x es el desplazamiento de la masa de prueba respecto a su posición de reposo, a es la aceleración que se desea medir, b es la constante de amortiguación, m es la magnitud de la masa de prueba, k es la constante elástica del resorte del sistema y s es el operador de Laplace. La frecuencia de resonancia natural de este sistema se encuentra dada por:

$$w_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Y la sensibilidad como sigue:

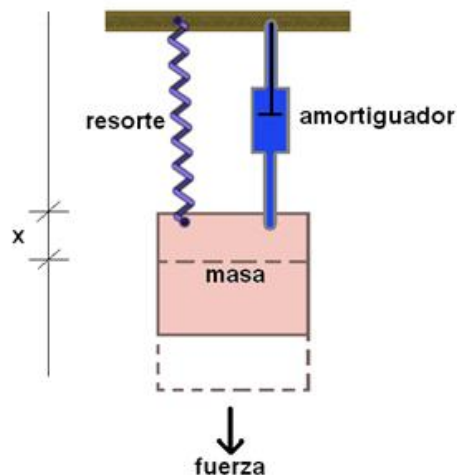
$$S = \frac{m}{k}$$

Dado que en un acelerómetro típicamente se mide una frecuencia menor a su frecuencia de resonancia, es importante buscar un balance en el diseño ya que es evidente que la sensibilidad y la frecuencia de resonancia aumentan y disminuyen con m/k respectivamente. Esto puede ser superado incluyendo en el sensor un elemento de lazo cerrado, un sistema de control de retroalimentación de fuerza, el cual se describe más adelante.

Para el desempeño dinámico del acelerómetro, el factor de amortiguamiento es crucial, para un ancho de banda máximo el elemento sensible debe ser críticamente amortiguado. Debe notarse que en los acelerómetros micromaquinados el amortiguamiento generado sobre la masa de prueba se realiza por un medio viscoso.

Dependiendo del diseño mecánico, sin embargo, el coeficiente de amortiguamiento no puede asumirse constante, dado que este aumenta con la desviación de la masa de prueba y así mismo con la frecuencia del movimiento de la masa de prueba. Este fenómeno se llama *squeeze film damping* y representa uno de los mayores problemas en la construcción de dispositivos en la nanoescala, específicamente en lo que al manejo de fluidos se refiere.

Figura 57. **Modelo mecánico de un acelerómetro**



Fuente: elaboración propia, con programa Paint.net.

Algo común en los acelerómetros micromaquinados es el hecho de que el desplazamiento de la masa de prueba es lo que se mide utilizando un circuito de medición de la posición, para convertir este movimiento en una señal eléctrica. Existen muchos mecanismos de transducción que pueden utilizarse para transformar el movimiento mecánico en una señal eléctrica, tales como el capacitivo, piezoresistivo, piezoeléctrico, óptico, entre otros. Cada uno de ellos posee sus ventajas y desventajas. Los primeros tres mecanismos son los más comunes.

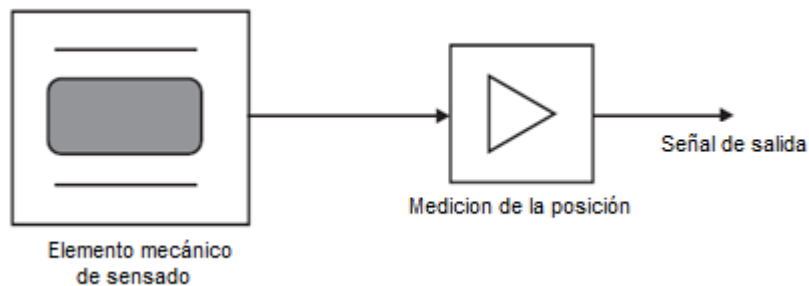
Las características y el rendimiento del acelerómetro están directamente influenciados por la interface de medición, entre los más importantes requerimientos de calidad se encuentran un bajo ruido, alta linealidad, buena respuesta dinámica y bajo consumo de potencia. Idealmente, el circuito interface debe poderse representar como un bloque ideal de ganancia, relacionando el desplazamiento de la masa de prueba con una señal eléctrica.

2.4.1.1. Acelerómetro de lazo abierto

Si la señal eléctrica de salida del transductor de posición es directamente usada por el acelerómetro, se dice que se tiene un acelerómetro de lazo abierto, este concepto se muestra en la figura 58.

La mayoría de los acelerómetros comerciales son de lazo abierto, lo que implica que los dispositivos se construyen de tal forma que sean lo más simple posible y por consiguiente más baratos. La dinámica del elemento de detección mecánica está determinada generalmente por las características del sensor, esto puede ser problemático ya que la masa y la constante del resorte están usualmente sujetas a tolerancias considerables durante su manufactura (dependiendo del proceso +/- 20 %). Además, los efectos de segundo orden para una alta desviación de la masa de prueba introducen efectos no lineales, *squeeze film damping*, aumento de rigidez del resorte para grandes deformaciones o el cruzado de la sensibilidad de los ejes, sin embargo, para la mayoría de aplicaciones automotrices, teléfonos inteligentes y otras aplicaciones de bajo costo el rendimiento logrado es aceptable.

Figura 58. **Diagrama en bloques de un acelerómetro de lazo abierto**



Fuente: SthephenBEEBY, *MEMS Mechanical Sensors*. p.177.

2.4.1.2. Acelerómetro de lazo cerrado

La señal de salida de posición medida por el circuito, junto a un controlador adecuado puede usarse para dirigir un mecanismo de acción que obligue a la masa de prueba regresar a su posición de reposo. La señal eléctrica proporcional a esta fuerza de realimentación provee una medición de la aceleración de entrada. Esta usualmente es referida como un acelerómetro de lazo cerrado o acelerómetro de fuerza equilibrada. Ese enfoque tiene muchas ventajas:

- La desviación de la masa de prueba se reduce considerablemente, por lo tanto, los efectos de la no linealidad como el *squeezee film damping* y en el sistema de suspensión mecánica se reducen considerablemente.
- La sensibilidad se encuentra ahora determinada principalmente por el sistema de control; por lo tanto, el balance entre sensibilidad y ancho de banda puede despreciarse.

- La dinámica del sensor puede ser adaptada a la aplicación con la ayuda del control adecuado.

El inconveniente de un acelerómetro de lazo cerrado es principalmente la complejidad añadida a la interface y el control electrónico. Existe una gama de mecanismos actuadores para mantener a la masa de prueba en su posición de reposo, estos pueden ser sistemas electroestáticos, magnéticos y térmicos. Las fuerzas electroestáticas son por mucho las más comunes ya que para pequeñas distancias estas fuerzas son relativamente grandes, así mismo, el voltaje típico de alimentación se encuentra entre 5 y 15 voltios.

Si se utiliza detección de posición tipo capacitivo, los mismos electrodos pueden ser utilizados para medición y actuación. Se debe tener cuidado, sin embargo, al asegurarse que la señal de los sensores y actuadores no interactúe. Un problema mayor de las fuerzas electroestáticas es que siempre son de atracción y no lineales debido a que estas son proporcionales al cuadrado del voltaje e inversamente proporcionales al cuadrado de la distancia. En consecuencia, es difícil producir una retroalimentación negativa y lineal.

2.4.2. Tipos de acelerómetros

Entre los tipos principales de acelerómetros, se pueden mencionar los piezoresistivos, los capacitivos, los piezoeléctricos y los resonantes. La diferencia entre uno y otro como su nombre lo indica es únicamente el método de transducción de la señal mecánica a eléctrica.

2.4.2.1. Acelerómetros piezoresistivos

El primer acelerómetro micromaquinado, fabricado por lotes, fue reportado por la Universidad de Stanford en 1979. Este utilizaba un sensor construido con micromaquinado de volumen, el cual consistía en una oblea de silicio que hacía las veces de masa de prueba colocado sobre un voladizo que constituía el sistema de suspensión. La oblea de silicio se encontraba unida entre dos obleas de vidrio en las cuales se habían grabado cavidades para permitir el movimiento de la masa de prueba en respuesta a la aceleración. Las obleas de vidrio además protegían la masa de prueba y actuaban como un sistema antiimpactos.

El movimiento de la masa de prueba se detectaba utilizando piezoresistores, los cuales se fabricaban implantando boro directamente en el sistema de suspensión de la masa de prueba. En general, los primeros dispositivos tendían a realizar la medición de la posición con piezoresistores, dado que estos son fáciles de fabricar sobre el silicio y su circuito para la adquisición de señales es relativamente simple, el cual proporciona una señal de salida de baja impedancia y se puede utilizar con un puente resistivo para el acoplamiento de las señales.

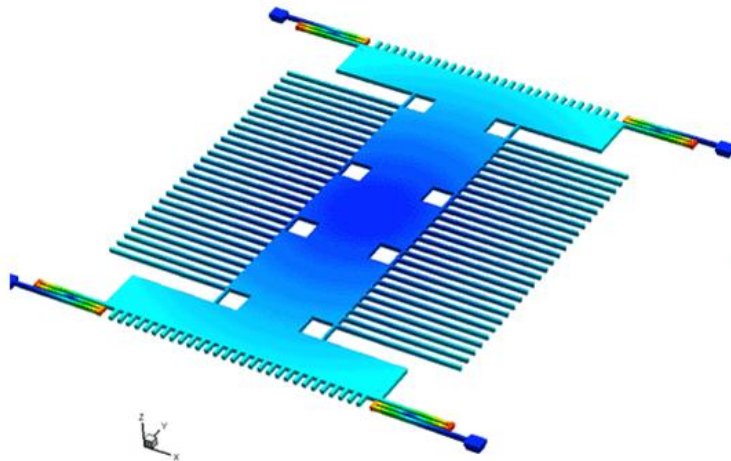
Estos acelerómetros piezoresistivos se basaron directamente en la experiencia obtenida durante el desarrollo de los sensores de presión micromaquinados. Sin embargo, existe un serio inconveniente y es que la señal de salida tiende a poseer gran dependencia a la temperatura debido a que los piezoresistores producen ruido térmico inherente, lo cual afecta de sobremanera la señal de salida que es relativamente pequeña.

La microestructura típica de los acelerómetros piezoresistivos consiste en un arreglo de multicapas con una oblea central que comprende la masa de prueba y el sistema de suspensión, además poseen obleas de silicio o pírex en la parte de arriba y de abajo lo que provee un sistema de protección de sobre rango y proporciona un comportamiento críticamente amortiguado.

2.4.2.2. Acelerómetros capacitivos

Realizar la medición del desplazamiento de la masa de prueba de forma capacitiva posee grandes ventajas sobre el método piezoresistivo dado que esta provee una señal de salida más amplia, una buena respuesta en estado estable y una mejor sensibilidad debido a su mejor capacidad de manejo de ruido.

Figura 59. Estructura de la masa de prueba de un acelerómetro capacitivo



Fuente: www.conventor.com. [Consulta: febrero de 2014].

La principal desventaja de los sensores capacitivos es que son susceptibles a los campos electromagnéticos que le rodean, por lo tanto, se deben de apantallar cuidadosamente. Sin embargo, resultan inevitables las capacitancias parasitas en la entrada de la interface electrónica lo cual degrada la señal.

Generalmente, lo que se detecta es un cambio de capacitancia diferencial. Cuando la masa de prueba se mueve lejos del electrodo, la capacitancia disminuye y cuando se mueve hacia el electrodo la capacitancia aumenta. Ignorando los efectos de borde, el cambio en la capacitancia se encuentra dado por la expresión:

$$\Delta C = 2 \varepsilon_0 \varepsilon_r A \frac{x}{d_0^2}$$

La cual es proporcional a la desviación causada por aceleración de entrada solamente si se asume que la desviación es pequeña.

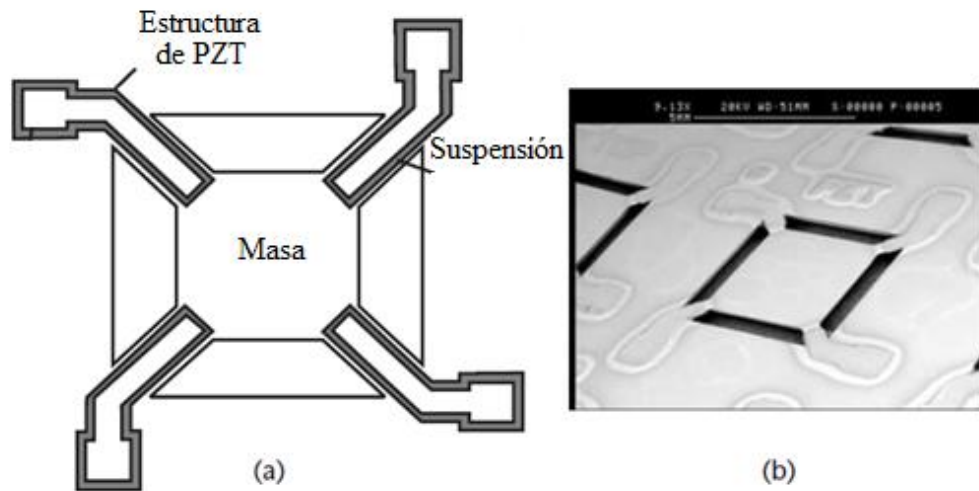
Para acelerómetros de precisión no se puede asumir esto y por lo tanto es necesario utilizar un control de lazo cerrado para asegurarse que la masa de prueba tenga únicamente pequeñas desviaciones.

En la figura 59 se puede ver la estructura de la masa de prueba de un acelerómetro capacitivo. En cada una de las esquinas puede observarse el sistema de suspensión, las estructuras en forma de peine conforman el electrodo central de los capacitores de placa móvil.

2.4.2.3. Acelerómetro piezoelectrico

Los acelerómetros macroscópicos generalmente utilizan materiales piezoelectricos para realizar la detección de la masa de prueba. Existe un amplio rango de acelerómetros micromaquinados que se encuentran basados en este principio. La ventaja es el extenso ancho de banda que estos sensores son capaces de cubrir, el cual puede fácilmente alcanzar los kilohertz. El mayor inconveniente, sin embargo, es que estos dispositivos son incapaces de responder a aceleraciones de baja frecuencia.

Figura 60. Estructura principal de un acelerómetro piezoelectrico fabricado utilizando deposición por serigrafía



Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.187.

El zirconato de titanio, conocido solamente como PZT es uno de los materiales piezoelectricos que se utiliza más a menudo para la fabricación de acelerómetros.

Este material se puede depositar por medio de pulverización catódica a una temperatura alrededor de los 550 grados Celsius para formar finas películas de aproximadamente un micrómetro, utilizando esta técnica es posible obtener una sensibilidad de 320 milivoltios por unidad de gravedad estandar y un extenso ancho de banda desde un hertz hasta 200 kilohertz.

Así mismo, utilizando el mismo material, pueden depositarse capas de hasta 60 μm de grosor utilizando deposición por medio de serigrafía, en la figura 60 se muestra una masa sísmica construida con esta técnica.

2.4.2.4. Acelerómetros resonantes

Este tipo de acelerómetros consisten en una masa sísmica que cambia el esfuerzo en un resonador acoplado, el cual en respuesta cambia su frecuencia de resonancia, de la misma forma que sucede cuando se afina una guitarra. La principal ventaja de este diseño es que la frecuencia de salida puede convertirse fácilmente a una señal digital utilizando un convertidor de frecuencias, el cual en general es más inmune al ruido.

Se requiere una alta frecuencia de resonancia para lograr una buena sensibilidad. La sensibilidad se expresa en términos del cambio de frecuencia por unidad de aceleración. En consecuencia el resonador debe contar con una frecuencia nominal alta. La geometría de los soportes es la que tiene la capacidad de proporcionarle al acelerómetro una frecuencia nominal alta, en general para conseguir esto los soportes deben ser lo más delgados posibles, lo cual es excelente pues se presta para fabricarse utilizando la tecnología de micromaquinado de superficie. Además, para lograr un alto factor de calidad, el resonador idealmente debe ser encapsulado en vacío.

2.5. El giroscopio

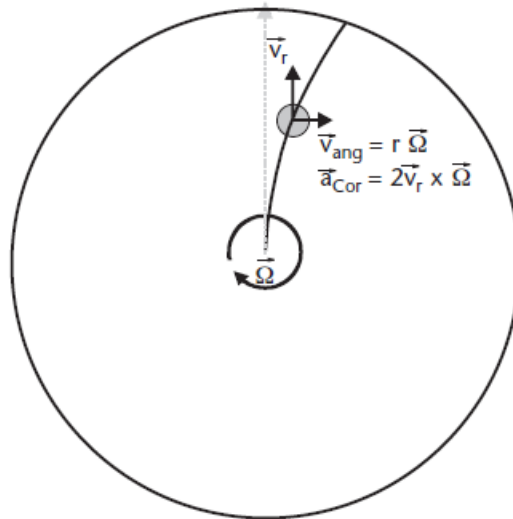
El giroscopio es un dispositivo mecánico que se utiliza para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio de algún objeto o vehículo. Está formado esencialmente por un cuerpo con simetría de rotación que gira alrededor del eje de dicha simetría. Cuando el giroscopio se somete a un momento de fuerza que tiende a cambiar la orientación de su eje de rotación, este presenta un comportamiento aparentemente paradójico, ya que cambia de orientación girando respecto a un tercer eje, perpendicular tanto a aquel respecto del cual se lo ha empujado a girar, como a su eje de rotación inicial. En general se refiere a éste como el efecto giroscópico.

2.5.1. Principio de operación

Virtualmente todos los giroscopios micromaquinados consisten en una estructura mecánica que es llevada a resonancia y excita un oscilador secundario situado sobre su misma estructura o en otra estructura acoplada, por medio de las Fuerzas de Coriolis. La amplitud de esta segunda oscilación es directamente proporcional a la velocidad angular que se desea medir. La Fuerza de Coriolis es una fuerza virtual que depende del marco de referencia inercial del observador.

Para entender el fenómeno se debe imaginar a una persona en un disco en movimiento, lanzando una bola radialmente lejos de sí, con una velocidad V_r . La persona en el marco de referencia rotativo observaría que la trayectoria del balón se curva. Esto es debido a la aceleración de Coriolis que proporcionan las fuerzas de Coriolis que actúan perpendicularmente a la componente radial del vector de velocidad de la pelota.

Figura 61. **Efecto Coriolis**



Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.197.

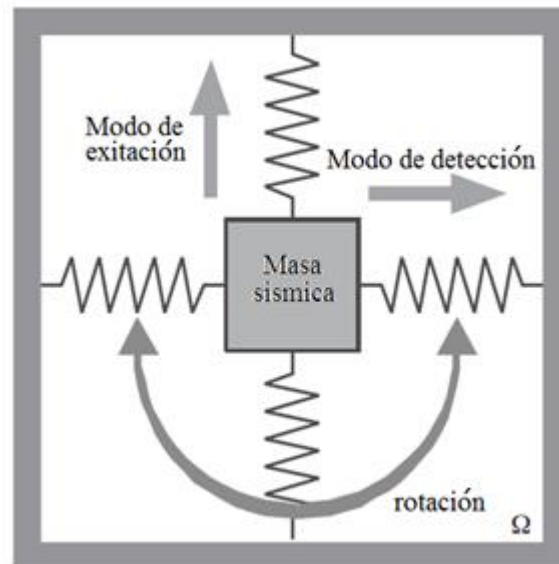
Una forma de explicar el origen de esta aceleración es pensar en la velocidad angular que posee el balón en su camino del centro del disco hasta el borde, como se muestra en la figura 61, la velocidad angular V_{ang} aumenta con la distancia del balón hacia el centro ($V_{ang} = r \times \omega$) pero cualquier cambio en la velocidad inevitablemente da lugar a una aceleración en la misma dirección. Esta aceleración está dada por el producto cruz de la velocidad angular ω del disco y la velocidad radial V_r del balón.

$$a_c = 2\Omega \times V_r$$

Los giroscopios mecánicos de gran tamaño generalmente utilizan un volante de gran masa y que se mueve a gran velocidad y por lo tanto de un momento angular grande el cual contrarresta todos los torque externos y crea un marco de referencia inercial que mantiene constante el eje de giro.

Esta aproximación no es adecuada para los sensores micromaquinados ya que las leyes de esta escala no son favorables en lo que a fricción se refiere y por lo tanto, no existen cojinetes micromecanizados de alta calidad, en consecuencia todos los giroscopios MEMS utilizan una estructura vibrante que acopla la energía de un fuente de oscilación forzada primaria hasta una secundaria.

Figura 62. **Modelo de un giroscopio resonante**



Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.198.

En la figura 62 se muestra un modelo agrupado de un giroscopio simple adecuado para su implementación en micromaquinado. La masa de prueba se excita por medio de una oscilación a lo largo del eje x con una amplitud y frecuencia constante. La rotación sobre el eje z añade energía a la oscilación a lo largo del eje y, la cual posee una amplitud que es proporcional a la velocidad de rotación.

Al igual que en el caso del acelerómetro de lazo cerrado, es posible incorporar este fenómeno para realizar la medición en un lazo de fuerza retroalimentada. Cualquier movimiento a lo largo del eje de detección es medido y una fuerza es aplicada para contrarrestar este movimiento. La magnitud de la fuerza requerida es para contrarrestar el movimiento es una medida de la velocidad angular.

Un problema es la relativamente pequeña amplitud de la fuerza de Coriolis comparada con la fuerza impulsora. Asumiendo una unidad de vibración principal que produce una onda senoidal dada por:

$$x(t) = x_0 * \sin(\omega t)$$

Donde x_0 es la amplitud de la oscilación y ω es la frecuencia de la señal impulsora, la aceleración de Coriolis se encuentra dada por:

$$a_c = 2v(t) \times \Omega = 2\Omega x_0 \omega \cos(\omega t)$$

Usando valores típicos, $x_0 =$ un micrómetro, $\Omega =$ un grado sobre segundo y $\omega = (2\pi) 20$ kilohertz, la aceleración de Coriolis es únicamente 4,4 milímetros sobre segundo al cuadrado si el elemento sensorial a lo largo del eje sensible es considerado como un sistema masa resorte amortiguado de segundo orden con un factor de calidad $Q = 1$, el desplazamiento resultante es únicamente de 0,0003 nanómetros. Una forma de incrementar el desplazamiento es fabricando el sensor con elementos con un alto factor de calidad Q en la estructura y luego ajustando la frecuencia principal a la frecuencia de resonancia para la función de sensor.

Factores de calidad demasiado altos en la estructura, sin embargo, requieren un encapsulado en vacío, haciendo que el proceso de fabricación sea mucho más demandante, además, el ancho de banda del giroscopio es proporcional a ω/Q ; por lo tanto, si el factor de calidad es 10 000 o más logrado en vacío, el ancho de banda se reduce a unos pocos hertz.

Por último, es difícil diseñar estructuras para una exacta frecuencia de resonancia, debido a las tolerancias de manufactura. Una solución es la de diseñar la función de sensor para una alta frecuencia de resonancia más alta que la frecuencia de excitación y luego disminuir la frecuencia de resonancia para el modo de captura con el ajuste de la constante del resorte utilizando fuerzas electroestáticas.

Un compromiso aceptable entre ancho de banda y sensibilidad se logra ajustando la frecuencia de resonancia para el modo sensor, cercana a la frecuencia de excitación (entre el 5 % y 10 %).

Un segundo problema fundamental con la velocidad de vibración de los giroscopios es debido al llamado error de cuadratura. Este tipo de error originado debido a las tolerancias en la manufactura se manifiesta a sí mismo como una pérdida de alineación del eje principal de oscilación desde el eje de accionamiento nominal. Como resultado, una parte del movimiento de excitación se encontrará a lo largo del eje sensorial.

Aunque el ángulo de desalineación es pequeño, debido a la mínima aceleración de Coriolis, el movimiento resultante a lo largo del eje sensible puede ser mucho más grande que el movimiento causado por la aceleración de Coriolis.

2.5.2. Giroscopio mono eje

Los primeros giroscopios estaban basados en horquillas de dos dientes ajustables, los cuales se encontraban unidos a una barra, las cuales eran excitadas por una resonancia en antifase a lo largo de uno de sus ejes. La rotación causa que los dientes entren en resonancia a lo largo del eje perpendicular.

Existen diferentes mecanismos que pueden ser utilizados para producir el modo de oscilación principal. Por ejemplo, la oscilación utilizando campos magnéticos tiene la ventaja que puede lograr oscilaciones de gran amplitud. Una gran desventaja, sin embargo, es que se requiere un imán permanente colocado muy cerca del elemento sensible, de esta manera el proceso de fabricación no es totalmente compatible con las etapas del proceso clásico de micromaquinado. La excitación piezoeléctrica también se ha utilizado con la horquilla de dos puntas con la oscilación en dirección perpendicular a la superficie de la oblea usando micomecanizado de volumen.

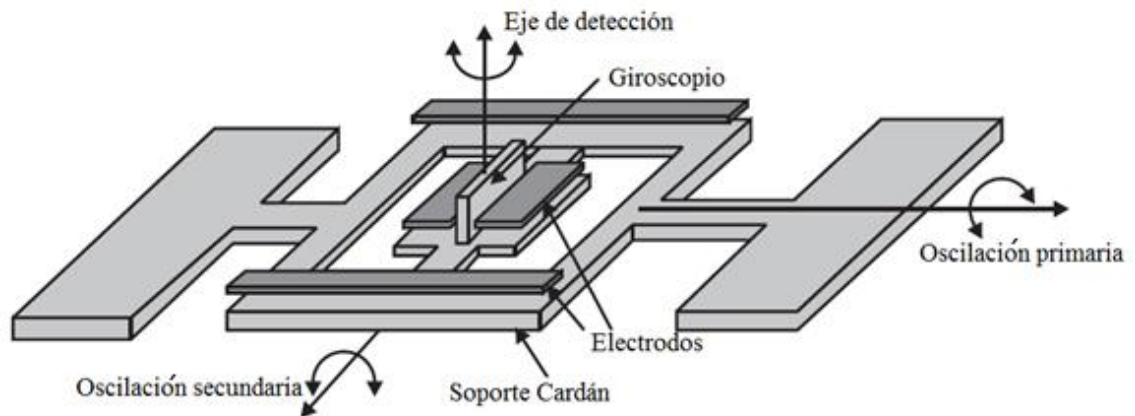
El principal enfoque para los giroscopios prototipo, sin embargo, es utilizar campos electrostáticos para inducir la oscilación primaria.

Para la detección de la oscilación secundaria, existen diferentes técnicas de medición de la posición, tales como las piezoresistivas, por corriente de tunelización, técnicas ópticas y la técnica capacitiva, esta última es la técnica predominante.

En la figura 63 se muestra la microestructura del que es considerado el primer giroscopio micromaquinado, consiste en una estructura de doble cardán sobre apoyos flexibles.

El cardán exterior es inducido a oscilar a 3 kilohertz hacia afuera del plano de la oblea utilizando fuerzas electroestáticas. Un control automático de ganancia de lazo cerrado se asegura que la amplitud de la oscilación sea constante.

Figura 63. **Giroscopio montado sobre una estructura de doble cardán**



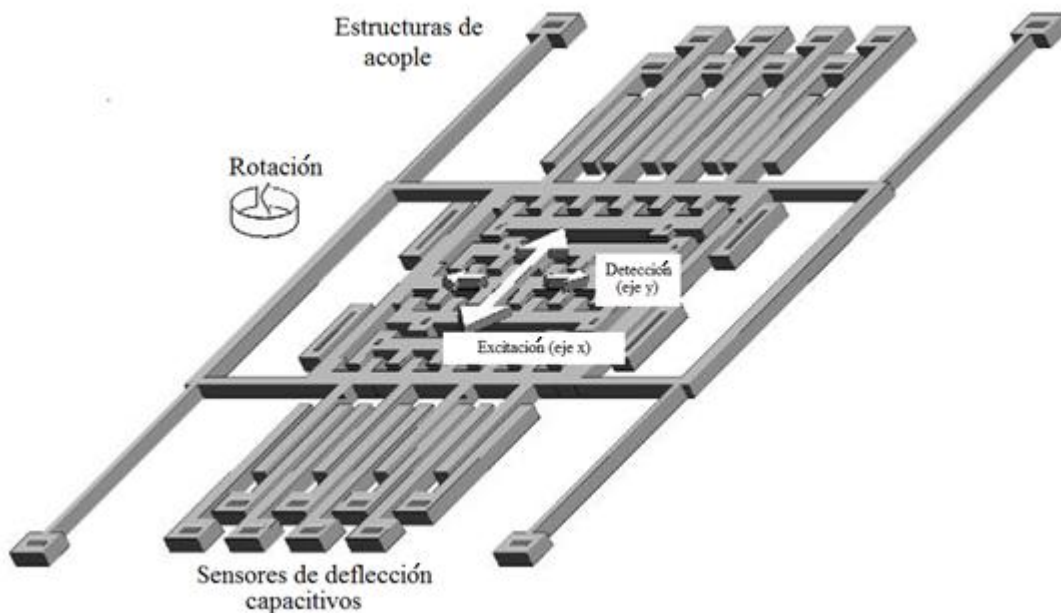
Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.199.

En presencia de una rotación alrededor del eje normal al plano del elemento sensitivo, la energía es transferida al cardan interno. El cual empieza a vibrar a la misma frecuencia y a una amplitud proporcional a la velocidad angular de giro.

La sensibilidad máxima se logra cuando la frecuencia primaria de la estructura externa es igual a la frecuencia de resonancia del cardan interno.

El elemento sensible puede ser operado en modo de balance de fuerza. Las fuerzas electroestáticas generadas por los voltajes de retroalimentación en los electrodos contrarrestan el movimiento del cardán interno.

Figura 64. **Giroscopio fabricado por medio de micromaquinado de superficie**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p.200.

El primer giroscopio de silicio policristalino de superficie micromecanizada fue presentado por Clark y Howe en 1996, este se trataba de una implementación directa del arreglo mostrado en la figura 62. Actuadores estándar en forma de peine son utilizados para inducir la oscilación en la estructura sobre uno de los ejes que cruza el plano, digamos el eje x, lo que permite amplitudes relativamente grandes.

Cualquier señal de velocidad angular alrededor del eje que apunta hacia afuera del plano de la estructura, en este caso, el eje z excita un movimiento secundario a lo largo del otro eje coplanar, es decir, el eje y, el elemento de detección se muestra en la figura 64 y consiste en una estructura de silicio policristalino de 2 micrómetro de grosor.

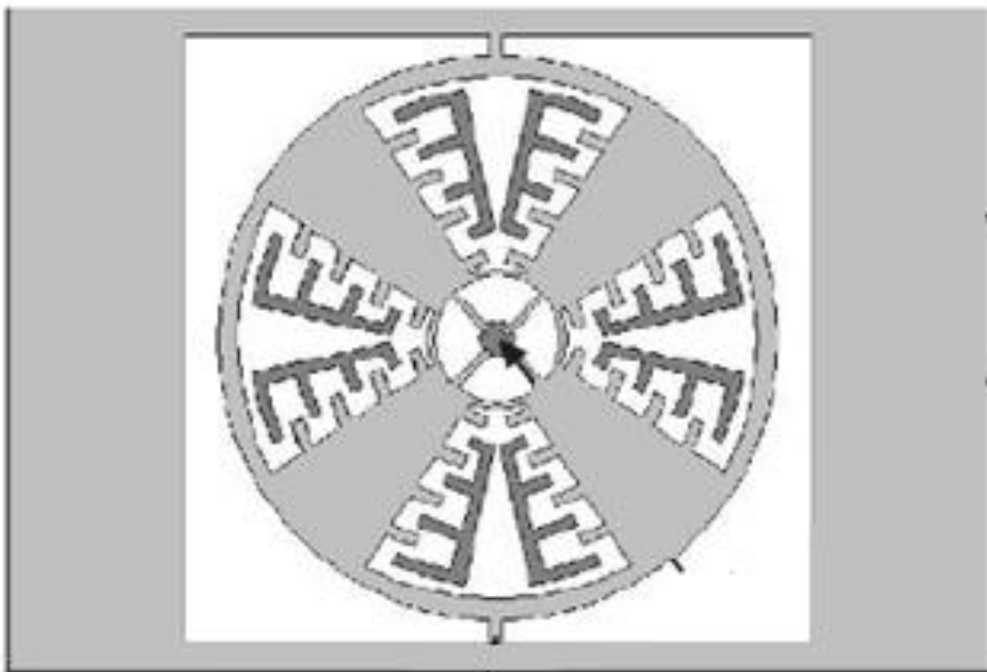
Otro giroscopio micromecanizado de superficie fue presentado por Geiger, el cual fue manufacturado utilizando el proceso de fundición Bosch, con lo cual se consiguió una capa estructural policristalina con un espesor de 10,3 micrometros, este grosor es relativamente grande para un proceso de micromecanizado de superficie común y es conseguido por deposición epitaxial de silicio.

Debajo de las estructuras libres una segunda capa delgada de silicio policristalino se utiliza como electrodos e interconexiones. El elemento de detección se muestra en la figura 65, este posee dos modos de oscilación rotativos desacoplados. El modo de excitación es alrededor del eje z y el modo de excitación con fuerzas electroestáticas utilizando el electrodo del radio interior del volante interno. Acoplado al volante interno, por resortes torsionales se encuentra una estructura rectangular la cual en respuesta a la rotación sobre el eje de detección, exhibe una oscilación secundaria sobre el eje y.

Debido a la alta rigidez de las estructuras de suspensión en esta dirección, la oscilación del volante interno es suprimida y solamente la estructura rectangular puede moverse debido a la fuerza de Coriolis. Con este enfoque los modos primario y secundario están mecánicamente desacoplados, lo cual elimina cualquier efecto que pueda darse en estructuras acopladas, como el error de cuadratura.

La oscilación del modo secundario es detectada capacitivamente por electrodos colocados sobre el substrato, este sensor reporta un rango dinámico de 200 grados sobre segundo y un valor promedio cuadrático del ruido de 0,05 grados sobre segundo en un ancho de banda de 50 hertz, lo cual lo hace eficiente para la mayoría de las aplicaciones en vehículos.

Figura 65. **Giroscopio de ejes desacoplados**



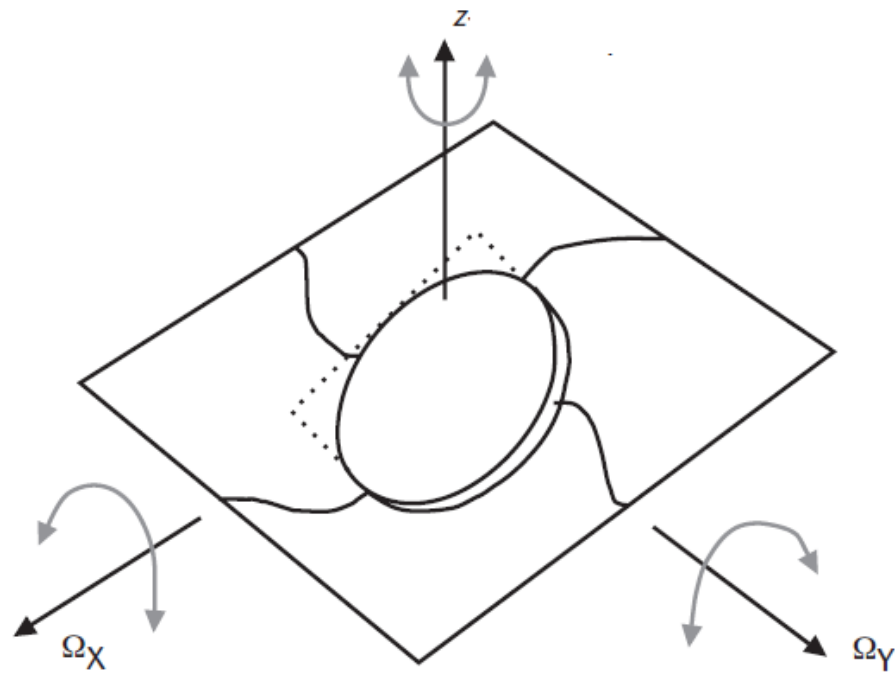
Fuente: BEEBY, Sthephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 201.

2.5.3. **Giroscopios de doble eje**

Es posible diseñar giroscopios micromaquinados capaces de detectar el movimiento angular sobre dos ejes simultáneamente.

Estos dispositivos se encuentran basados en una estructura formada por un disco que es llevado a oscilación rotacional por medios electroestáticos. El movimiento angular alrededor del eje x causa una aceleración de Coriolis alrededor de eje y, el cual, en consecuencia, produce una pequeña oscilación en el rotor. Similarmente una rotación del sensor alrededor del eje y causa que el rotor se incline sobre el eje x.

Figura 66. **Modelo conceptual del giroscopio de dos ejes**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 203.

Para la detección de la inclinación del rotor se utilizan electrodos capacitivos que son colocados por debajo del mismo, así mismo para distinguir los diferentes modos de salida, se utilizan diferentes frecuencias de modulación, en general, se utilizan frecuencias de 200 y 300 kilohertz para obtener una precisión de un grado sobre segundo. con un ancho de banda de 25 hertz. La frecuencia natural del rotor es alrededor de 25 kilohertz, similarmente a los dispositivos de un solo eje, se puede utilizar un alto factor de calidad para amplificar el movimiento de salida. En un encapsulado a 80 Pascales de vacío se puede conseguir un factor de calidad de alrededor de 1 000. En la figura 66 se muestra un modelo conceptual de este giroscopio.

2.5.4. Mejoras en los sensores inerciales

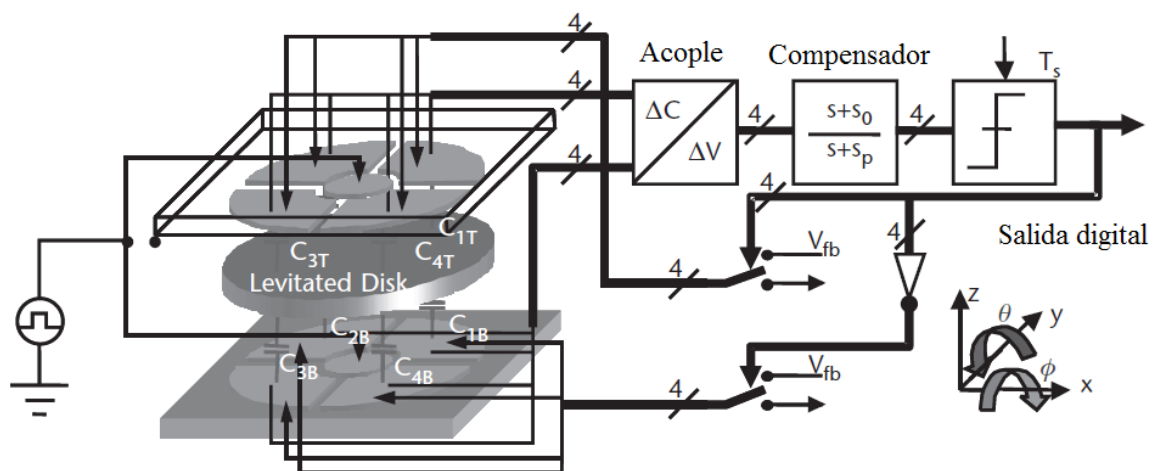
Se espera que en los próximos años, se obtengan mejores innovaciones con respecto a los sensores multieje, tanto para movimiento lineal como para movimiento angular. Actualmente el acelerómetro de tres ejes utiliza únicamente una masa sísmica para la detección del movimiento en las tres dimensiones simultáneamente. Así mismo, se espera lograr un sensor capaz de medir el movimiento de seis grados de libertad, conteniendo el sensor mecánico, el control y la interface electrónica en el mismo encapsulado.

Otro enfoque bastante prometedor puede verse en el uso de un disco micromaquinado el cual se hace levitar por fuerzas electroestáticas o magnéticas. Es bastante similar a los giroscopios macroscópicos de volante; los cuales, a falta de un buen cojinete en el mundo microscópico se excluyen por completo del micromundo, sin embargo, al utilizar levitación se eliminan los problemas de fricción.

Cualquier movimiento angular perpendicular al eje de giro del disco hace que este retroceda y este movimiento puede detectarse con la ayuda de sensores capacitivos, el desplazamiento del disco proporciona una medición de la velocidad angular.

Utilizar un objeto levitado para detección inercial tiene como principal ventaja que no existen conexiones mecánicas del substrato al disco y por tanto la constante del resorte solamente depende de las fuerzas electrostáticas creadas por los voltajes o corrientes aplicadas en los electrodos que lo envuelven.

Figura 67. **Prototipo de disco de levitación que involucra un acelerómetro y un giroscopio**



Fuente: BEEBY, Stephen. *MEMS Mechanical Sensors*. p. 207.

La levitación utilizando fuerzas magnéticas también ha sido investigada y se ha demostrado el funcionamiento completo de un giroscopio basado en este enfoque.

Las fuerzas electromagnéticas son producidas por corrientes superiores a un amperio, lo cual excluye el uso de encapsulados estándar de circuitos integrados, eso le da una gran desventaja a esta tecnología. Es más prometedor el uso de fuerzas electrostáticas para levitar el disco giratorio, ya que requiere menos corrientes. El disco levitado puede utilizarse para realizar la medición de la aceleración lineal en tres ejes y la aceleración angular en dos ejes. En la figura 67 se muestra un prototipo de este tipo de sensor compuesto.

3. ANÁLISIS DE LOS SISTEMAS Y COMPONENTES INVOLUCRADOS EN EL DESARROLLO DEL DISPOSITIVO

En el desarrollo del dispositivo que se desea construir se encuentran involucrados varios componentes y sistemas esenciales, principalmente el acelerómetro y el giroscopio que son la base de esta tecnología, pero además se necesitan otros componentes que hacen posible el acople, manejo y control de las señales, por ejemplo, el microcontrolador y el potenciómetro digital, entre otros. Es importante conocer el funcionamiento de cada uno de ellos para comprender de forma más amplia su función en el sistema integrado.

3.1. El *joystick* o palanca de mando

La palanca de mando es un transductor electromecánico capaz de convertir el movimiento en dos ejes ortogonales coplanarios a una señal eléctrica. Se utilizan principalmente para indicar la dirección en la cual se debe mover un vehículo o un objeto, ya sea este físico o virtual. Estos dispositivos generalmente están formados por un arreglo de potenciómetros analógicos montados a 90 grados entre sí, de tal forma que al desplazarse sobre cualquiera de los ejes se obtiene un cambio de resistencia en el potenciómetro alineado con este eje.

En general la posición de reposo del dispositivo se encuentra en el punto en donde la resistencia de ambos ejes es exactamente el 50 % de la resistencia nominal de los potenciómetros, esto con el fin de detectar además del eje de movimiento, la dirección sobre la que se realiza el mismo.

Para la adquisición de la señal de movimiento, los potenciómetros se conectan en un arreglo de divisor de voltaje, produciendo estos una señal de voltaje lineal y directamente proporcional al cambio de resistencia, que a su vez es proporcional al movimiento de la palanca. El voltaje obtenido en cada uno de los potenciómetros es escalado y acoplado a un convertidor analógico a digital para utilizarlo en conjunto con un microprocesador para su detección y posterior procesamiento de la señal.

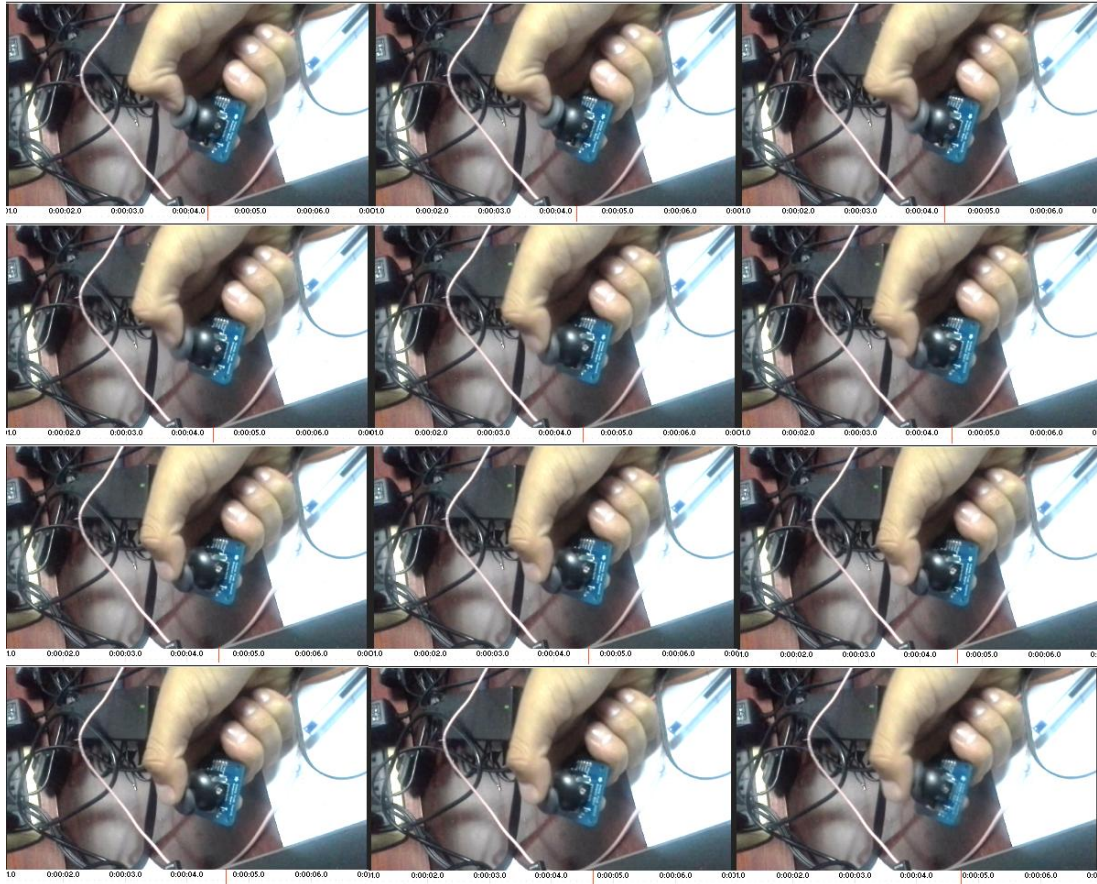
Figura 68. **Palanca de mando**



Fuente: www.abcelectronica.net. [Consulta: febrero de 2014].

Esta señal obtenida puede utilizarse para control de la navegación de vehículos físicos y virtuales, así como cualquier tipo de robot que pueda ser teledirigido por un ser humano.

Figura 69. **Secuencia de cuadros de video del accionamiento de un joystick**



Fuente: elaboración propia.

Al analizar un video cuadro por cuadro fue posible determinar que el tiempo que le toma a un usuario llevar la palanca desde su punto de reposo hasta su punto máximo (o mínimo) es en promedio 442 milisegundos, este dato es importante, pues se espera que el sistema a diseñar sea capaz de igualar la respuesta de este dispositivo. En la figura 69 se muestra una secuencia de cuadros con una separación en el tiempo de 37 milisegundos.

3.2. El potenciómetro digital

Un potenciómetro digital es un dispositivo electrónico encapsulado que permite emular el comportamiento de un potenciómetro analógico, realizando internamente la conexión y desconexión de un arreglo de resistores, que conectados en serie producen la resistencia nominal del potenciómetro. La conexión y desconexión de los resistores internos se encuentra controlada por un contador ascendente-descendente el cual puede discriminar si se desea aumentar la resistencia o si se desea disminuir, este contador se gobierna con la ayuda de dos señales externas que sirven para indicar si se desea aumentar o disminuir la resistencia y para generar el flanco negativo que produce el cambio en el dispositivo

A diferencia de los potenciómetros analógicos que poseen un infinito número de posiciones y por lo tanto pueden presentar infinitos valores de resistencia entre su rango, los potenciómetros digitales se encuentran limitados por su resolución, que depende del número de resistores individuales del cual se encuentra conformado. Por ejemplo, si se tiene un potenciómetro digital de 10 kilohmios que posee en su interior 10 resistores de un kilohmio cada uno, la resolución de este potenciómetro digital será de un kilohmio/paso, es decir solo es posible aumentar o disminuir la resistencia del arreglo de un kilohmio en un kilohmio. Obviamente los potenciómetros comerciales no poseen tan baja resolución y dependiendo del fabricante pueden tener pasos de 128, 256, 1 024 y así sucesivamente dependiendo del grado de precisión requerido.

Estos potenciómetros fueron desarrollados para poder manejar señales digitales y convertirlas en una señal analógica equivalente. Tanto los potenciómetros analógicos, como los digitales, proporcionan el mismo tipo de señal de salida de voltaje.

Los potenciómetros digitales se utilizan principalmente en equipos electrónicos modernos para aumentar o disminuir volumen, contraste o alguna otra propiedad en audio y video, tal como, sus predecesores analógicos.

La ventaja de los potenciómetros digitales sobre los analógicos radica en la facilidad con la que estos pueden integrarse a los sistemas digitales, que hoy en día básicamente son el estándar.

3.2.1. El potenciómetro digital AD5220

El potenciómetro digital AD5220 (figura 70) fabricado por Analog Devices posee una resistencia nominal de 10 kilohmios y dispone de 128 pasos, este dispositivo ejecuta las mismas funciones que un potenciómetro analógico de resistencia variable y está optimizado para aplicaciones de instrumentación y control donde se requiera el uso de pulsadores para el control.

Figura 70. **Potenciómetro digital AD5220**

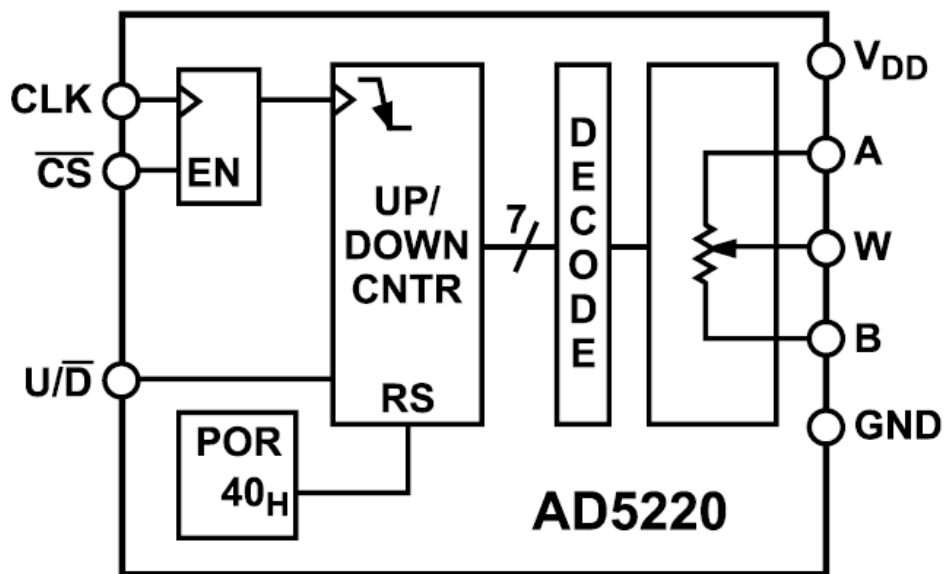


Fuente: www.abcelectronica.net. [Consulta: febrero de 2014].

La resolución del dispositivo es de 78 ohmios/paso, lo cual puede calcularse fácilmente dividiendo la resistencia nominal entre el número de pasos que posee el dispositivo. La disposición interna del circuito integrado es típica para esta familia de dispositivos y se muestra el diagrama en bloques en la figura 71, puede observarse principalmente el contador, un decodificador y el arreglo de resistores.

Estos dispositivos poseen altas ventajas al momento de integrarlas en sistemas con microprocesadores, entre ellas su relativa facilidad de implementación.

Figura 71. Diagrama en bloques del potenciómetro digital AD5220



Fuente: Hoja de datos AD5220. p. 1.

El potenciómetro aumenta la resistencia cuando la terminal U/D se encuentra en estado alto y se lee un flanco negativo en la terminal CLK. Así mismo, la resistencia disminuye cuando en la terminal U/D se lee un valor lógico de cero y se tiene un flanco negativo en la terminal CLK.

En la figura 72 se observan las características eléctricas más importantes para este dispositivo.

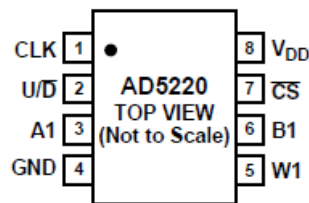
Figura 72. **Características eléctricas del AD5520**

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS*

($T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted)

V_{DD} to GND	.....	-0.3 V, +7 V
V_A , V_B , V_W to GND	.....	0 V, V_{DD}
A_X-B_X , A_X-W_X , B_X-W_X	± 20 mA
Digital Input Voltage to GND	.....	0 V, $V_{DD} + 0.3$ V
Operating Temperature Range	.....	-40°C to $+85^\circ\text{C}$
Maximum Junction Temperature (T_J MAX)	.....	$+150^\circ\text{C}$
Storage Temperature	.....	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
Lead Temperature (Soldering, 10 sec)	.....	$+300^\circ\text{C}$
Package Power Dissipation	.....	$(T_J \text{ max} - T_A) / \theta_{JA}$
Thermal Resistance θ_{JA}		
P-DIP (N-8)	.....	103°C/W
SOIC (SO-8)	.....	158°C/W
μ SOIC (RM-8)	.....	206°C/W

PIN CONFIGURATION



Fuente: Hoja de datos AD5220. p. 3.

3.3. El puerto analógico del microcontrolador PIC12F683

El microcontrolador PIC12683 posee 3 entradas analógicas, las cuales también son configurables como entradas y salidas digitales. Estos puertos I/O se encuentran sobre el único puerto GPIO del microcontrolador, estas entradas analógicas se encuentran ubicadas en el microcontrolador como se indica en la tabla VI.

Tabla VI. **Listado de puertos analógicos del PIC12F683**

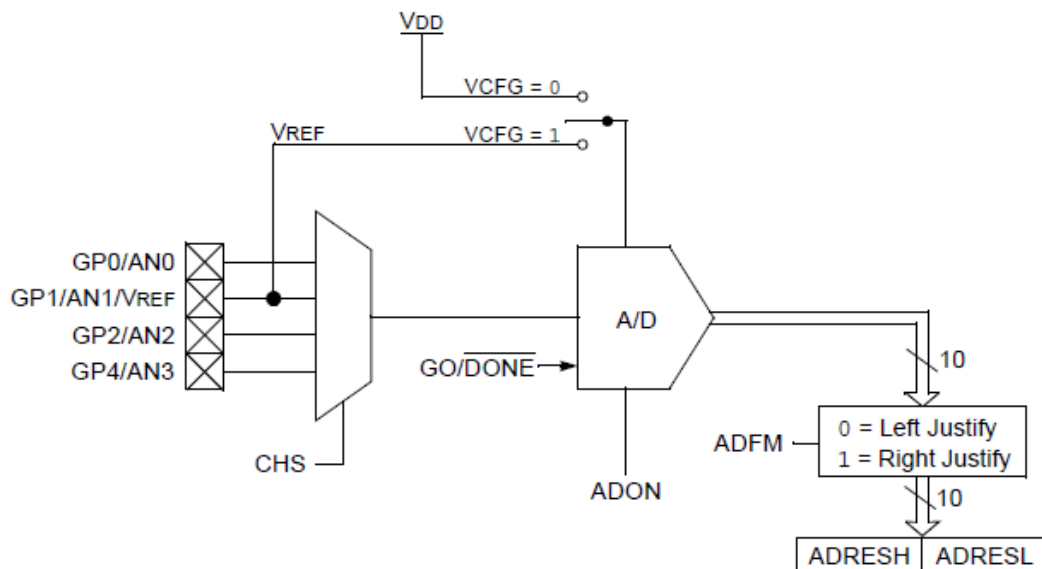
POSICION	ENTRADA ADC	PIN
GP0	AN(0)	7
GP1	AN(1)	6
GP2	AN(2)	5

Fuente: Hoja de datos PIC12f683.

El módulo convertidor de análogo a digital (ADC) representa las señales análogas de entrada como un número binario de 10 bit. Las señales análogas de entradas se multiplexan en un solo circuito de muestreo y retención. La salida del circuito de muestreo y retención se conecta a la entrada del convertidor, el cual genera un número binario de 10 bit, número que se obtiene por aproximaciones sucesivas, este resultado se escribe en los registros ADRESL y ADRESH del microcontrolador.

Dado que el número binario generado por el ADC es de 10 bit, significa que es necesario utilizar una variable tipo word para almacenar de manera adecuada el resultado, asimismo, significa que la resolución del ADC es de 4.88 milivoltios/bit, ya que el voltaje máximo de entrada al ADC es de 5 voltios, lo que corresponde al valor máximo para un número de 10 bit, es decir 1 023.

Figura 73. **Diagrama en bloques del convertidor analógico-digital**



Fuente: Hoja de datos PIC12F683. p. 61.

El voltaje de referencia del ADC puede configurarse por software y puede elegirse entre un voltaje generado internamente o un voltaje suministrado por una fuente de alimentación externa. Asimismo, el ADC es capaz de generar una interrupción luego de completar un ciclo de conversión, esta interrupción puede utilizarse para sacar al microcontrolador del modo *Sleep* (dormir).

En la figura 73 se muestra un diagrama en bloques del convertidor analógico- digital.

En la tabla VII se aprecian los valores correspondientes en decimal a para cada uno de los valores de voltaje enlistados, como puede verse claramente, la relación entre el voltaje y su respectivo valor digital es completamente lineal.

Tabla VII. **Voltajes y su respectivo valor decimal, luego de la conversión analógica a digital**

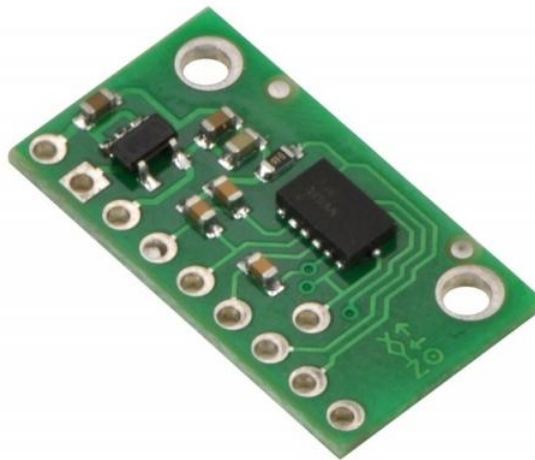
VOLTAJE	VALOR ADC
0	0
0,5	102
1	205
1,5	307
2	409
2,5	512
3	614
3,5	716
4	818
4,5	921
5	1 023

Fuente: elaboración propia.

3.4. El acelerómetro MMA7361A

El acelerómetro MMA7361A (figura 74) fabricado por Freescale Semiconductor consiste en un acelerómetro micromaquinado de bajo consumo de potencia, posee compensación por temperatura, además incluye un modo *sleep* que resulta bastante útil para conservar la energía de dispositivos portátiles, entre las aplicaciones típicas para este dispositivo se encuentra la tecnología de juegos 3D para detección de movimiento, detección de caída de dispositivos electrónicos, como reproductores de MP3, laptops, teléfonos, etcétera. Asimismo, resulta bastante útil en sistemas de navegación y detección de movimiento en robótica.

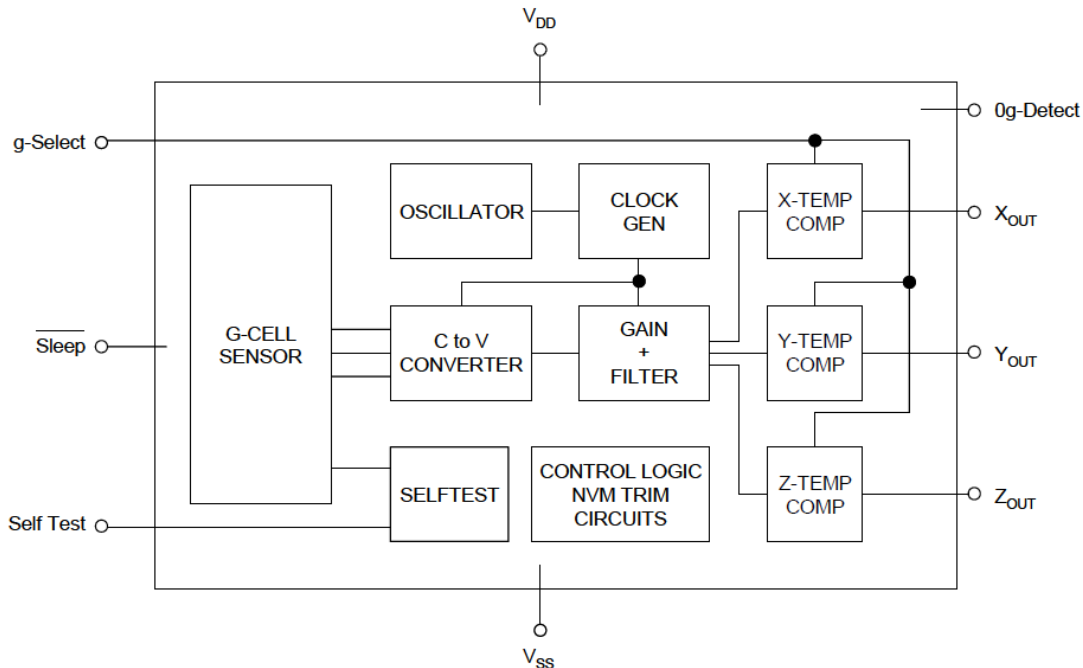
Figura 74. **Módulo basado en el acelerómetro de tres ejes MMA7361A**



Fuente: www.pololu.com. [Consulta: febrero de 2013].

En la figura 75 se puede apreciar un diagrama en bloques simplificado de este acelerómetro. El dispositivo consiste en una celda capacitiva fabricada por micromaquinado de superficie y un sistema de acondicionamiento de la señal contenido en un mismo encapsulado. El elemento sensitivo se encuentra sellado herméticamente en una estructura micromaquinada en volumen.

Figura 75. Diagrama en bloques simplificado



Fuente: hoja de datos MMA7631A. p. 2.

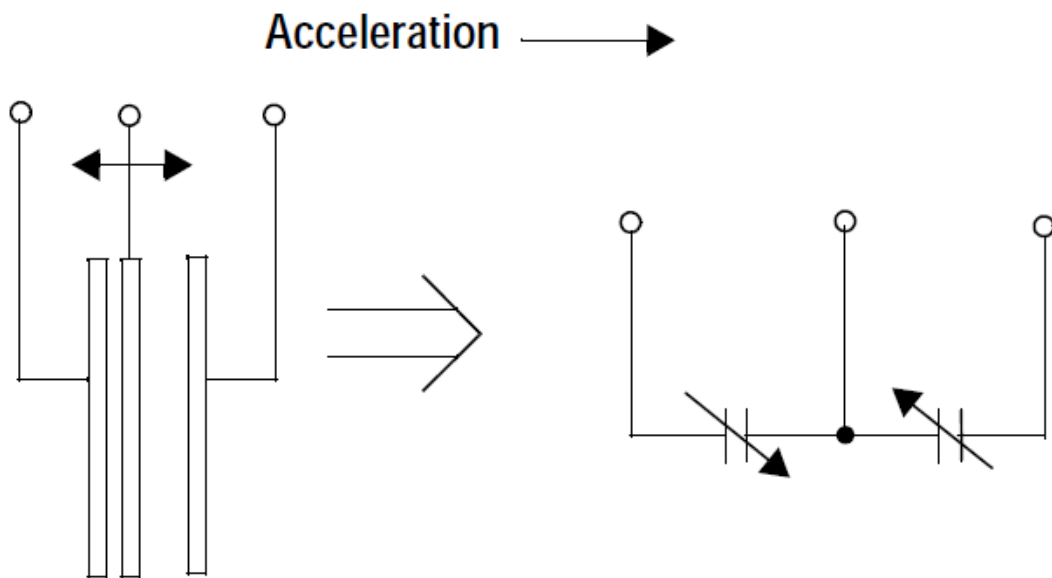
La celda capacitiva está construida de silicio policristalino y básicamente se trata de un arreglo de capacitores diferenciales con el electrodo central móvil y los electrodos laterales fijos, por consiguiente se utiliza el método capacitivo para la detección de la aceleración, en la figura 76 se puede apreciar el principio físico de funcionamiento, que resulta importante al momento de realizar la transducción de la inclinación de la cabeza del usuario.

Este acelerómetro posee algunas características especiales que facilitan su implementación en ciertas aplicaciones, entre las principales tenemos:

- 0g-detect: en este modo el acelerómetro proporciona una señal lógica alta al detectar una aceleración de 0 unidades de gravedad en los tres ejes.

Este modo es importante para la detección de caída libre y se utiliza principalmente para proteger a los equipos electrónicos cuando caen al suelo.

Figura 76. **Principio de funcionamiento del acelerómetro MMA7631A**



Fuente: Hoja de datos MMA7631A. p. 4.

- g-select: esta propiedad del acelerómetro permite elegir entre dos sensibilidades distintas. Dependiendo del valor lógico de entrada en el pin 10 del dispositivo, se puede elegir entre una sensibilidad de 1,5 veces la gravedad y 6 veces la gravedad, esta característica es importante cuando se requiere en la aplicación la afinación de la sensibilidad (figura 77) y es posible cambiar entre una y otra en cualquier momento durante la operación del dispositivo.

Figura 77. **Sensibilidades programables del MMA7631A**

g-Select	g-Range	Sensitivity
0	1,5 g	800 mV/g
1	6 g	206 mV/g

Fuente: Hoja de datos MMA7631A. p. 2.

- Sleep mode: el acelerómetro de tres ejes posee un modo sleep el cual resulta ideal para su uso con productos operados por baterías. Cuando este modo se encuentra activo, las salidas del dispositivo se apagan proporcionando una significativa reducción de la corriente de operación. Un cero lógico en el pin 7 del dispositivo activa este modo y reduce la corriente a 3 microamperios típicamente.

3.4.1. Aceleración en función de la inclinación

El acelerómetro es capaz de medir aceleración dinámica y aceleración estática, aceleración dinámica se refiere a cuando el objeto es sometido a movimiento sobre cualquiera de sus ejes, la aceleración estática se refiere a cuando el dispositivo está sometido únicamente a la aceleración debido a la gravedad, para lo cual el fabricante proporciona los datos de salida del acelerómetro, los cuales se presentan en la tabla VIII, estos valores son validos para cualquiera de los tres ejes coordenados.

Tabla VIII. **Valores de voltaje de salida de cualquiera de los ejes de salida en presencia de la gravedad**

Aceleración estática	Voltaje de salida
-1 g	0,85 V
0 g	1,65 V
1 g	2,45 V

Fuente: Hoja de datos MMA7631A. p. 2.

Es obvio que la salida es una función del ángulo de inclinación del acelerómetro con respecto a la vertical, para analizar de manera adecuada el comportamiento del dispositivo se auxilia del diagrama de cuerpo libre (figura 78) del objeto en posición inclinada y a un ángulo θ . Del diagrama de cuerpo libre, es obvio que la aceleración que actúa sobre el dispositivo está dado por:

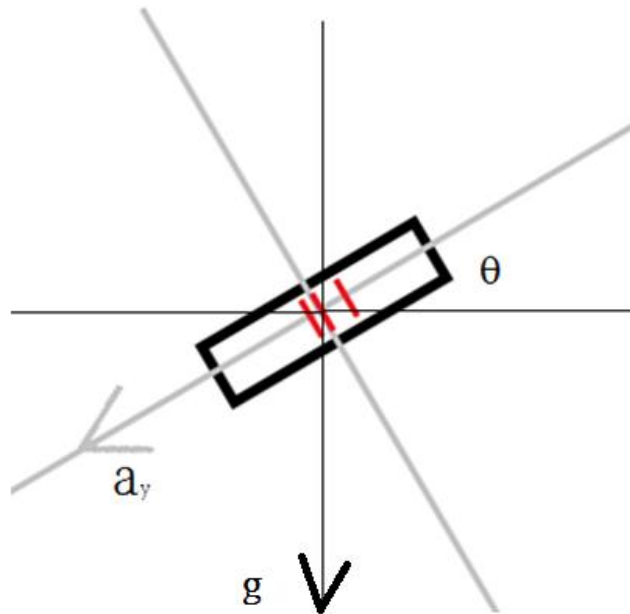
$$a = g \times \text{sen}\theta$$

Es posible obtener entonces los valores de aceleración que actúan sobre la estructura para cualquier ángulo. En la tabla IX se presentan los valores correspondientes de aceleración en el intervalo de -90 a 90 grados.

Además se presentan los valores de voltajes correspondientes a cada valor de aceleración, el cual se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$V = 1,65 + a \left(\frac{0,8}{9,81} \right)$$

Figura 78. **Diagrama de cuerpo libre del acelerómetro orientado en el eje y**



Fuente: elaboración propia. Paint.net.

Donde el termino 1,65 corresponde al traslado sobre el eje Y de la función debido a las correspondencias entre g y V según la tabla VII, Asimismo, el factor (0,8/9,81) corresponde a la razón entre el valor pico del voltaje y el valor pico de la aceleración, básicamente se trata de una regla de tres para transformar la aceleración en voltaje.

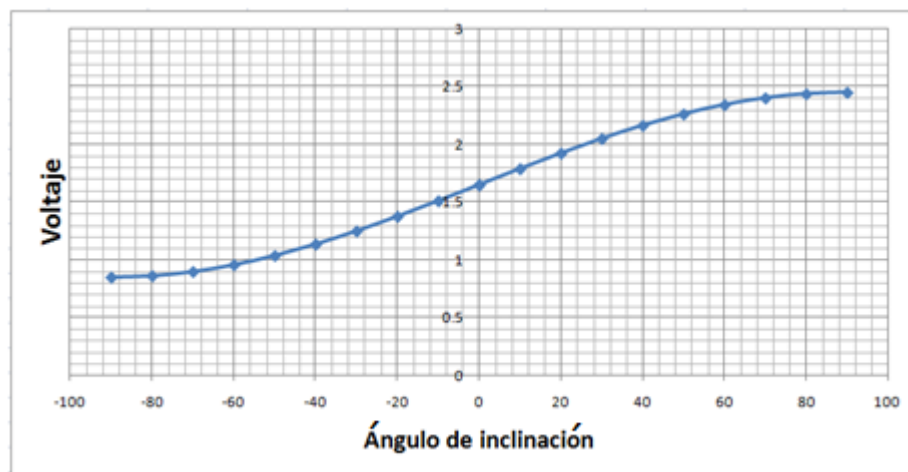
Tabla IX. **Valores teóricos de aceleración y voltaje**

ángulo[Deg]	aceleración[m/s ²]	voltaje[V]
90	9,81	2,45
80	9,660964057	2,437846202
70	9,21838461	2,401754097
60	8,495709211	2,342820323
50	7,514895987	2,262835554
40	6,305746451	2,164230088
30	4,905	2,05
20	3,355217606	1,923616115
10	1,703488623	1,788918542
0	0	1,65
0	0	1,65
-10	-1,703488623	1,511081458
-20	-3,355217606	1,376383885
-30	-4,905	1,25
-40	-6,305746451	1,135769912
-50	-7,514895987	1,037164446
-60	-8,495709211	0,957179677
-70	-9,21838461	0,898245903
-80	-9,60964057	0,862153798
-90	-9,81	0,85

Fuente: elaboración propia.

Para la detección del movimiento de la cabeza del usuario, se mide la aceleración debida a la gravedad que actúa sobre el dispositivo y no así la aceleración que genera la persona al realizar el movimiento, ya que esta aceleración es de baja magnitud y resulta difícil de medir. En contraste se realiza la medición de la componente de la aceleración gravitacional que actúa sobre la masa sísmica en dirección del eje y.

Figura 79. **Gráfica de datos teóricos del acelerómetro, voltaje versus ángulo**



Fuente: elaboración propia.

Según la expresión que describe el valor de la aceleración estática en función del ángulo de inclinación, es posible construir la tabla IX donde se muestran los valores de aceleración y sus respectivos valores de voltaje teóricos que se deben obtener según las especificaciones del fabricante del dispositivo. Asimismo, en la figura 79 se puede observar la gráfica correspondiente al voltaje teórico que se espera medir a la salida del acelerómetro en función del ángulo de inclinación.

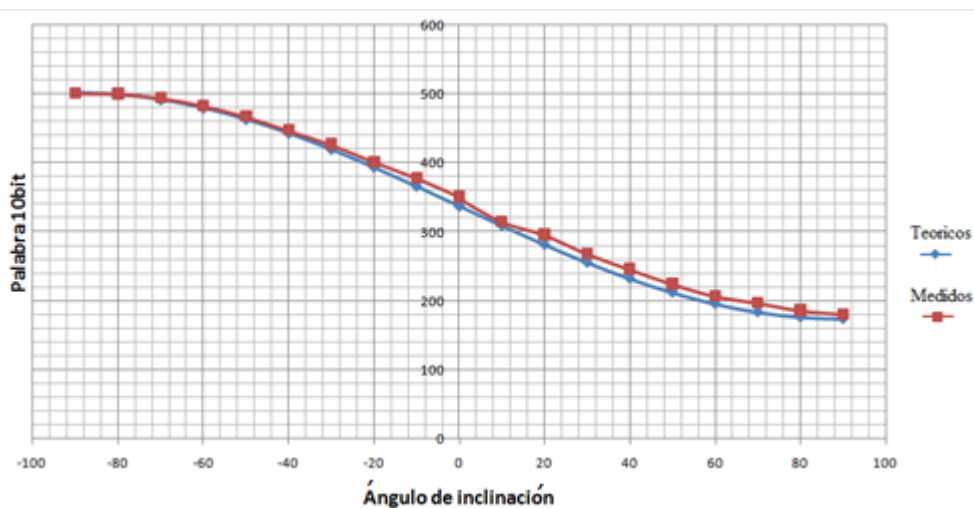
Tabla X. **Señales digitales correspondientes a los voltajes teóricos y medidos en función de la inclinación**

Angulo	Teórico	Medido		
		menor	mayor	promedio
-90	501,76	497	505	501
-80	499,2709023	496	505	500,5
-70	491,879239	489	500	494,5
-60	479,8096022	479	488	483,5
-50	463,4287216	463	472	467,5
-40	443,234322	443	452	447,5
-30	419,84	422	432	427
-20	393,9565803	399	405	402
-10	366,3705174	376	381	378,5
0	337,92	348	355	351,5
0	337,92	346	353	349,5
10	309,4694826	310	320	315
20	281,8834197	292	300	296
30	256	266	271	268,5
40	232,605678	242	250	246
50	212,4112784	221	228	224,5
60	196,0303978	202	212	207
70	183,960761	194	200	197
80	176,5690977	180	192	186
90	174,08	179	182	180,5

Fuente: elaboración propia.

Las mediciones de los voltajes de salida del acelerómetro, cuando este es sometido a una inclinación se realizan con la ayuda de una barra sujeta a un eje fijo y que gira sobre un transportador de ángulos, para conocer exactamente el ángulo de inclinación del acelerómetro. Estas mediciones se han realizado utilizando un microcontrolador, el cual proporciona una representación digital de la señal entre 0 y 1 023 según corresponda al nivel de voltaje. En la tabla X se pueden apreciar los valores máximo, mínimo y promedio de la señal digital, además se pueden observar los valores teóricos de la señal digital correspondientes a los voltajes calculados y mostrados en la tabla VIII.

Figura 80. **Comparación del comportamiento teórico y observado del acelerómetro**



Fuente: elaboración propia.

En la figura 80 se aprecia la gráfica de los valores digitales teóricos comparados con los valores digitales promedio medidos.

Se observa la correspondencia precisa que existe entre la información que proporciona el fabricante, lo cual indica la alta confiabilidad que poseen los dispositivos microelectromecánicos.

3.4.2. Transformación de la aceleración a una señal digital

Como se vio en la sección 3.4.1, la aceleración estática a la cual se encuentra sometido el acelerómetro es función del ángulo de inclinación y está dado por la siguiente expresión.

$$a = g \sin \theta$$

Luego esta aceleración produce una señal proporcional de voltaje de salida, la cual se encuentra en el rango de 0,85 a 2,45 voltios, equivalentes a la rotación del acelerómetro un ángulo de 180 grados. Ya que el valor pico de la señal es el 0,8 voltios y que su valor correspondiente a 0 g es de 1,65 voltios, es obvio que la expresión que da el voltaje en función de la aceleración se trata de una función senoidal trasladada sobre el eje y 1,65 unidades y con una amplitud de 0,8 voltios.

$$V = 1,65 + 0,8 \sin(\theta)$$

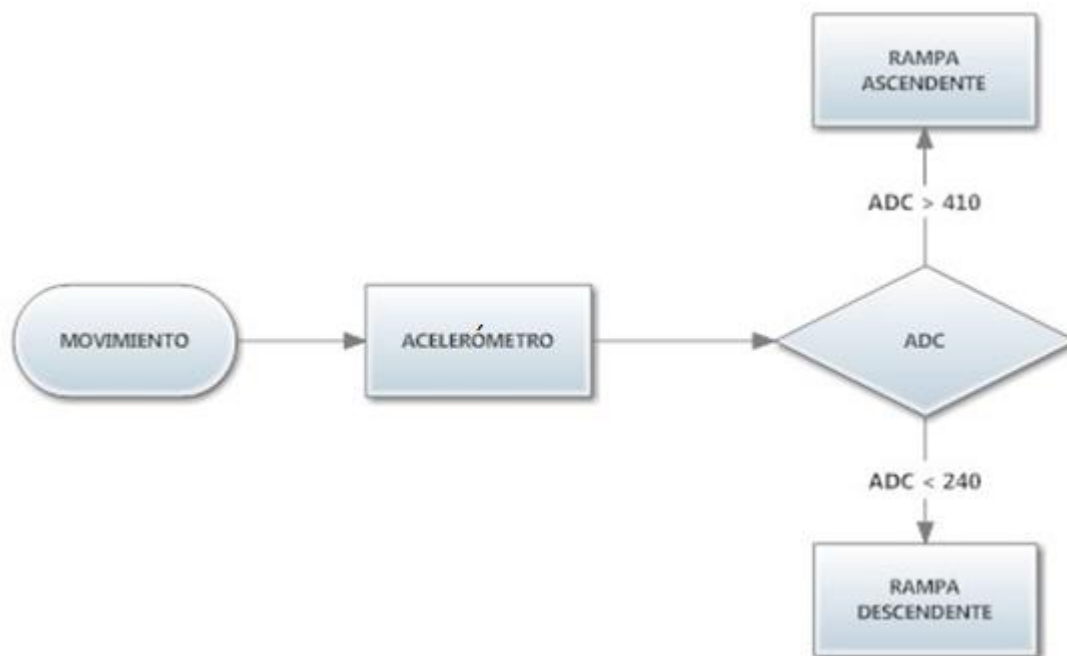
La relación entre el voltaje y la señal digital del microprocesador es lineal y está dada por la relación entre el voltaje máximo aceptado por la entrada ADC del microprocesador (5 voltios) y su correspondiente valor digital (1 023), multiplicados por el respectivo valor de voltaje.

$$\text{Valor palabra } 10\text{bit}_{10} = V (1\ 023/5)$$

Este es el valor decimal recogido por el registro del ADC, que es de gran importancia, pues es el valor de referencia a tomar para decidir la acción que el usuario del dispositivo desea realizar.

En función de los valores obtenidos en la tabla de datos experimentales y el conocimiento de los rangos máximos de movimiento del cuello es como se decide la estructura del programa que ha de capturar el movimiento del usuario del dispositivo.

Figura 81. **Diagrama en bloque del comportamiento del sistema de detección**



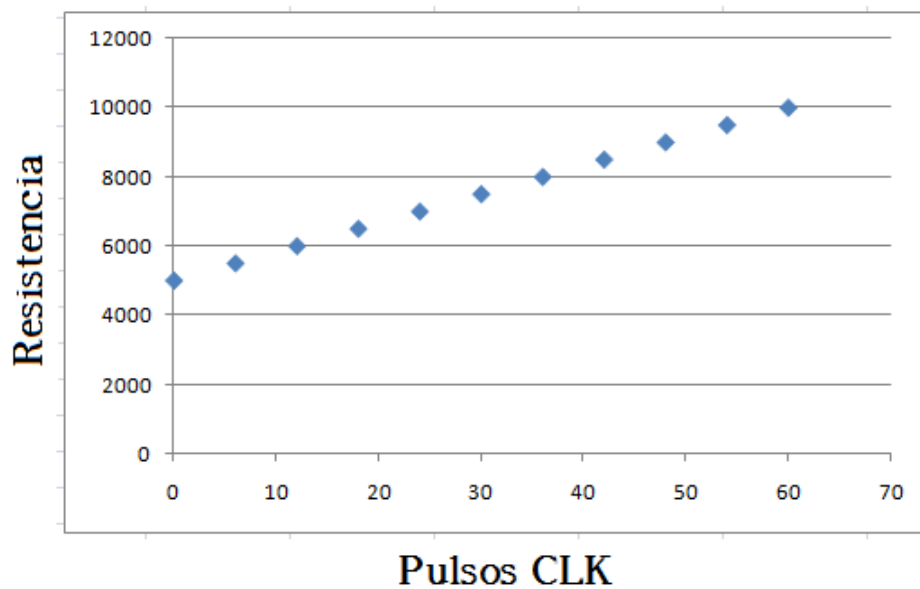
Fuente: elaboración propia, con programa Smartdraw 8.

3.4.3. El movimiento y su acondicionamiento para el control

El objetivo principal del acelerómetro es capturar la orden generada por el usuario, ya sea que este incline la cabeza hacia adelante o hacia atrás. Ahora bien esta señal debe ser procesada para generar una salida equivalente al movimiento del *joystick*, el sistema debe comportarse como lo indica el diagrama en bloques presentado en la figura 81.

Como puede apreciarse en el diagrama, cuando el usuario inclina la cabeza hacia atrás y la señal decodificada por el ADC es mayor a 410 se genera una rampa ascendente en el potenciómetro digital, aumentando así su resistencia y simulando el movimiento de la palanca hacia adelante.

Figura 82. **Cambio de resistencia en función de los pulsos de reloj, en estado ascendente**



Fuente: elaboración propia.

De la misma manera sucede cuando el usuario inclina la cabeza hacia adelante, si esta señal es inferior a 240 en el ADC, se genera una rampa descendente en el potenciómetro digital, lo que corresponde al movimiento hacia atrás del *joystick*, las rampas se producen con la ayuda del microcontrolador, el cual establece la dirección del conteo del potenciómetro colocando un 1 lógico en la terminal U/D del potenciómetro si se desea aumentar o un 0 lógico si se desea disminuir la resistencia.

Asimismo, el programa genera los pulsos de reloj necesarios para llevar el valor del potenciómetro desde su posición de reposo, hasta el valor requerido de resistencia. En la figura 82 se muestra el comportamiento del AD5520 al recibir la orden de conteo ascendente desde el microcontrolador, el eje x corresponde a los pulsos de reloj recibidos y el eje y corresponde al valor de la resistencia en ohmios del potenciómetro, a partir del punto de reposo. Es importante recordar que el estado de reposo del potenciómetro digital es en el 50 % de su resistencia nominal.

3.5. El giroscopio LPY550

El giroscopio LPY550 se trata de un dispositivo MEMS de bajo consumo de potencia (figura 83), que integra un giroscopio de dos ejes, capaz de detectar y medir la velocidad angular. Este dispositivo cuenta con una excelente estabilidad a los cambios de temperatura, siendo capaz de operar entre - 40 grados Celsius y + 85 grados Celsius.

Este giroscopio es la combinación de un actuador y un acelerómetro integrados en una misma estructura micromaquinada.

Incluye un elemento sensible compuesto por una única masa de prueba, la cual se mantiene en constante oscilación y es capaz de reaccionar a los cambios de velocidad angular, debido al efecto Coriolis. Un circuito integrado de tecnología CMOS proporciona la medición de la velocidad angular hacia el mundo exterior a través de una salida analógica de voltaje.

El elemento de medición se alimenta con un voltaje de entre 2,7 voltios, hasta un máximo de 3,6 voltios. Sin embargo, el módulo sobre el cual se encuentra montado el dispositivo posee un regulador de voltaje que permite una alimentación de hasta 16 voltios. Pese a todo esto las salidas analógicas del dispositivo mantienen un valor máximo de 3,3 voltios.

Figura 83. **El giroscopio de dos ejes LPY550**



Fuente: www.pololu.com. [Consulta: febrero de 2014].

3.5.1. Detección del movimiento rotacional del cuello

Debido a que el giroscopio está diseñado principalmente para la detección de una velocidad angular, resulta complejo comparar este movimiento con la capacidad del ser humano de girar el cuello, ya que la rotación de las articulaciones está restringida en un rango de -30 a 30 grados con respecto a la posición de frente y relajada de la cabeza, y además la velocidad con la que gira el cuello en cualquiera de las direcciones es no uniforme. Por esta razón para la implementación de la detección del giro del cuello por medio del giroscopio se detecta el valor pico de voltaje producido por el dispositivo cuando el usuario gira la cabeza en cualquiera de las direcciones.

Tabla XI. **Valores observados en posición cuasi estática**

No	Reposo	valor máximo	265
1	249		
2	241	valor mínimo	231
3	242		
4	251	promedio	244,75
5	246		
6	243		
7	252		
8	244		
9	235		
10	238		
11	231		
12	265		

Fuente: elaboración propia.

Con el giroscopio montado adecuadamente sobre una diadema para sujetarla firmemente a la cabeza, se realizaron mediciones para obtener los valores picos de voltaje, así como, para observar el comportamiento del dispositivo en la posición cuasi-estática del cuello, es decir, en donde el usuario no gira directamente la cabeza sino más bien realiza movimientos típicos de alguien que presta atención al frente mientras conduce un vehículo.

En la tabla XI se muestran los valores típicos observados mientras el usuario mantiene la cabeza en posición cuasi-estática. Luego en la tabla XII se muestran los valores picos obtenidos en los ensayos, tanto en giros de la cabeza hacia la derecha como a la izquierda.

Es importante mencionar que los valores presentados en cada una de las columnas de la tabla XII (tituladas derecha e izquierda respectivamente) fueron ensayos realizados de forma independiente y los valores obtenidos no se encuentran relacionados de ninguna forma, más que por el orden en el que fueron tomados los datos.

3.5.2. Transformación del giro a una señal digital

Al igual que en el caso del acelerómetro, el giroscopio devuelve una señal de voltaje hasta un máximo de 3,3 voltios dependiendo de la magnitud de la velocidad angular y de la dirección del giro.

En este caso no es posible determinar el valor de la velocidad angular a la que gira el cuello del usuario, pues el movimiento es extremadamente no uniforme y de una duración muy corta. Por tal motivo no se hace alusión a la velocidad angular del giro sino más bien a la existencia del mismo.

Tabla XII. **Valores picos observados durante el giro del conjunto cuello-cabeza**

No	DERECHA	IZQUIERDA		DERECHA	IZQUIERDA
1	300	96	MÁXIMO	488	170
2	320	127			
3	338	108	MÍNIMO	300	27
4	307	90			
5	304	170	PROMEDIO	370,875	93,9166667
6	345	68			
7	310	73			
8	457	27			
9	352	101			
10	409	66			
11	428	153			
12	377	62			
13	375	68			
14	351	123			
15	304	104			
16	400	89			
17	350	121			
18	406	94			
19	388	75			
20	335	136			
21	488	53			
22	392	79			
23	441	58			
24	424	113			

Fuente: elaboración propia.

Es decir, únicamente se presta atención al hecho que el usuario gire el cuello produciendo cierta extensión en los músculos y produciendo un pico de voltaje del giroscopio en respuesta a tal acción.

Para los propósitos del desarrollo basta con conocer los valores picos de salida del giroscopio en estas condiciones. La transformación de voltaje en una señal digital es realizada con la ayuda del ADC del microcontrolador y es función únicamente de las propiedades intrínsecas del microcontrolador.

De la misma forma en que es transformada la señal de voltaje del acelerómetro, así también, es transformada la señal de voltaje del giroscopio, es decir:

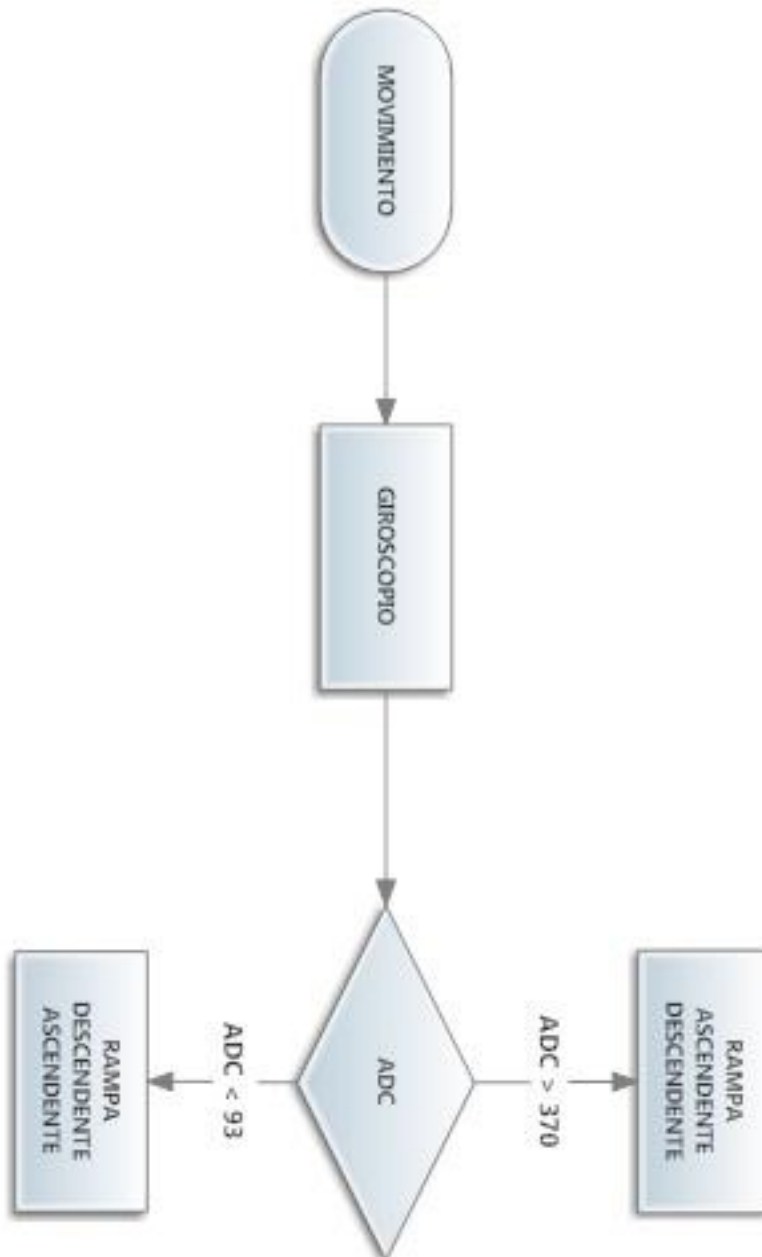
Valor palabra 10bit₁₀ = $V (1 \ 023/5)$

Y de la misma manera el valor decimal del registro del ADC del microcontrolador es utilizado para evaluar las órdenes producidas por el usuario con su movimiento.

3.5.3. El giro y su acondicionamiento para el control

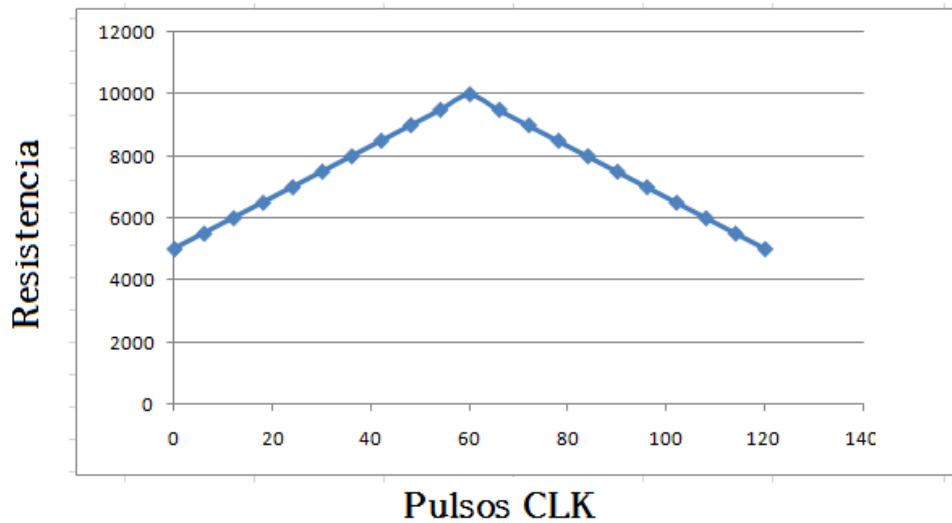
Al igual que en el caso del acelerómetro, también es necesario emular el comportamiento del *joystick* basados en la información proporcionada por el usuario a través del giroscopio, en este caso el comportamiento del dispositivo es como se muestra en el diagrama en bloques que aparece en la figura 84.

Figura 84. Diagrama de flujo del funcionamiento esperado del giroscopio



Fuente: elaboración propia, con Smartdraw 8.

Figura 85. **Comportamiento del AD5520 emulando la acción de empujar la palanca a la izquierda y soltarla**



Fuente: elaboración propia.

La lógica del funcionamiento es básicamente la misma que en el caso del acelerómetro, sin embargo, en este caso, debido a la naturaleza del giro del vehículo que no es constante sino más bien intermitente, la rampa de cambio de resistencia es ascendente-descendente o viceversa, dependiendo de la dirección de giro deseada.

En términos del *joystick* este comportamiento simula la acción de empujar la palanca hacia uno de los lados y luego soltarla, en la figura 85 se muestra la forma en que se produce la rampa de cambio de resistencia en el AD5520 controlada por el microcontrolador, se muestra el caso particular en el cual el usuario gira la cabeza hacia la izquierda.

4. CONSTRUCCIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA EL CONTROL DE UNA SILLA DE RUEDAS ELÉCTRICA UTILIZANDO EL MOVIMIENTO DE LA CABEZA Y EL CUELLO

En este capítulo se describe la forma en la que se configura y conecta el hardware necesario para la implementación del dispositivo, diagramas en bloques y diagramas esquemáticos son presentados para facilitar la repetitividad del mismo.

4.1. Electrónica del dispositivo

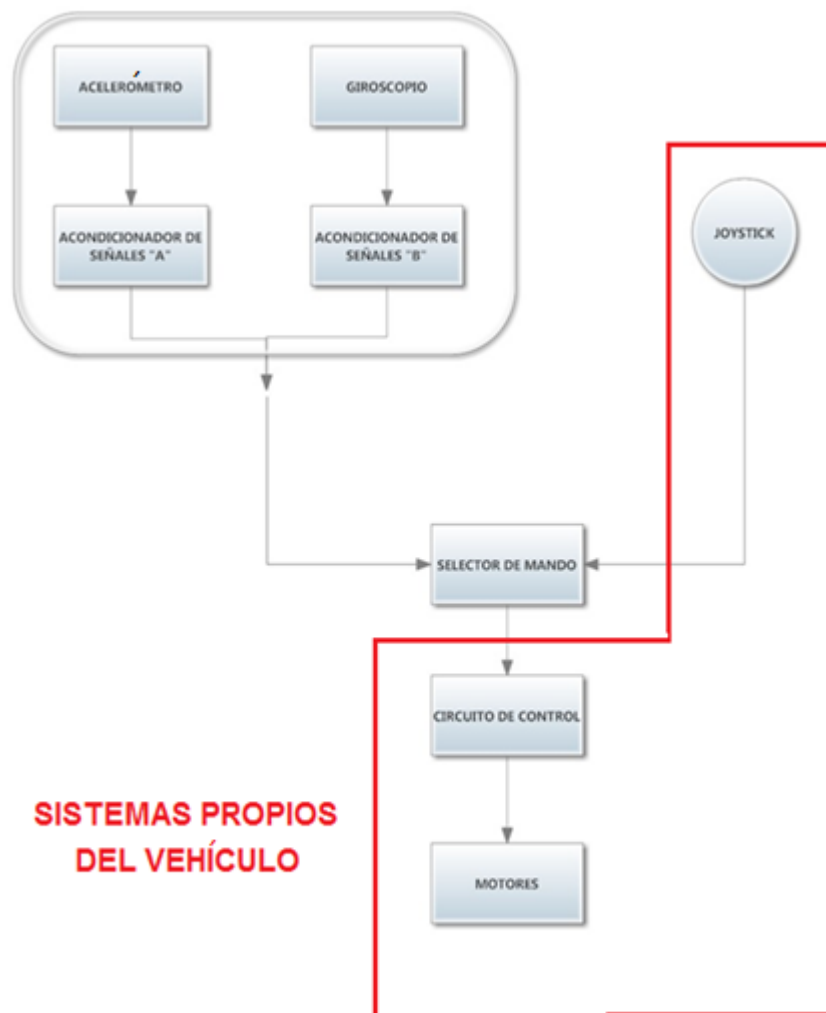
En la figura 86 se muestra el diagrama en bloques del sistema completo. Puede observarse que el conjunto acelerómetro, giroscopio y acondicionadores de señal A y B equivalen a una palanca de mando o *joystick*. Por lo que el vehículo contará con dos controles, el primero de ellos se trata del sistema con el *joystick* nativo del vehículo que se desea modificar.

El segundo control y que es el objetivo principal de este trabajo, es el equivalente del *joystick* controlado utilizando los movimientos de la cabeza, ambos dispositivos proporcionan una señal de voltaje que varía en función de la posición de los potenciómetros.

Dado que existen dos controles, es necesario determinar cuál de los controles se encontrará gobernando al vehículo, si el *joystick* o el dispositivo de captura de movimiento de cabeza y cuello (DCMCC de aquí en adelante).

Esta sección del sistema se encuentra representada en el diagrama en bloques con el nombre de: control de mando, este bloque básicamente conmuta entre un control y otro, dependiendo de la indicación del usuario. Cabe destacar que para el control del vehículo solamente uno de los controles se encontrará activo a la vez, dependiendo de la elección del usuario.

Figura 86. Diagrama en bloques del sistema



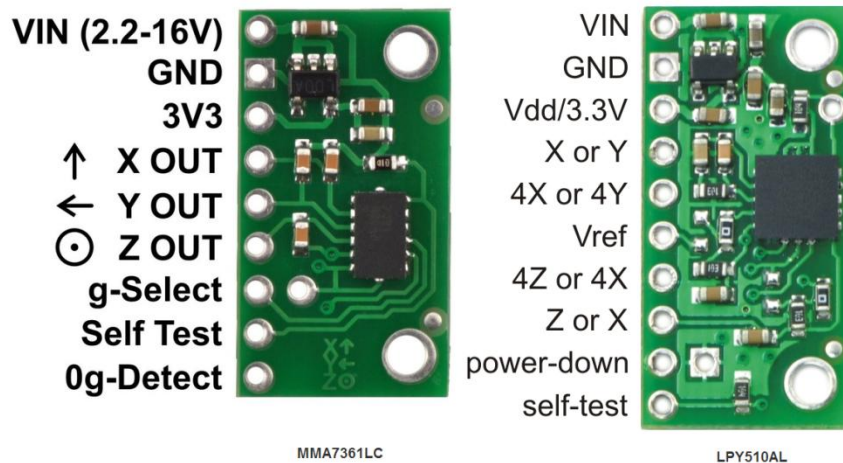
Fuente: elaboración propia, con programa Smartdraw 8.

4.1.1. Configuración de los sensores inerciales

Los sensores poseen la ventaja de ser comercializados en módulos sobre los cuales se encuentran montados y configurados de la forma recomendada por el fabricante. Tanto el módulo LPY550 correspondiente al giroscopio, así como, el MMA7361 correspondiente al acelerómetro, únicamente necesitan la conexión del voltaje de alimentación de 5 voltios, así como, la conexión de la salida analógica, la cual transporta la información capturada por estos sensores.

En el caso del acelerómetro se conecta la salida Y_{out} del módulo hacia la entrada analógica AN(0) (pin 7) del microcontrolador "A" y con respecto al giroscopio, se realiza la conexión entre la salida 4Z del módulo, hacia la entrada analógica AN(0) (pin 7) del microcontrolador "B" en la figura 87 se pueden observar en detalle las salidas y entradas de los módulos.

Figura 87. Configuración de las entradas de ambos módulos

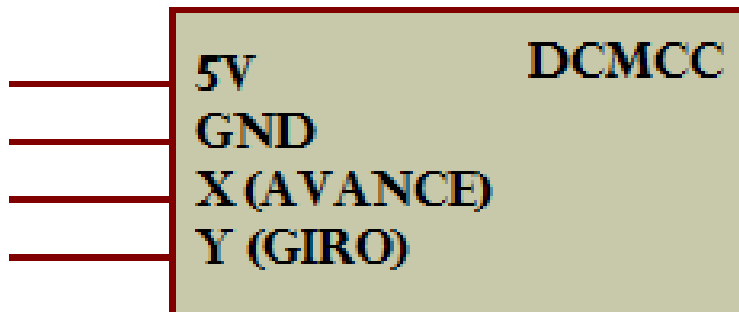


www.pololu.com. [Consulta: febrero de 2014].

4.1.2. Acondicionador de señales

A continuación se conocerá el software y el hardware involucrados en el sistema de acondicionamiento de señales de los sensores inerciales, esta sección constituye el objetivo principal de la presente investigación. Al combinar los sensores y el acondicionador de señales se obtiene un bloque equivalente al mostrado en la figura 88, con sus terminales de alimentación y las salidas de señal.

Figura 88. **Bloque equivalente del sistema de detección de movimiento de la cabeza y el cuello**



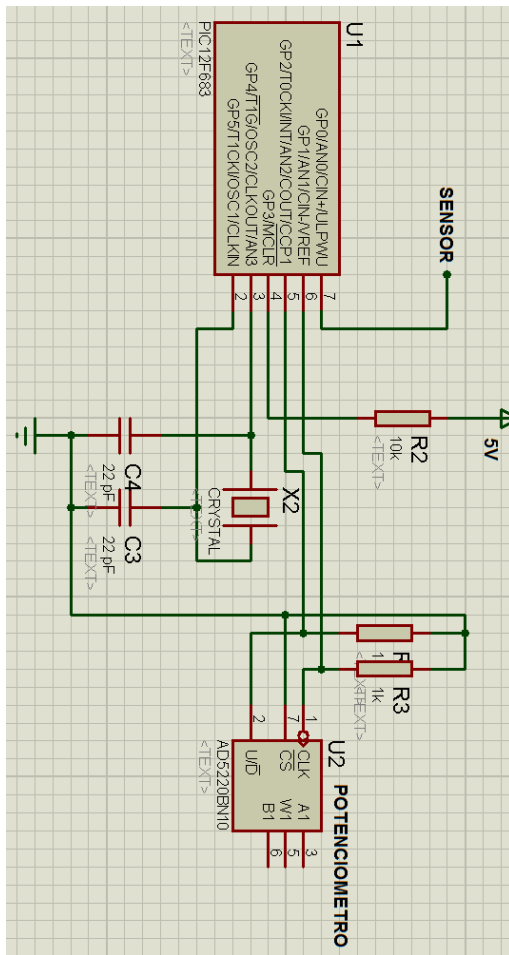
Fuente: elaboración propia.

Se inicia conociendo la configuración del microcontrolador, tanto la circuitería como la programación, Asimismo, se profundiza en el control que realiza el microcontrolador sobre el potenciómetro digital.

4.1.2.1. Configuración del micro PIC12F683

El microcontrolador PIC12F683 es controlado por medio de un oscilador externo para evitar el uso de interrupciones internas que puedan interferir con la conversión analógica a digital, Asimismo, garantizar que el ciclo de reloj se mantenga constante.

Figura 89. Diagrama esquemático del acondicionador de señales



Fuente: elaboración propia, elaborado con Proteus.

Según la recomendación del fabricante cada una de las terminales conectadas al reloj activo del microcontrolador deben encontrarse aterrizadas por medio de un capacitor de 22 picofaradios, en pruebas ajenas a este trabajo, se ha confirmado que la carencia de estos capacitores produce un comportamiento aleatorio en el microcontrolador. Se recomienda al lector, si así lo desea comprobar el funcionamiento del equipo utilizando un oscilador interno.

Figura 90. **Acondicionador de señales armado**

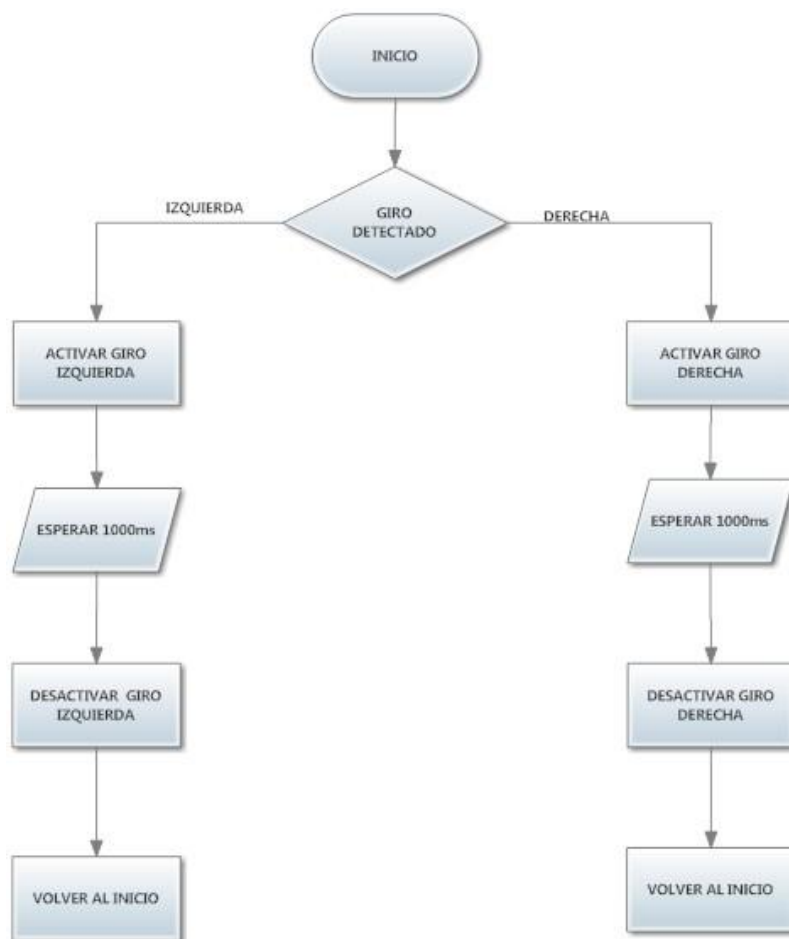


Fuente: elaboración propia.

El microcontrolador opera con un voltaje igual a 5 voltios y, dependiendo del voltaje de operación nominal del vehículo que se desea modificar se debe utilizar el regulador de voltaje adecuado. En la figura 89 se muestra el diagrama esquemático correspondiente al acondicionador de señales, el cual incluye al microcontrolador y al potenciómetro digital.

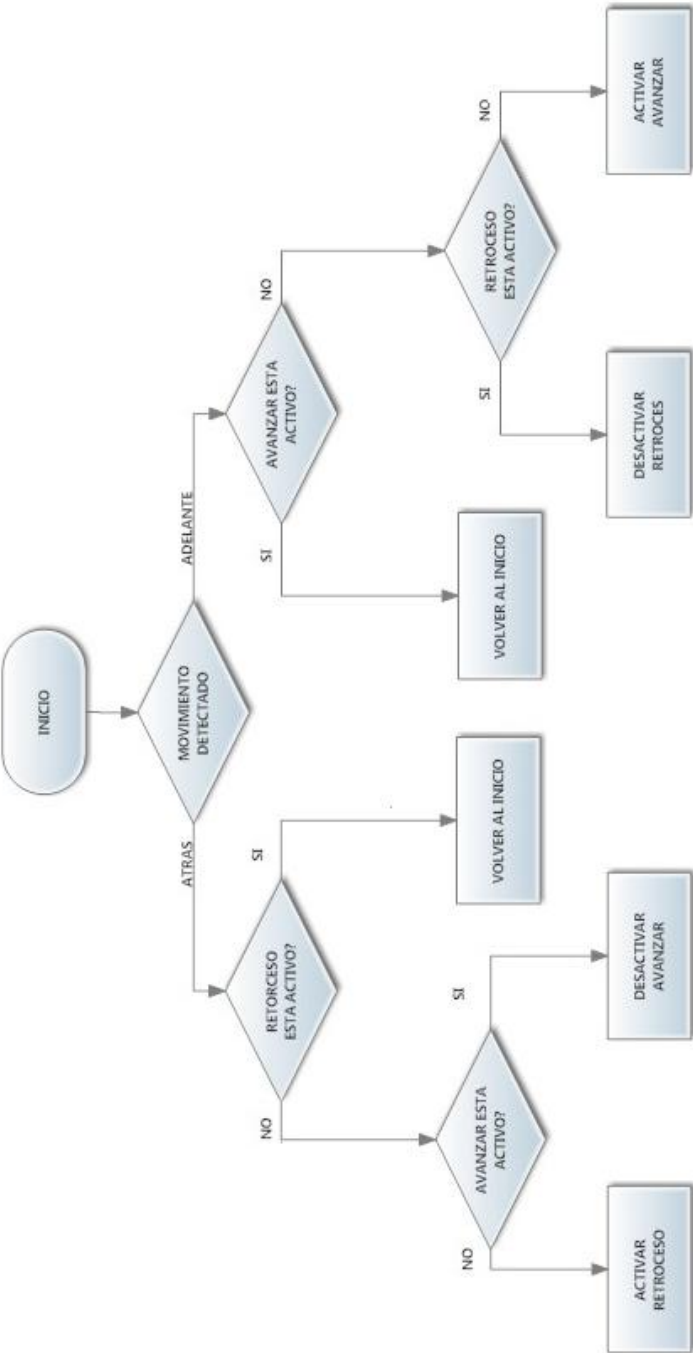
El acondicionador de señales (figura 90) es exactamente el mismo para cada uno de los sensores, a excepción de la programación y como puede observarse en la figura 89 la salida correspondiente del sensor se conecta a la entrada analógica AN(0) del microcontrolador que corresponde al pin 7 del mismo. Así también, puede observarse que la salida del acondicionador se encuentra en los pines 3, 5 y 6 del AD5220, que corresponden a las terminales del potenciómetro.

Figura 91. **Diagrama de flujo del microcontrolador B**



Fuente: elaboración propia, elaborado con Smartdraw 8.

Figura 92. Diagrama de flujo del programa del microcontrolador A



Fuente: elaboración propia, con programa Smartdraw 8.

4.1.2.2. Programación del dispositivo

El programa básicamente consiste en la lectura periódica de los valores presentes en las entradas analógicas de cada uno de los microcontroladores y en la evaluación de cada uno de los casos, dependiendo de los valores detectados.

Según los valores promedios, máximos y mínimos observados durante los ensayos presentados en el capítulo 3 se hace la toma de decisiones para la detección de movimiento, en la figura 91 y 92 se muestran los diagramas de flujo para cada uno de los programas correspondientes al giroscopio y al acelerómetro respectivamente.

El programa está escrito en lenguaje Basic, utilizando la herramienta de desarrollo de Microchip®, MikroBasic, Se ha elegido este lenguaje debido a la confiabilidad y facilidad que permite para el uso de los puertos analógicos de los microcontroladores.

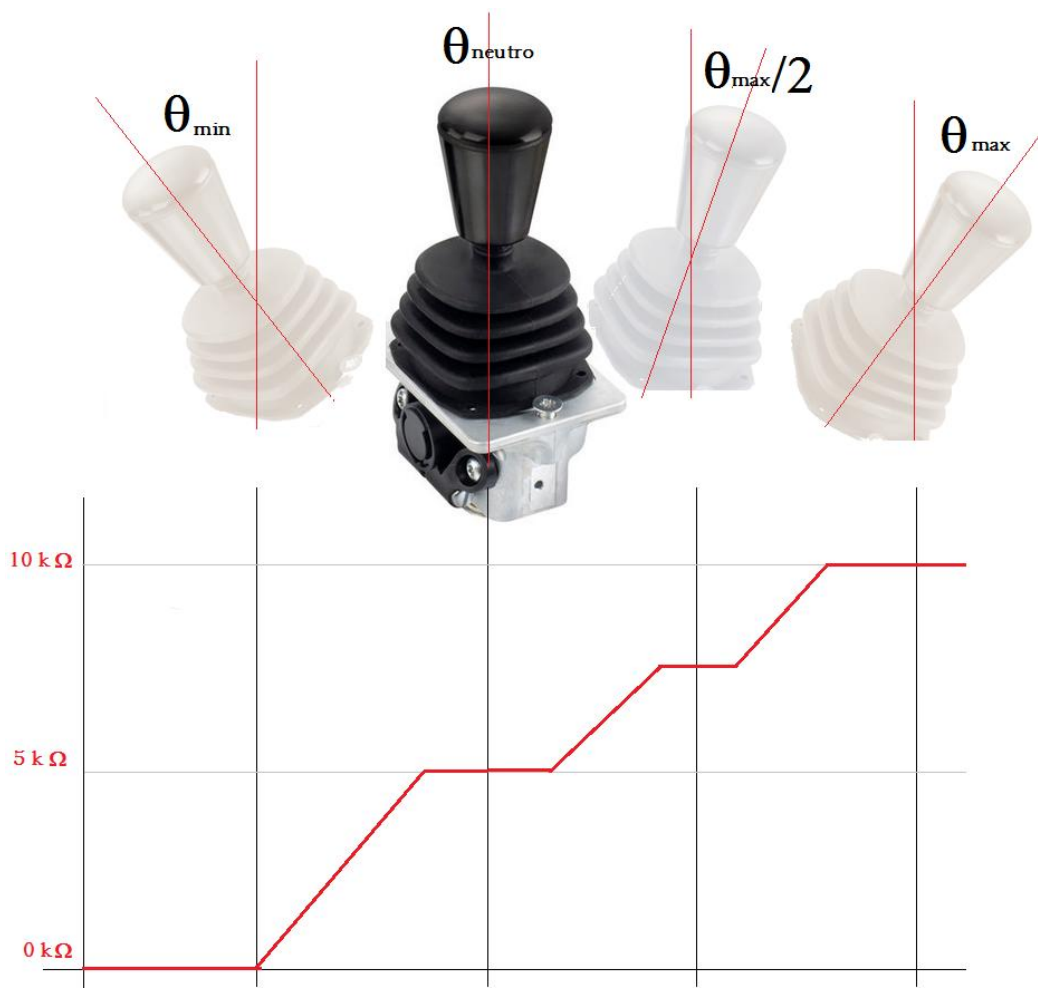
- Avance y retroceso

Se refiere al proceso de simular el movimiento que el *joystick* ejecuta hacia adelante y hacia atrás, que equivale a las órdenes que el usuario ejecuta cuando desea moverse hacia adelante o hacia atrás respectivamente.

Según las observaciones realizadas con el *joystick*, el cambio de voltaje a su salida se da a muy alta velocidad, dificultando el control preciso del cambio de resistencia, lo que dificulta el control continuo de los objetos conectados a él, se requiere de un tacto afinado del usuario para llegar a tener un alto porcentaje de control.

Sin embargo, en el caso del movimiento de la silla de ruedas, no se considera que sea necesario un cambio estrictamente continuo y controlado de la velocidad debido a que este tipo de vehículo se mueve a velocidades fácilmente controlables y que en el más estricto de los casos necesitaría contar con tres velocidades para avance hacia adelante y una sola velocidad para retroceso.

Figura 93. **Rampa de resistencia *versus* posición del joystick**

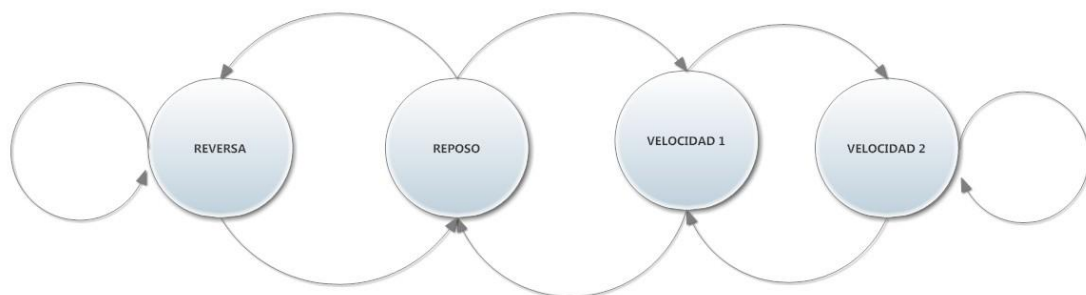


Fuente: elaboración propia.

Basados en los argumentos anteriores, se diseña el acondicionador de señales "A", responsable de transmitir las órdenes del acelerómetro, de tal forma que genere una rampa de cambio de resistencia como se muestra en la figura 93, se puede observar que en estado de neutro o de reposo, la resistencia del dispositivo es 5 kilohmios es decir el 50 % de la resistencia nominal del potenciómetro, Asimismo, en su posición mínima, la resistencia del potenciómetro disminuye hasta 0 kilohmios.

En el caso del movimiento hacia adelante, puede notarse que se tiene doble rampa de ascenso, significa que se simula la posición del *joystick* en un 50 % de su ángulo máximo con respecto a la vertical en donde el potenciómetro posee un valor de 7,5 kilohmios y de ahí se avanza hasta la posición máxima en donde se encuentra la marca de los 10 kilohmios. Para comprender de manera más sencilla la lógica de la programación se hace uso del diagrama de estados que aparece en la figura 94, el cual representa los estados posibles para el avance del vehículo, refiriéndose exclusivamente al movimiento hacia adelante y hacia atrás según las acciones del usuario.

Figura 94. **Diagrama de estados para avance y retroceso**



Fuente: elaboración propia, con programa Smartdraw 8.

En el diagrama de estados se puede apreciar que el comportamiento del dispositivo se restringe a cuatro estados: reposo, reversa, velocidad 1 y velocidad 2. El estado inicial es el estado de reposo y corresponde al estado en el cual el vehículo no se encuentra en movimiento y se encuentra esperando alguna orden de movimiento, a continuación se explican cada uno de los estados de forma detallada incluyendo la programación correspondiente.

- Reposo

Este estado se refiere, como su nombre lo indica al estado en el cual el vehículo se encuentra en ausencia de movimiento, este estado corresponde al estado neutro del *joystick*, en donde el potenciómetro orientado sobre el eje x posee un valor del 50 % de su resistencia nominal. Este estado, es la posición estática tanto del *joystick*, como del potenciómetro digital, eso significa que al encender el DCMCC se encontrará en estado de reposo tal como sucede con el *joystick*.

En este estado se espera a que el usuario ejecute la orden necesaria para realizar la transición, ya sea al estado reversa o al estado velocidad 1. El evento asociado a la transición al estado reversa se da cuando el usuario inclina la cabeza hacia adelante y el ADC del microcontrolador detecta un valor menor o igual a 200. El evento asociado a la transición al estado velocidad 1 se da cuando el usuario inclina la cabeza hacia atrás y el ADC del microcontrolador detecta un valor mayor o igual a 400.

A continuación se muestra el fragmento del programa correspondiente al estado de reposo y sus dos únicas transiciones posibles.

```

while x = 1                                'ciclo del estado REPOSO
read = ADC_Read(0)
Delay_Ms(100)
Ifread > 400 then                          'transición al estado VELOCIDAD 1
flag = 1
    for con = 1 to 32
        GPIO = 6
        DELAY_MS(3)
        GPIO = 5
        DELAY_MS(4)
    next con
delay_ms(1000)
end if

if read < 200 then                          'transición al estado REVERSA
flag = 1
    for con = 1 to 64
        GPIO = 2
        DELAY_MS(7)
        GPIO = 0
        DELAY_MS(7)
    next con
    DELAY_MS(1000)
Endif
Wend

```

- Reversa

Este estado se refiere al evento en el cual el vehículo se encuentra moviéndose hacia atrás, Este evento se da cuando el *joystick* es llevado a su posición mínima de resistencia, es decir 0 ohmios, es importante que el cambio de resistencia no se dé abruptamente, por lo que se ha calculado un tiempo de 900 milisegundos necesarios para realizar el cambio de resistencia del 50 % al 0 %, tiempo equivalente a aproximadamente el doble de lo que le toma el usuario tirar de la palanca, lo que sucede en aproximadamente 442 milisegundos, esta tolerancia se ha utilizado para asegurar que la respuesta del DCMCC sea el adecuado.

El tiempo de la rampa es controlado por el número de veces que se repite el ciclo *for* y por el retardo que existe entre cada una de las líneas de código.

```
While flag = 1                'mantiene al DCMCC en estado reversa
read = ADC_Read(0)
IF read > 850 then            'Si el usuario mueve la cabeza hacia
  for con = 1 to 64          atras, entonces el vehículo
    GPIO = 6                 pasara al estado de reposo
    DELAY_MS(7)
    GPIO = 5
    DELAY_MS(7)
  next con
flag = 0
endif
wend
```

En este estado solamente es posible permanecer en él o volver al estado de reposo, como se observa en el código del microcontrolador que aparece a continuación.

- Velocidad 1

Este estado corresponde a la situación en el cual el vehículo se encuentra moviéndose al 50 % de su velocidad máxima y es el estado equivalente en el *joystick* a mantener la palanca en el 75 % de su span total o al 50 % del ángulo máximo de movimiento con respecto a la vertical. En este estado el potenciómetro digital medirá en su salida 7,5kilo ohmios, como era de esperarse. Encontrándose en este estado solo es posible la transición hacia el estado Velocidad 2 o hacia el estado Reposo.

```
While flag = 1                                'mantiene el DCMCC en velocidad 1
read = ADC_Read(0)
delay_ms(10)
if read > 850 then                             'cambia a VELOCIDAD 2

flag2 = 1
    for con = 1 to 32
        GPIO = 6
        DELAY_MS(3)
        GPIO= 5
        DELAY_MS(4)
    next con
end if
```

```

if read < 350 then                'cambia a REPOSO
    for con = 1 to 32
        GPIO = 2
        DELAY_MS(3)
        GPIO= 0
        DELAY_MS(4)
    next con
flag = 0
endif
wend

```

- Velocidad 2

En este estado el vehículo pasa a su velocidad máxima, el evento necesario para realizar la transición, al igual que en el caso de la velocidad uno, es que el usuario mueva la cabeza hacia atrás, lo que producirá que la rampa de resistencia se eleve hasta su valor máximo, lo que es equivalente a llevar el *joystick* hasta su posición de resistencia máxima.

```

while flag2 = 1
    read = ADC_Read(0)
    delay_ms(10)

    if read < 350 then
        for con = 1 to 32
            GPIO = 2
            DELAY_MS(3)
            GPIO= 0
            DELAY_MS(4)

```

```
        next con
        flag2 = 0
    end if
```

```
DELAY_MS(1000)
```

```
Wend
```

En todos los estados es común el uso de las funciones “if” y “for”, la función “if” se utiliza para la evaluación del valor guardado en la variable “read”, la cual se trata de una variable tipo *Word*, necesaria para almacenar el valor digital de 10 bits generado por el ADC del microcontrolador.

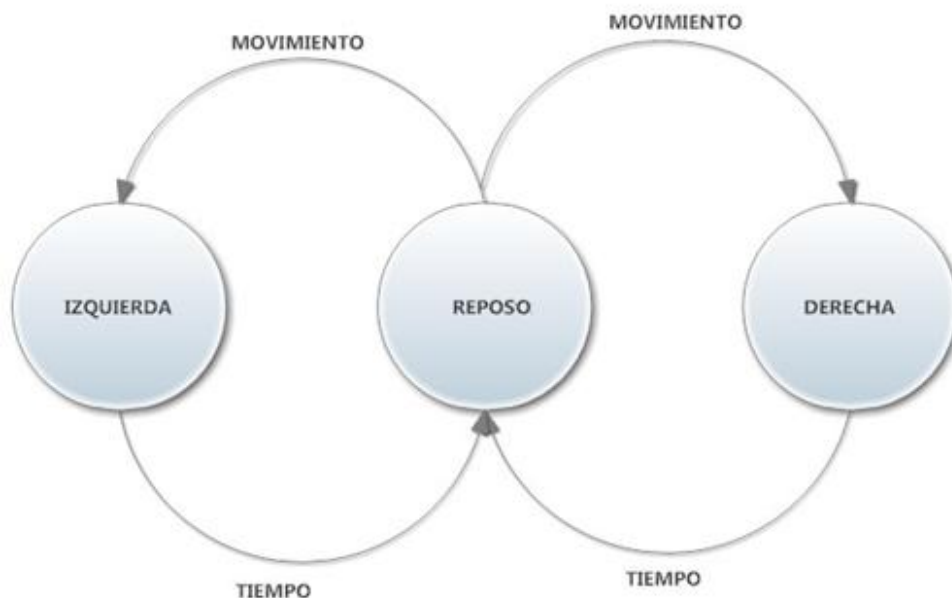
La función “for” se utiliza para generar los pulsos que producirán la rampa ascendente o descendente de resistencia en el potenciómetro digital, puede observarse que la salida del puerto GPIO varía en función de si se desea que aumente o que disminuya la resistencia.

Por ejemplo, si se desea aumentar la resistencia, es necesario que el bit U/D del AD5520 se encuentre en estado alto y que el bit de reloj reciba flancos negativos para generar el cambio, es por eso que el estado inicial del puerto GPIO es 6, ya que esta salida equivale a colocar un uno lógico tanto en la entrada U/D como en entrada CLK del AD5520 y luego de t milisegundos la salida del puerto cambia a 5, lo que equivale a mantener el uno lógico en la entrada U/D y cambia el estado de CLK a 0 lógico, lo que es lo mismo que producir el flanco negativo para ejecutar la transición y el consecuente cambio en la resistencia.

- Giro

En la figura 95 se puede observar el diagrama de estados correspondientes a la acción de giro del vehículo, en este caso se debe tomar en cuenta que los estados Izquierda y Derecha son estados momentáneos y que solamente duran el tiempo que se les ha programado para la creación de la rampa ascendente-descendente, dado que el acondicionador de señales para el control de giro solamente simula la acción de empujar la palanca hacia uno de los lados y regresarla a su posición neutral, lo que equivale a girar levemente la silla de ruedas en la dirección indicada, para que el usuario tenga un mejor control.

Figura 95. **Diagrama de estados del acondicionador de señales del giroscopio**



Fuente: elaboración propia, con programa Smartdraw 8.

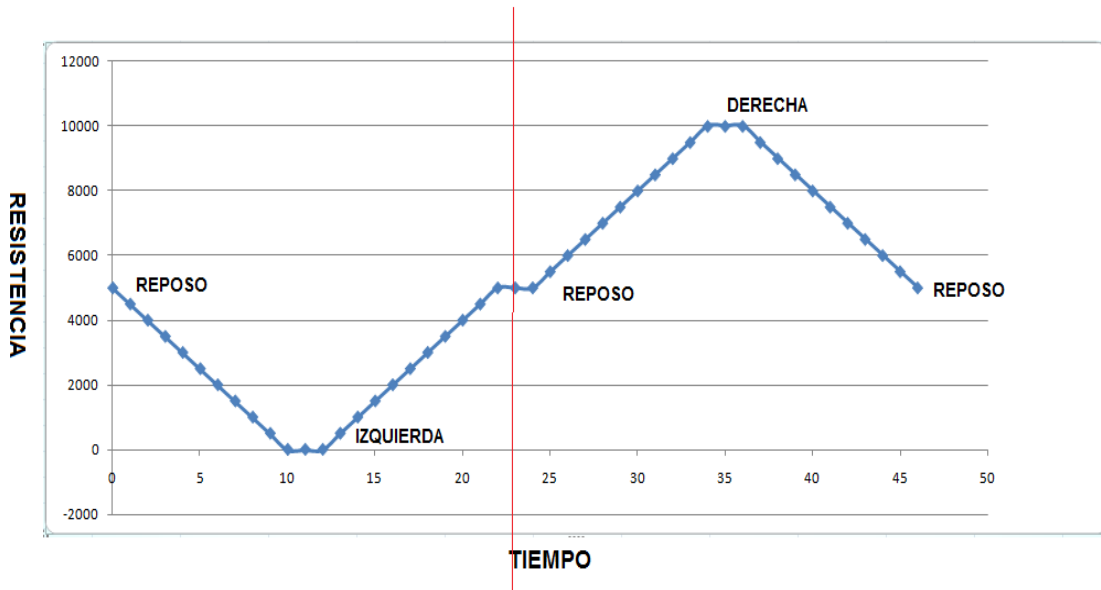
Esta acción puede ser modificada cambiando la estructura del programa del microcontrolador, sin embargo, para los fines perseguidos para esta aplicación, se considera que la rampa de cambio de resistencia es la más adecuada para el control, ya que se supone que una silla de ruedas en condiciones normales de operación nunca se mantiene girando sobre su eje indefinidamente. En la figura 96 se muestra la rampa del cambio de resistencia indicando cada uno de los estados involucrados, sin embargo, en el apéndice se presenta una propuesta de código fuente para permitir el giro indefinido del vehículo.

Por ejemplo, el comportamiento del lado derecho de la figura 96 muestra el cambio de resistencia del potenciómetro digital en función del tiempo, iniciando en el estado de reposo, pasando temporalmente por el estado derecha y finalizando nuevamente en el estado reposo. Este comportamiento como se mencionó anteriormente es equivalente a empujar el *joystick* hacia la derecha y soltarlo, esto con el objetivo de girar el vehículo, pero solamente lo necesario para conseguir una buena capacidad de maniobra.

- Reposo

El estado de reposo, al igual que en el caso del acelerómetro, se refiere al estado en el cual el *joystick*, en este caso, orientado sobre el eje “y”, se encuentra en estado estático, midiendo en la terminal variable el 50 % de su valor nominal, es decir 5 kiloohmios. En este estado el microcontrolador se encuentra en estado de espera, es necesario que el usuario ejecute un movimiento para que el sistema pueda capturar la información y decidir la dirección en la cual el usuario desea girar. Estando en la posición de reposo solo es posible cambiar a cualquiera de los siguientes dos estados: derecha o izquierda.

Figura 96. Comportamiento del potenciómetro al cambiar de estado



Fuente: elaboración propia.

Este estado es el único que depende de las órdenes del usuario para realizar una transición, ya que los estados derecha e izquierda se encuentran gobernados por el tiempo.

El tiempo es quien define la pendiente de la rampa, en este caso se ha definido un tiempo de 1 700 microsegundos para la ejecución de un ciclo completo, es decir, para ir de reposo a derecha y viceversa, este tiempo se ha decidido según las observaciones realizadas sobre la velocidad de maniobra de un usuario sobre el *joystick*.

```
IF read > 850 then
    for con = 1 to 64
        GPIO = 6
        DELAY_MS(4)
        GPIO= 5
        DELAY_MS(2)
    next con
```

```
delay_ms(900)
    for con = 1 to 64
        GPIO = 2
        DELAY_MS(4)
        GPIO= 0
        DELAY_MS(2)
    next con
```

```
delay_ms(1000)
end if
```

```
read = ADC_Read(0)
```

```
if read < 200 then
    for con = 1 to 64
        GPIO = 2
        DELAY_MS(4)
        GPIO= 0
        DELAY_MS(2)
    next con
```

```
delay(900)
```

```
for con = 1 to 64
  GPIO = 6
  DELAY_MS(4)
  GPIO= 5
  DELAY_MS(2)
next con
delay_ms(1000)
end if
```

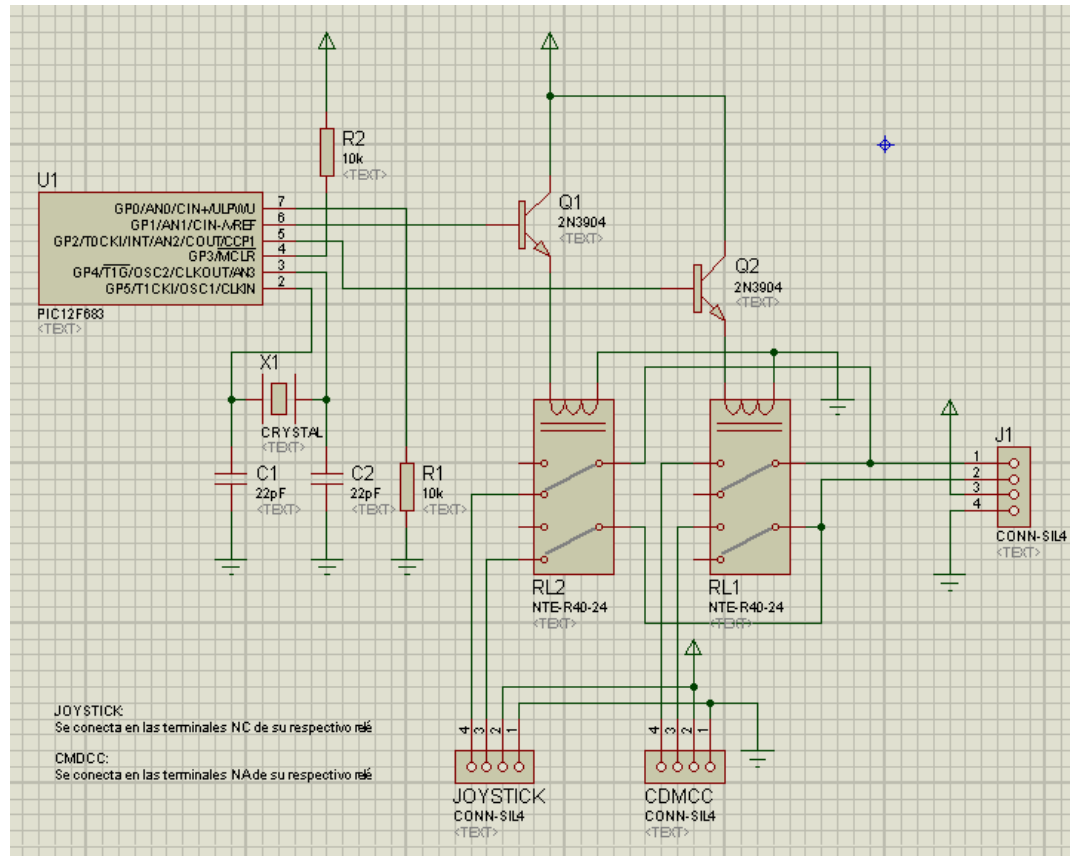
Puede observarse en el código fuente que para ejecutar la acción, se utilizan dos ciclos “for”, uno para llevar el potenciómetro de reposo hasta el estado elegido por el usuario y el otro para volver al estado de reposo, en cualquiera de los dos casos, existe un retardo para simular el sostenimiento de la palanca en la dirección del giro.

El estado derecha es el equivalente a llevar el *joystick* hasta la posición del 0 % de su rango y en contraparte el estado izquierda es lo equivalente a mover el *joystick* hasta alcanzar el 100 % de su rango, es decir, derecha = 0 kilo ohmios e izquierda = 10 kilohmios entre la terminal variable y la terminal de referencia GND del potenciómetro digital.

4.1.3. Interface para conexión en paralelo con el *joystick*

Ya que se requiere que solamente uno de los mandos se encuentre funcionando a la vez, ya sea este el *joystick* o el DCMCC, es necesario contar con un sistema que sea capaz de conmutar entre un control y el otro.

Figura 97. Diagrama esquemático del bloque del selector de mando

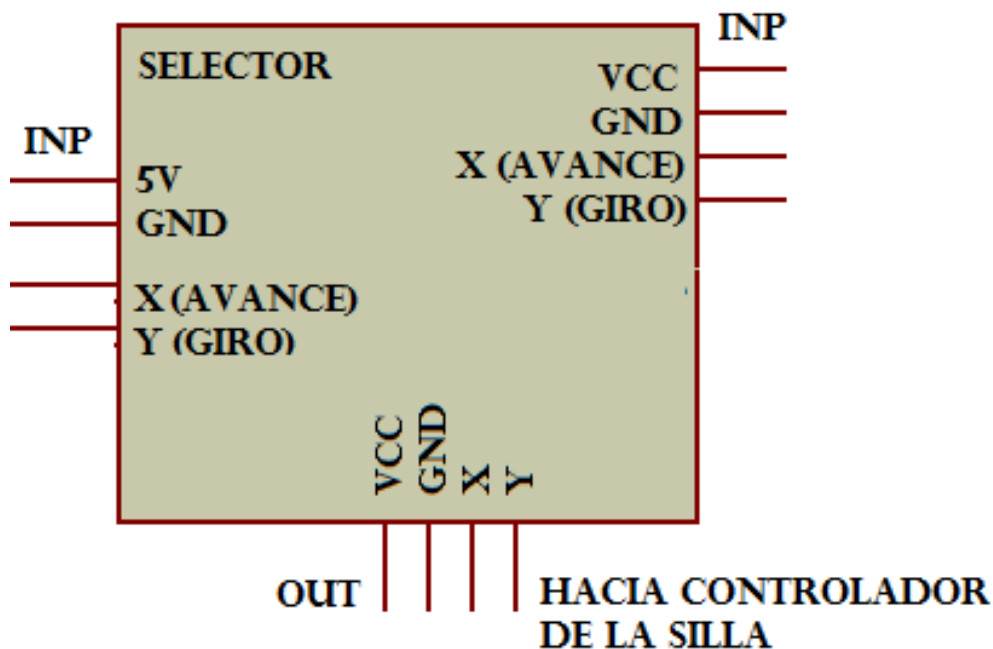


Fuente: elaboración propia, con programa Proteus.

Además de la necesidad de la conmutación, también es importante hacer notar que aunque el tiempo entre la desconexión y la conexión entre un control y otro es corto, esto podría significar una lectura errónea en el sistema de control del vehículo y producir una acción no requerida o un accidente, por lo que es importante que exista un retardo a la desconexión cuando ha entrado en línea el otro control.

El retardo es controlado por un microcontrolador y se ha configurado en 500 milisegundos, que es un tiempo suficientemente grande como para evitar que el control quede sin señal y lo suficientemente pequeño como para permitir que el usuario pueda ejecutar acciones simultaneas con los controles. El programa correspondiente a esta acción se presenta en el apéndice.

Figura 98. **Bloque I/O del selector**



Fuente: elaboración propia, con programa Proteus.

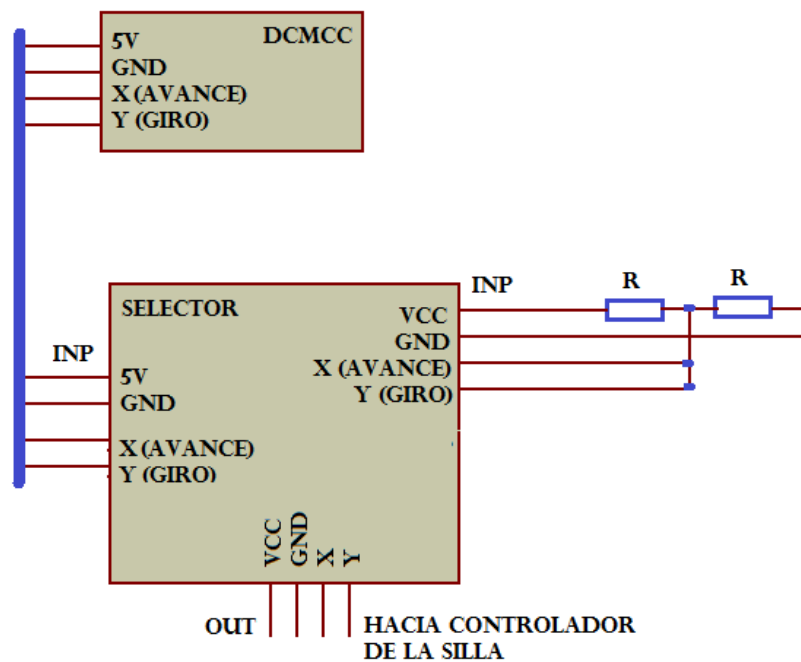
En la figura 97 se muestra el diagrama esquemático del selector de mando, el cual está compuesto por 1 microcontrolador PIC12F683, 2 relés, 2 resistores, 2 capacitores, 1 cristal de 8 megahertz y un pulsador que se utiliza como interruptor de seguridad y que el usuario utiliza para indicar cuándo desea que el DCMCC entre en funcionamiento.

Además en la figura 98 se puede observar el bloque equivalente de entradas y salidas del selector, puede observarse que posee dos entradas, una para cada mando y una sola salida, la cual debe conectarse en los puntos de los cuales se retira el *joystick* nativo del vehículo.

4.1.3.1. Alimentación y conexión del dispositivo

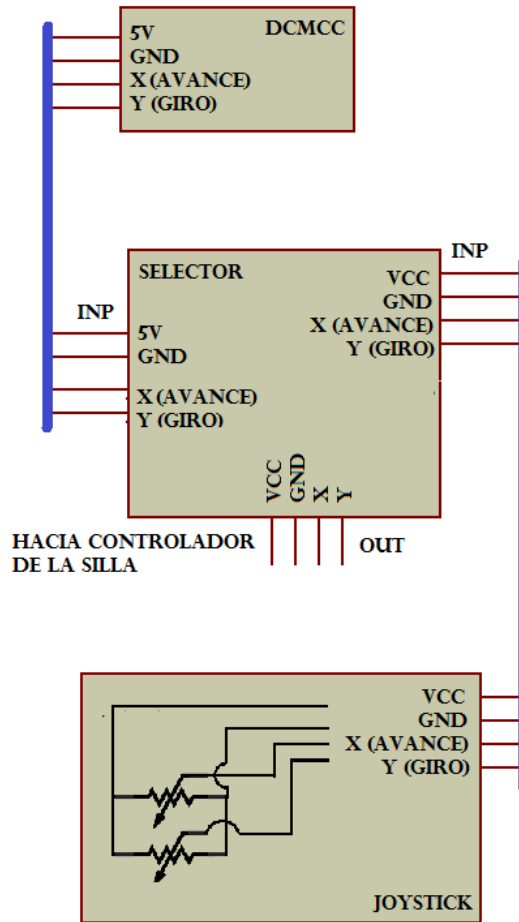
En general las sillas de ruedas se encuentran alimentadas por una batería de 12 voltios, por consiguiente es necesario que el dispositivo cuente con el regulador de voltaje adecuado para realizar la conexión de su alimentación, se recomienda utilizar el regulador LM7805.

Figura 99. Conexión del DCMCC eliminando el *joystick*



Fuente: elaboración propia, con programa Proteus.

Figura 100. **Conexión de ambos controladores al selector de mandos**



Fuente: elaboración propia, con programa Proteus.

Aunque el DCMCC utiliza 5 voltios para su alimentación, el potenciómetro digital se alimenta con el mismo voltaje de alimentación del *joystick*, es decir, si el *joystick* utiliza 12 voltios, sin ningún problema las terminales del potenciómetro digital pueden conectarse exactamente a los mismos puntos que el *joystick*.

Existen dos formas de conectar el DCMCC para realizar el control del vehículo, la primera de ellas es en sustitución total del *joystick*, en este caso como se muestra en la figura 99, se elimina el *joystick* y se conectan las respectivas terminales del DCMC a través del selector de señales hacia las terminales que le correspondían al *joystick* en el vehículo.

En este caso es necesario colocar una referencia del 50 % del voltaje en la entrada designada para el *joystick* en el selector de mandos, la forma más fácil de llevar a cabo esta tarea es colocando un arreglo de dos resistores iguales entre las terminales de alimentación y tomando la derivación del divisor de voltaje hacia las entradas x y y, tal como se observa en la figura 99.

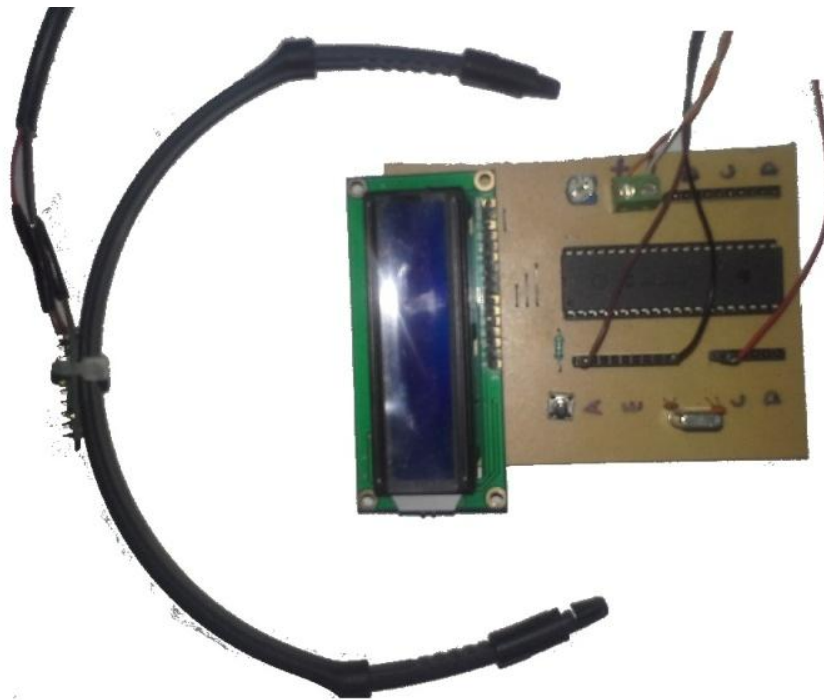
La segunda forma se ilustra en la figura 100, en este caso se desea que el DCMCC trabaje en paralelo con el *joystick* nativo del vehículo, es importante recordar en este punto que los controles son excluyentes, es decir, pueden trabajar uno u otro, pero no ambos al mismo tiempo.

En este caso, la conexión es igual de sencilla, en la entrada correspondiente al DCMCC se conectan el voltaje y las señales, y de la misma forma se realiza la conexión del *joystick* en su entrada correspondiente en el selector de señales. La salida al igual que en el caso anterior corresponde a los puntos de desconexión originales del *joystick* nativo.

4.2. Mecánica del dispositivo

En esta sección del capítulo se dan a conocer las partes mecánicas con las que cuenta el dispositivo, principalmente la forma de sujeción del sensor a la cabeza y la construcción del vehículo de prueba a escala.

Figura 101. **Diadema para la sujeción de los sensores a la cabeza**



Fuente: elaboración propia.

4.2.1. Construcción de la estructura de soporte

Para sujetar los sensores a la cabeza se utiliza una diadema a la cual van acoplados firmemente ambos sensores, es importante que el usuario coloque de forma centrada la diadema sobre su cabeza para reducir la probabilidad de funcionamiento inadecuado, sin embargo, esto es poco probable ya que se tiene una tolerancia adecuada y se asume que el usuario se encuentra prestando la atención necesaria a la conducción del vehículo, tal cual atención se presta cuando se conduce un automóvil, por lo tanto, se espera que el usuario no realice movimientos bruscos que sean detectados por el sistema como órdenes de movimiento.

En la figura 101 puede observarse la diadema con el acelerómetro sujetado, así como, el sistema de pruebas utilizado para realizar las mediciones presentadas en el capítulo 3.

4.2.2. Configuración del vehículo de prueba

Debido a que es importante demostrar que el circuito equivalente diseñado para sustituir la palanca de mando es funcional, es necesario contar con un vehículo de pruebas con la capacidad de movimiento similar a la de la silla de ruedas eléctrica.

En este caso se utiliza un vehículo con motores independientes para cada una de las llantas, ya que esto permite mayor capacidad de maniobra en espacios reducidos.

Sin embargo, la configuración que posea el vehículo de pruebas o la de cualquier silla de ruedas que se desee modificar resulta irrelevante debido al hecho de que el sistema diseñado no afecta en lo absoluto el sistema de control existente de la silla de ruedas, ni requiere de ningún cambio en la mecánica de la misma, pues el sistema únicamente reemplaza a la palanca de mando y ejecuta las órdenes de la misma forma que lo hace este control.

Esto significa además que el sistema que se ha diseñado no se encuentra limitado al control de una silla de ruedas, sino que es capaz de sustituir al *joystick* en cualquiera de sus múltiples aplicaciones

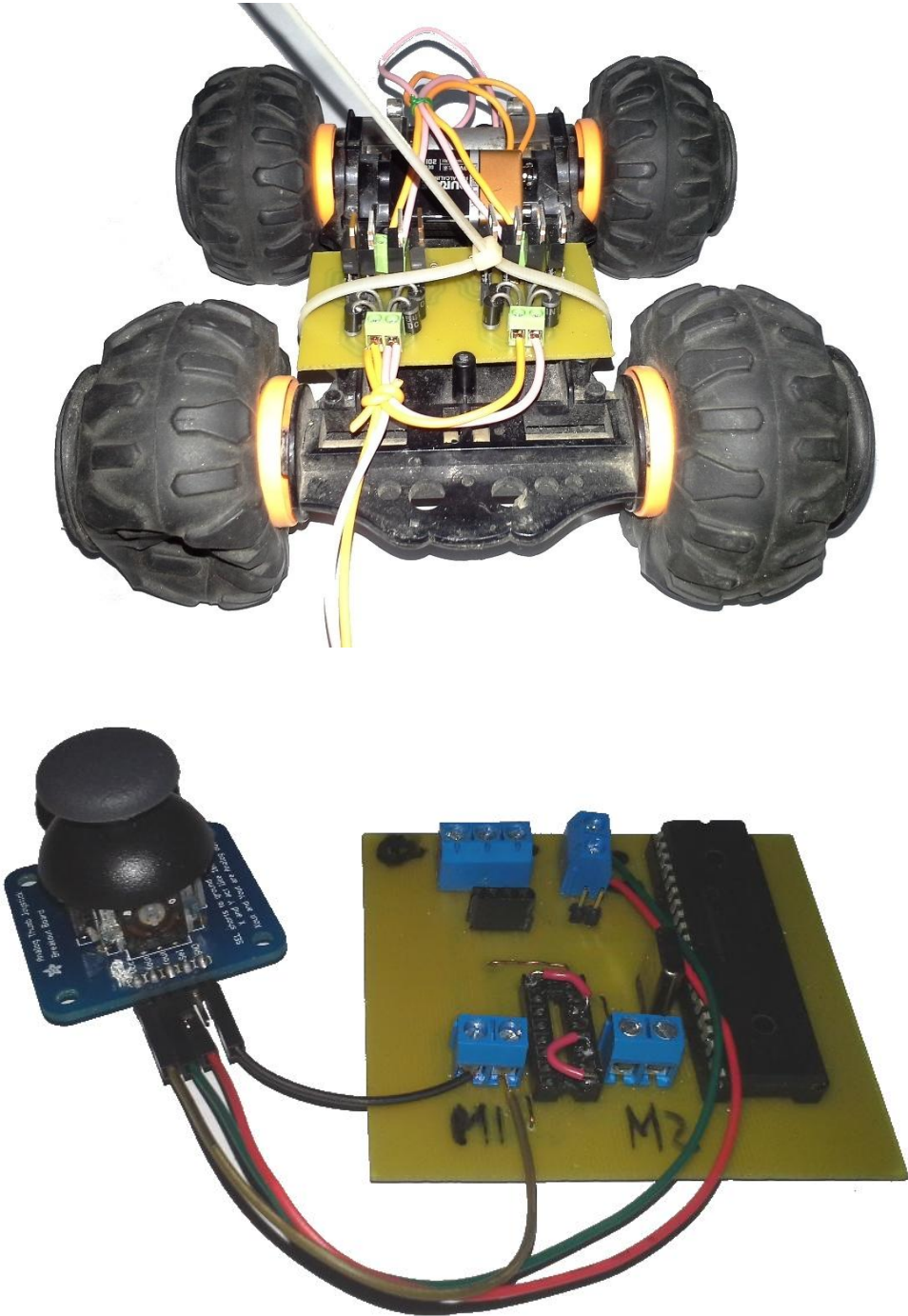
En las figuras 102 y 103 se observan las características del vehículo de pruebas.

Figura 102. **Vista superior del vehículo de pruebas**



Fuente: elaboración propia.

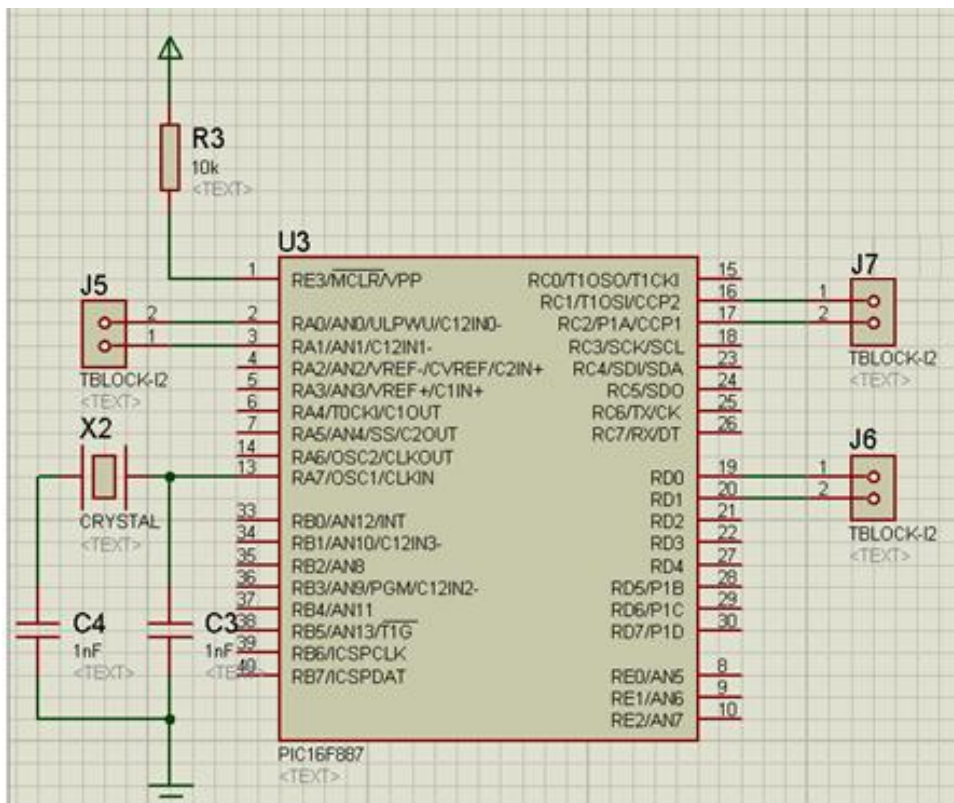
Figura 103. Detalle del control y vista frontal del vehículo de pruebas



Fuente: elaboración propia.

El control electrónico para el vehículo está diseñado para operar bajo las órdenes recibidas por un *joystick* convencional y además para controlar cada uno de los motores de forma independiente. La tarjeta de control sólo forma parte del equipo de prueba necesario para determinar la funcionalidad del diseño del DCMCC y no tiene ninguna relación con los parámetros y/o el funcionamiento del mismo. Como se ha mencionado en párrafos anteriores, la configuración del controlador del vehículo no afecta en nada el funcionamiento del DCMCC.

Figura 104. Diagrama esquemático de la tarjeta de control

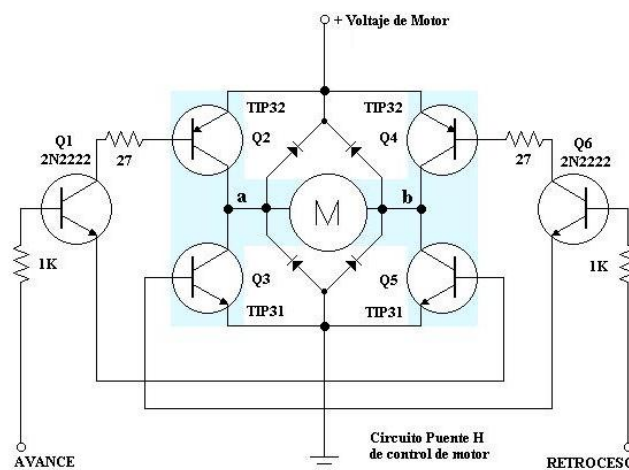


Fuente: elaboración propia, con programa Proteus.

Para la tarjeta de control del vehículo de pruebas se utiliza un microcontrolador PIC16F887, el cual está programado para responder a las señales de voltaje proporcionadas por el control, ya sea este el *joystick* o el DCMCC, los cuales se encuentran acoplados a las entradas analógicas del microcontrolador por medio del selector. En la figura 104 se puede apreciar el diagrama esquemático de la tarjeta de control, puede apreciarse la entrada de las señales analógicas en J5, así como, las salidas hacia la etapa de potencia de los motores en J6 y J7.

Para el manejo de la corriente del motor y la realización del cambio de giro se hace uso de dos puentes H, construidos con transistores capaces de soportar una corriente máxima de 4 amperios. Cada uno de los puentes H únicamente necesita la orden de avance o retroceso para activar el giro correspondiente de cada motor. En la figura 104 se presenta el diagrama esquemático del puente H.

Figura 105. Diagrama esquemático de un puente H



Fuente: www.ucontrol.com.ar. [Consulta: febrero de 2014].

CONCLUSIONES

1. El estudio de la biomecánica de la cabeza y el cuello proporciona los datos necesarios para la implementación del dispositivo de detección de movimiento, principalmente se obtienen los rangos angulares de movimiento y con ello el espacio de trabajo de las articulaciones responsables del movimiento de la cabeza.
2. Se establece que la rotación de la cabeza sobre un eje que es paralelo a la columna vertebral es de 60 grados, que puede inclinarse 20 grados hacia adelante y 30 grados hacia atrás con respecto a la vertical, Asimismo, puede girar 20 grados hacia cada uno de los lados. Todo esto dentro de los parámetros de seguridad fisiológica.
3. Los dispositivos microelectromecánicos debido a su naturaleza, forman un conjunto de transductores de alta fiabilidad, alta portabilidad, de bajo consumo de energía y de bajo costo.
4. El análisis de cada uno de los componentes que conforman el sistema desarrollado es de gran importancia, ya que esto facilita la modificación, mejora e implementación del dispositivo, permitiendo su fácil acceso.
5. El desempeño del dispositivo es más fiable si se sustituye el giroscopio por un acelerómetro, ya que debido a la naturaleza de la aplicación, la respuesta del acelerómetro es más sencilla de manejar.

RECOMENDACIONES

1. El uso del dispositivo de detección del movimiento de la cabeza y el cuello para la conducción de una silla de ruedas eléctrica debe ser llevado a cabo con seguridad y responsabilidad de parte del usuario, puesto que no se trata de un juguete y necesita que se le proporcione la atención suficiente para evitar accidentes.
2. Es posible utilizar el acelerómetro para capturar la orden de giro del vehículo en sustitución del giroscopio.
3. Para reducir costos y aumentar la fiabilidad del dispositivo, es posible comprobar el funcionamiento del mismo utilizando el oscilador interno del microcontrolador.
4. Puede conseguirse un control más fino enfocando en otra perspectiva el algoritmo de programación, haciendo que el microcontrolador genere un mayor número de posiciones, lo cual contribuye a la precisión del control.

BIBLIOGRAFÍA

1. ALLEN, James J. *Microelectromechanical system design*. Estados Unidos: CRC Press, 2005. 496 p.
2. BEEBY, Stephen. ENSELL, Graham. KRAFT, Michael. *MEMS, mechanical sensor*. Estados Unidos: Artech House., 2004. 269 p.
3. MICROCHIP Technology Inc. PIC12F683 data sheet. Estados Unidos, 2007. 148 p.
4. NORDIN, Margareta. FRANKEL, Victor. *Biomecánica básica del sistema musculo esquelético*. 3a ed. España: McGraw-Hill, 2004. 712 p.
5. PETERSON, Donald R. BRONZINO, Joseph D. *Biomechanics, principles an applications*. Estados Unidos: CRC Press, 2008. 352 p.
6. ROUVIÉRE, Henry. DELMAS, André. *Anatomía humana descriptiva, topografía y funcional. (Cabeza y cuello)*. 11a ed. España: Masson, 2005. 712 p.

APÉNDICES

Código fuente adquisición de datos del acelerómetro.....	213
Código fuente adquisición de datos del giroscopio.....	217
Código fuente del selector.....	220
Código fuente de la tarjeta de control de motores.....	222
Diagrama esquemático del acondicionador de señales.....	226
Listado de componentes del acondicionador de señales.....	227
Diseño PCB escala 1:1 del acondicionador de señales.....	228
Diagrama esquemático del selector.....	229
Listado de componentes del selector.....	230
Diseño PCB escala 1:1 del selector.....	231
Diagrama esquemático del puente H.....	232
Listado de componentes del puente H.....	233
Diseño PCB escala 1:1 del puente H.....	234
Diagrama esquemático de la tarjeta de control.....	235
Diagrama en bloques del sistema completo.....	236

CODIGO FUENTE ADQUISICION DE DATOS DEL ACELEROMETRO

```
program acelerometer
dim read as word
dim x, con, flag, flag2 as byte
main:

    ADC_Init()                'Inicializa la conversión ADC
    ADCON0 = 0x1F             'Establece VDD como Vref y AN0 como
                              entrada analógica

    TRISIO.2 = 0              'Establece GPIO2 como salida
    TRISIO.1 = 0              'Establece GPIO1 como salida
    TRISIO.0 = 1              'Establece GPIO0 como entrada (AN0)

    x = 1
    flag = 0
    flag2 = 0
    GPIO = 0                  'inicialización en 0 del puerto GPIO

    while x = 1               'x siempre es uno, para mantener el ciclo
                              activo infinitamente

        read = ADC_Read(0)    'lee el valor de la entrada ACD en este
                              instante y lo guarda en read.

        Delay_Ms(100)         'retardo de 10 segundos

                              'Estando en el estado de reposo, acá solo
                              es posible ir a la velocidad 1 o retroceso.

    IF read > 850 then        'si el valor en an0 es mayor que 850 entonces
    flag = 1                  'esta bandera me indica que estoy en la
                              velocidad 1

    for con = 1 to 20         'este ciclo constituye el reloj que indica al
                              AD5520 cuantos pasos avanzar

    GPIO = 6                  'Cuando GPIO = 6, GPIO.1 = 1 (clk) Y GPIO.2
```

<pre> DELAY_MS(10) GPIO= 5 DELAY_MS(10) next con delay_ms(1000) while flag = 1 read = ADC_Read(0) delay_ms(10) if read > 850 then flag2 = 1 for con = 1 to 20 GPIO = 6 DELAY_MS(10)1 GPIO= 5 DELAY_MS(10) next con while flag2 = 1 read = ADC_Read(0) delay_ms(10) if read < 350 then for con = 1 to 20 </pre>	<pre> = 1(up/-dw) 'El retardo modifica la frecuencia del reloj y además es utilizado para la rampa de aceleración 'Cuando GPIO = 5, GPIO.1 = 0 (clk) y GPIO.2 = 1 (up/-dw) 'Este retardo es importante, pues representa el tiempo que le toma al usuario regresarla cabeza a la posición neutra. 'Estado actual: velocidad 1. Solo es posible pasar al estado de reposo o a velocidad 2 'Si el valor en an0 es mayor que 850 entonces salta al estado 2 'Genera los pulsos de reloj para pasar al Velocidad 2 'velocidad 2 'En el estado Velocidad 2 solo es posible regresar al estado Velocidad 1 'Si el valor en an0 es menor que 350 salta al estado Velocidad 1 </pre>
---	--

<pre> GPIO = 2 DELAY_MS(10) GPIO= 0 DELAY_MS(10) next con flag2 = 0 end if DELAY_MS(1000) wend end if read = ADC_Read(0) if read < 350 then for con = 1 to 20 GPIO = 2 DELAY_MS(10) GPIO= 0 DELAY_MS(10) next con flag = 0 end if wend DELAY_MS(2000) read = ADC_Read(0) end if </pre>	<pre> 'Lee el valor del puerto en este instante 'Vuelve al estado 1 'Si el valor de an0 es menor que 350 entonces pasa al estado de reposo </pre>
<pre> if read < 200 then for con = 1 to 30 GPIO = 2 DELAY_MS(15) </pre>	<pre> 'Actualmente en el estado de reposo, si an0 es menor que 350 entonces pasa a reversa 'El contador indica el numero de pasos en que se reducirá la resistencia del AD5520 'cuando el puerto GPIO = 2, GPIO.1 = 1 (clk) y GPIO.2 = 0 (up/-dw) </pre>

<pre> GPIO= 0 GPIO.2 = 0 (up/-dw) DELAY_MS(15) next con flag = 1 DELAY_MS(1000) while flag = 1 read = ADC_Read(0) IF read > 850 then for con = 1 to 30 GPIO = 6 DELAY_MS(15) GPIO= 5 DELAY_MS(15) next con flag = 0 end if wend DELAY_MS(2000) end if WEND end.</pre>	<pre> 'Cuando el puerto GPIO = 0, GPIO.1 = 0 (clk) y 'Pasa al estado de Reversa 'Si el valor en an0 es mayor que 850 salta al estado de reposo</pre>
--	--

CODIGO FUENTE ADQUISICION DE DATOS DEL GIROSCOPIO

```
program giroscope

dim read as word           'la variable read es tipo word para contener los
                            10bit de la conversión ADC

dim x, con as byte        'x se utiliza para mantener el ciclo, flag y flag2
                            para indicar el estado y con es un contador

main:
  ADC_Init()              'Inicializa la conversión ADC
  ADCON0 = 0x1F           'Establece VDD como Vref y AN0 como entrada
                            análoga

  TRISIO.2 = 0            'Establece GPIO2 como salida
  TRISIO.1 = 0            'Establece GPIO1 como salida
  TRISIO.0 = 1            'Establece GPIO0 como entrada (AN0)

  x = 1
  GPIO = 0
  while x = 1             'x siempre es uno, para mantener el ciclo activo
                            infinitamente

  read = ADC_Read(0)      'lee el valor de la entrada ACD en este instante y
                            lo guarda en read.

  Delay_Ms(100)           'retardo de 10 segundos
                            'Estando en el estado de reposo, las únicas
                            opciones son izquierda o derecha
                            'derecha

  IF read > 850 then      'si el valor en an0 es mayor que 850 entonces
  for con = 1 to 64       'este ciclo constituye el reloj que indica al
                            AD5520 cuantos pasos avanzar

  GPIO = 6                'Cuando GPIO = 6, GPIO.1 = 1 (clk) Y GPIO.2 =
                            1(up/-dw)

  DELAY_MS(4)            'El retardo modifica la frecuencia del reloj y
                            además es utilizado para la rampa de
                            aceleración.
```

<pre> GPIO= 5 </pre>	<pre> 'Cuando GPIO = 5, GPIO.1 = 0 (clk) y GPIO.2 = 1 (up/-dw) </pre>
<pre> DELAY_MS(2) next con delay_ms(900) for con = 1 to 64 </pre>	<pre> 'Genera los pulsos de reloj para pasar a Velocidad 2 </pre>
<pre> GPIO = 2 DELAY_MS(4) GPIO= 0 DELAY_MS(2) next con delay_ms(1000) end if </pre>	
<pre> read = ADC_Read(0) </pre>	
<pre> if read < 200 then </pre>	<pre> 'Actualmente en el estado de reposo, si an0 es menor que 200 entonces pasamos a Reversa </pre>
<pre> for con = 1 to 64 </pre>	<pre> 'El contador indica el numero de pasos en que se reducirá la resistencia del AD5520 </pre>
<pre> GPIO = 2 </pre>	<pre> 'cuando el puerto GPIO = 2, GPIO.1 = 1 (clk) y GPIO.2 = 0 (up/-dw) </pre>
<pre> DELAY_MS(4) GPIO= 0 </pre>	<pre> 'Cuando el puerto GPIO = 0, GPIO.1 = 0 (clk) y GPIO.2 = 0 (up/-dw) </pre>
<pre> DELAY_MS(2) next con delay(900) for con = 1 to 64 GPIO = 6 DELAY_MS(4) GPIO= 5 DELAY_MS(2) </pre>	

```
next con  
delay_ms(1000)  
end if
```

```
WEND  
end.
```


CODIGO FUENTE DEL SELECTOR

```
program pic12
dim x, AUX as byte
dim read as word
main:

ADC_Init()           'Inicializa la conversión ADC
ADCON0 = 0x1F       'Establece VDD como Vref y AN0 como
                    entrada análoga

TRISIO.2 = 0        'Establece GPIO2 como salida
TRISIO.1 = 0        'Establece GPIO1 como salida
TRISIO.0 = 1        'Establece GPIO0 como entrada (AN0)
x = 1

while x = 1
read = ADC_Read(0)

if read > 950 then
AUX = 1
GPIO = 2
DELAY_MS(100)
GPIO = 6
WHILE AUX = 1
DELAY_MS(500)
read = ADC_Read(0)
if read < 50 THEN
AUX = 0
END IF
WEND
delay_ms(500)
END IF
read = ADC_Read(0)
```

```
IF read < 50 THEN
AUX = 1
GPIO = 6
DELAY_MS(100)
GPIO = 0
WHILE AUX = 1
DELAY_MS(500)
read = ADC_Read(0)
IF read > 950 THEN
AUX = 0
END IF
WEND
delay_ms(500)
end if

WEND
end.
```

CODIGO FUENTE DE LA TARJETA DE CONTROL DE MOTORES

```
program vehiculo
dim x,y as byte
dim read1, read2 as word
dim value as word

main:
INTCON = 0           ' desactiva todas las interrupciones.
ADCON1 = $07
TRISC = 0
TRISD = 0
TRISA = $FF

PWM1_Init(1000)     ' Inicializar PWM1 a 5KHz
PWM2_Init(1000)     ' Inicializar PWM2 a 5KHz
PWM1_Start()        ' start PWM1
PWM2_Start()        ' start PWM2
portd = 0
portc = 0
x=1
delay_ms(30)

While x = 1
read2 = ADC_Read(1)
  if read2 > 820 then
portd = 1
PWM1_Set_Duty(250)
while read2 > 820
read2 = ADC_Read(1)
delay_ms(10)
wend
```

```

    PWM1_Set_Duty(0)
  end if
read2 = ADC_Read(1)
  if read2 < 204 then
    portd = 2
    PWM1_Set_Duty(255)
    while read2 < 204
      read2 = ADC_Read(1)
      delay_ms(10)
    wend
    PWM1_Set_Duty(0)
  end if

```

```

read1 = ADC_read(0)

```

```

if read1 > 600 then
while read1 > 600
read1 = ADC_Read(0)
portd = 3
value = read1 - 512
value = value*100/512
value = value*255
value = value/100
y = value
PWM1_Set_Duty(y)
read2 = ADC_Read(1)
  if read2 > 820 then
    portd = 1
    while read2 > 820
      read2 = ADC_Read(1)
      delay_ms(10)
    wend
  end if
portd = 3
  if read2 < 204 then

```

' establecer el rendimiento actual para PWM1

```

    portd = 2
    while read2 < 204
        read2 = ADC_Read(1)
        delay_ms(10)
    wend
end if
portd = 3
wend
PWM1_Set_Duty(0)
portd = 0
end if

read1 = ADC_Read(0)

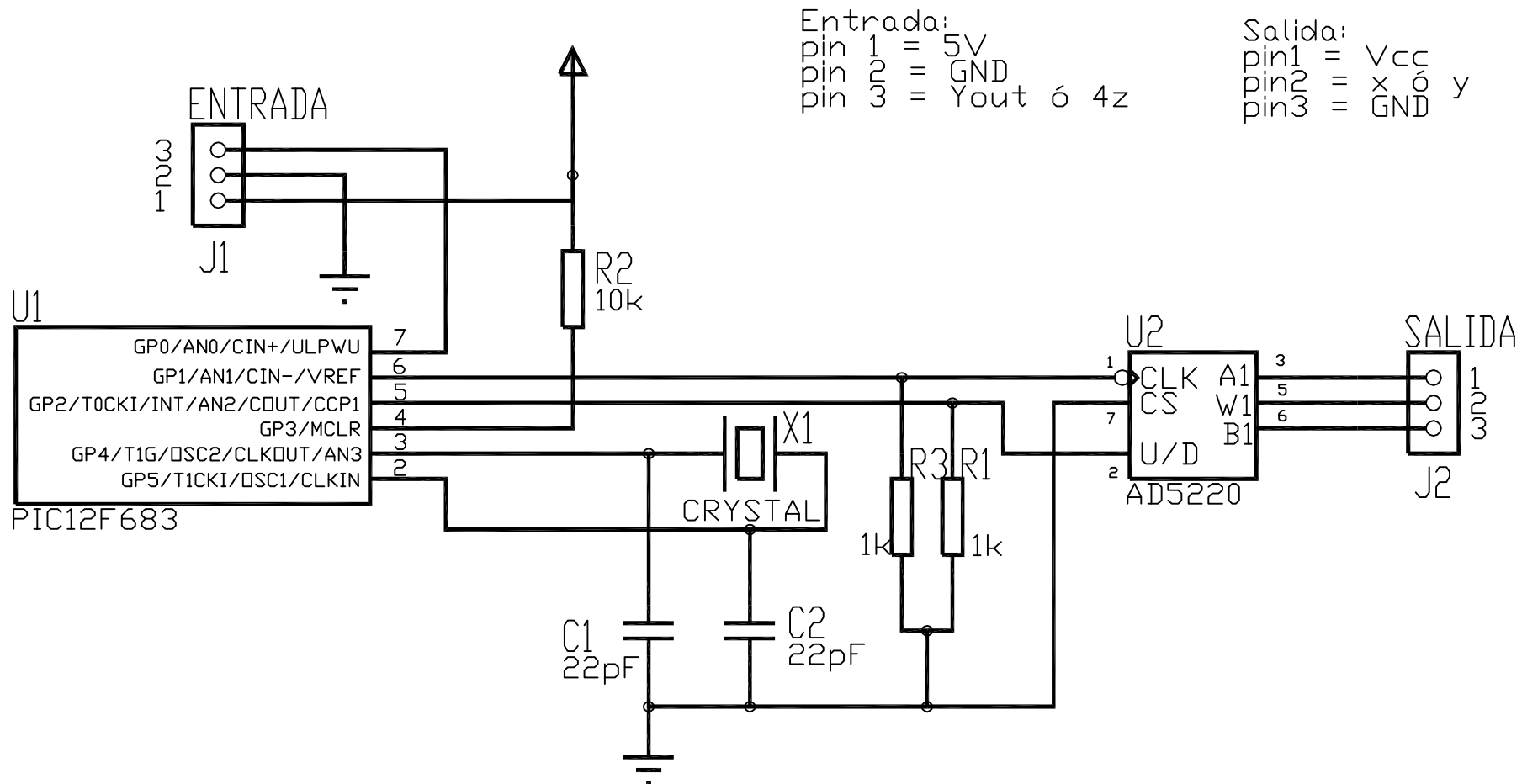
if read1 < 410 then
While read1 < 410
read1 = ADC_Read(0)
portd = 3
value = 512 - read1
value = value*100/512
value = value*255
value = value/100
y = value
PWM2_Set_Duty(y)           ' establece el rendimiento actual del PWM2
read2 = ADC_Read(1)
if read2 > 820 then
    portd = 1
    while read2 > 820
        read2 = ADC_Read(1)
        delay_ms(10)
    wend
end if
portd = 3
    if read2 < 204 then
        portd = 2

```

```
    while read2 < 204
      read2 = ADC_Read(1)
      delay_ms(10)
    wend
  end if
  portd = 3
wend
PWM2_Set_Duty(0)
portd = 0
end if

'if (read1 < 820) or (read1 > 410) then
'PWM1_Set_Duty(0)
'PWM2_Set_Duty(0)
'portd = 0
'end if

wend
end.
```



Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.

Plano: Acondicionador de señales de los sensores inerciales

Plano N° 1

ESCALA

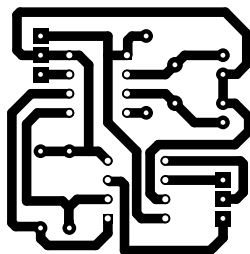
Fecha:

S/escala

Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic

U1	PIC12F683
U2	AD5220
C1	CAPACITOR DE 22 pF
C2	CAPACITOR DE 22 pF
R1	RESISTOR DE 1K OHM
R2	RESISTOR DE 10K OHM
R3	RESISTOR DE 1K OHM
X1	CRISTAL DE 8 MHz
J1	CONECTOR IDC 3 PINES
J2	CONECTOR IDC 3 PINES

Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.	
Plano: Listado de componentes del acondicionador de señales	Plano N° 2
ESCALA	Fecha:
S/escala	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic

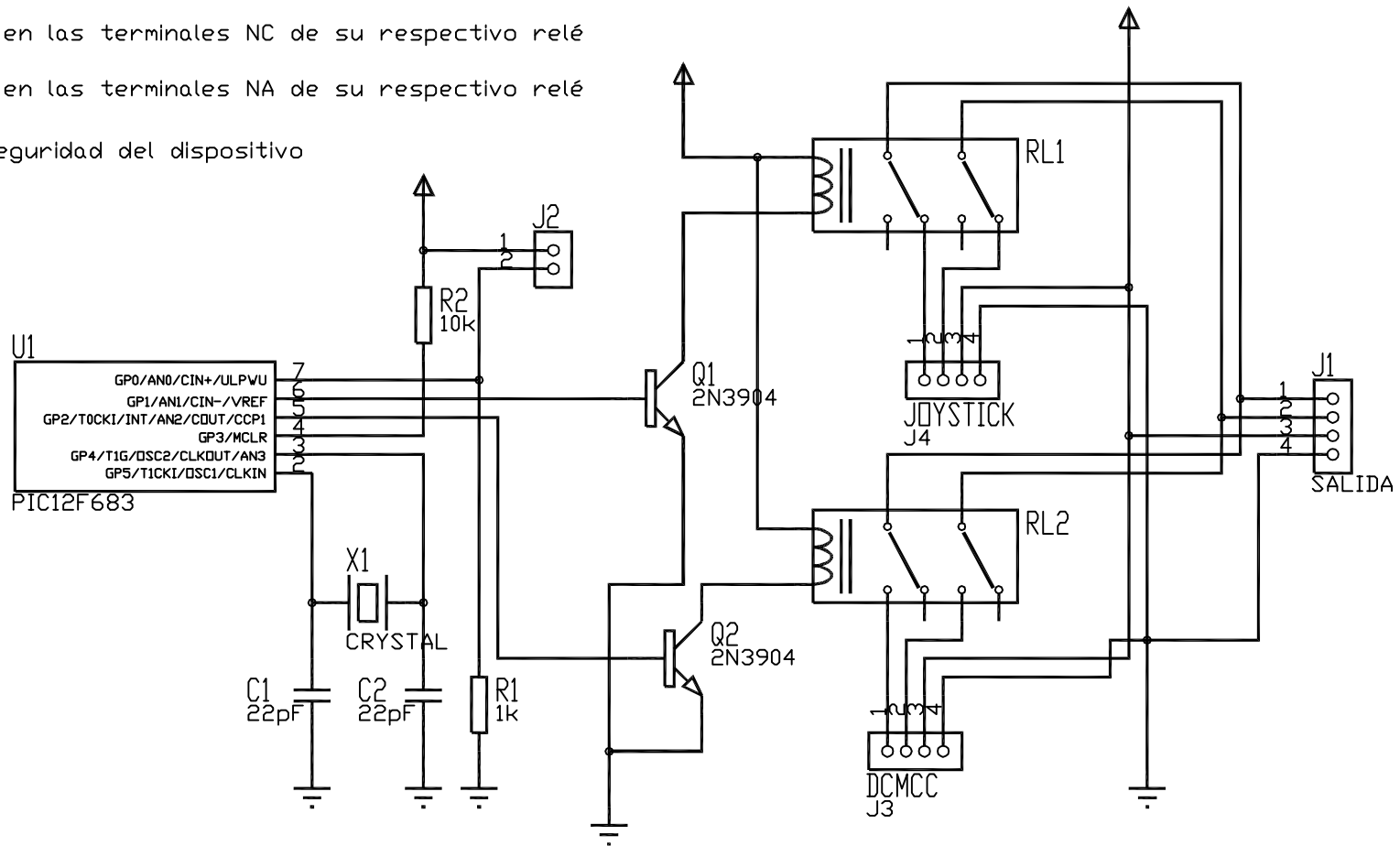


	Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.		
	Plano: PCB del acondicionador de señales		Plano N° 3
	ESCALA 1:1	Fecha:	
	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic		

JOYSTICK:
Se conecta en las terminales NC de su respectivo relé

CMDC:
Se conecta en las terminales NA de su respectivo relé

J2
Switch de seguridad del dispositivo



Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.

Plano: Selector

Plano N° 4

ESCALA

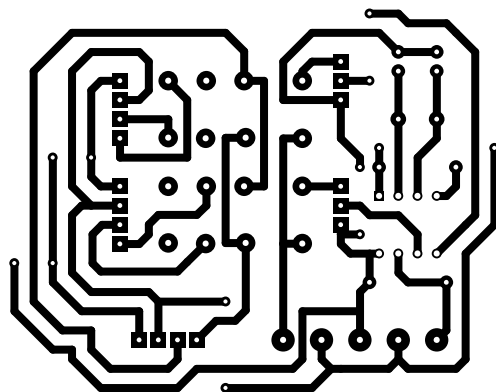
Fecha:

S/escala

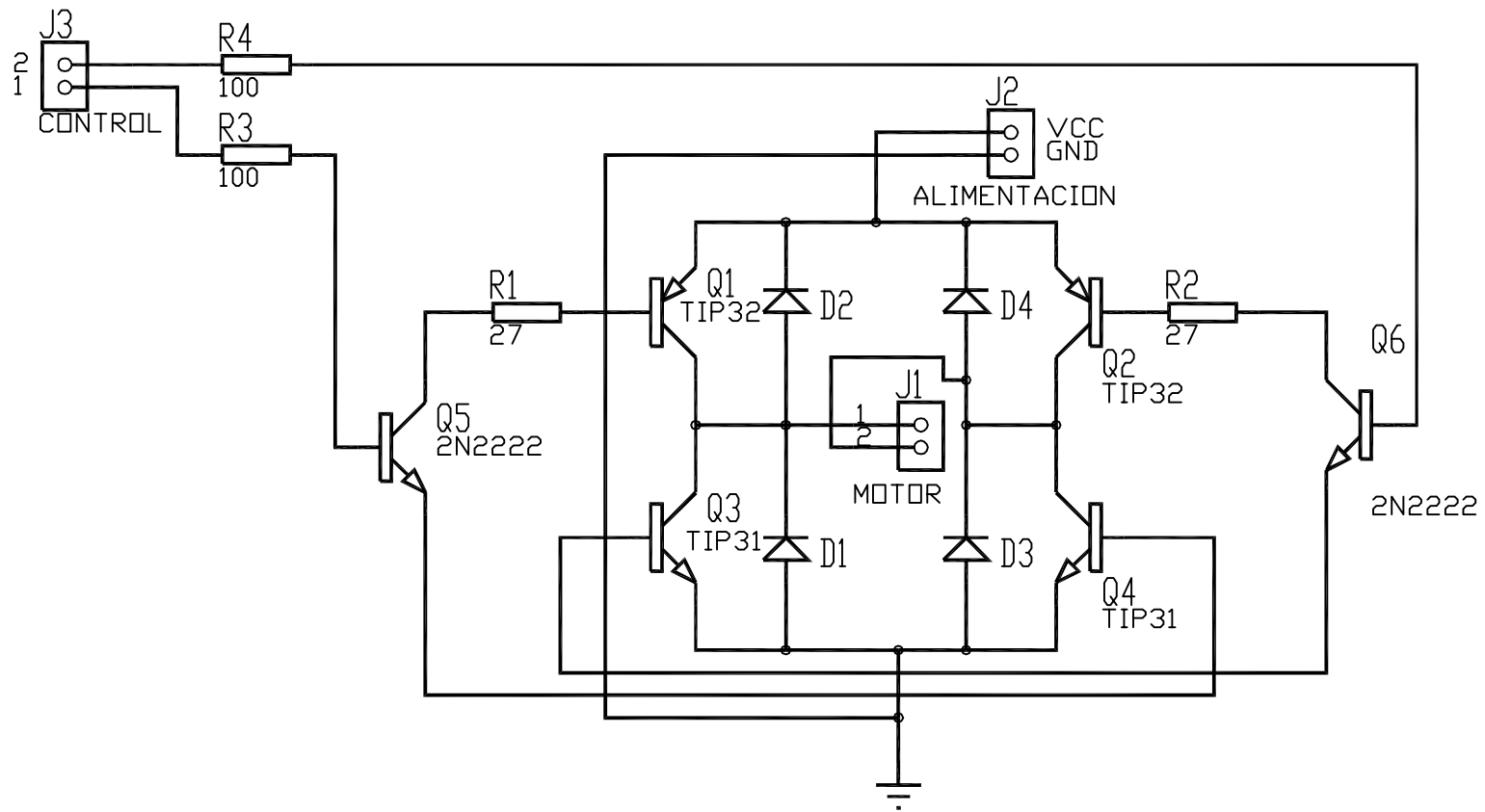
Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic

U1 PIC12F683
 C1 CAPACITOR DE 22 pF
 C2 CAPACITOR DE 22 pF
 R1 RESISTOR DE 1K OHM
 R2 RESISTOR DE 10K OHM
 RL1, RL2 RELÉ DE 5 VOLTIOS
 X1 CRISTAL DE 8 MHz
 J1,3,4 CONECTOR IDC 3 PINES
 J2 CONECTOR IDC 2 PINES
 Q1,2 TRANSISTOR 2N3904

		Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.	
		Plano: Listado de componentes del selector	Plano N° 5
ESCALA	Fecha:		
S/escala	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic		



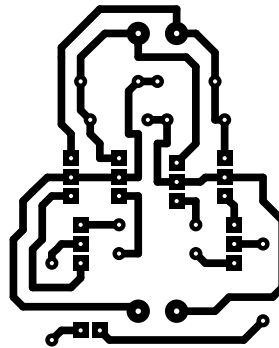
	Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.		
	Plano: PCB selector		Plano N° 6
ESCALA	Fecha:		
1:1	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic		



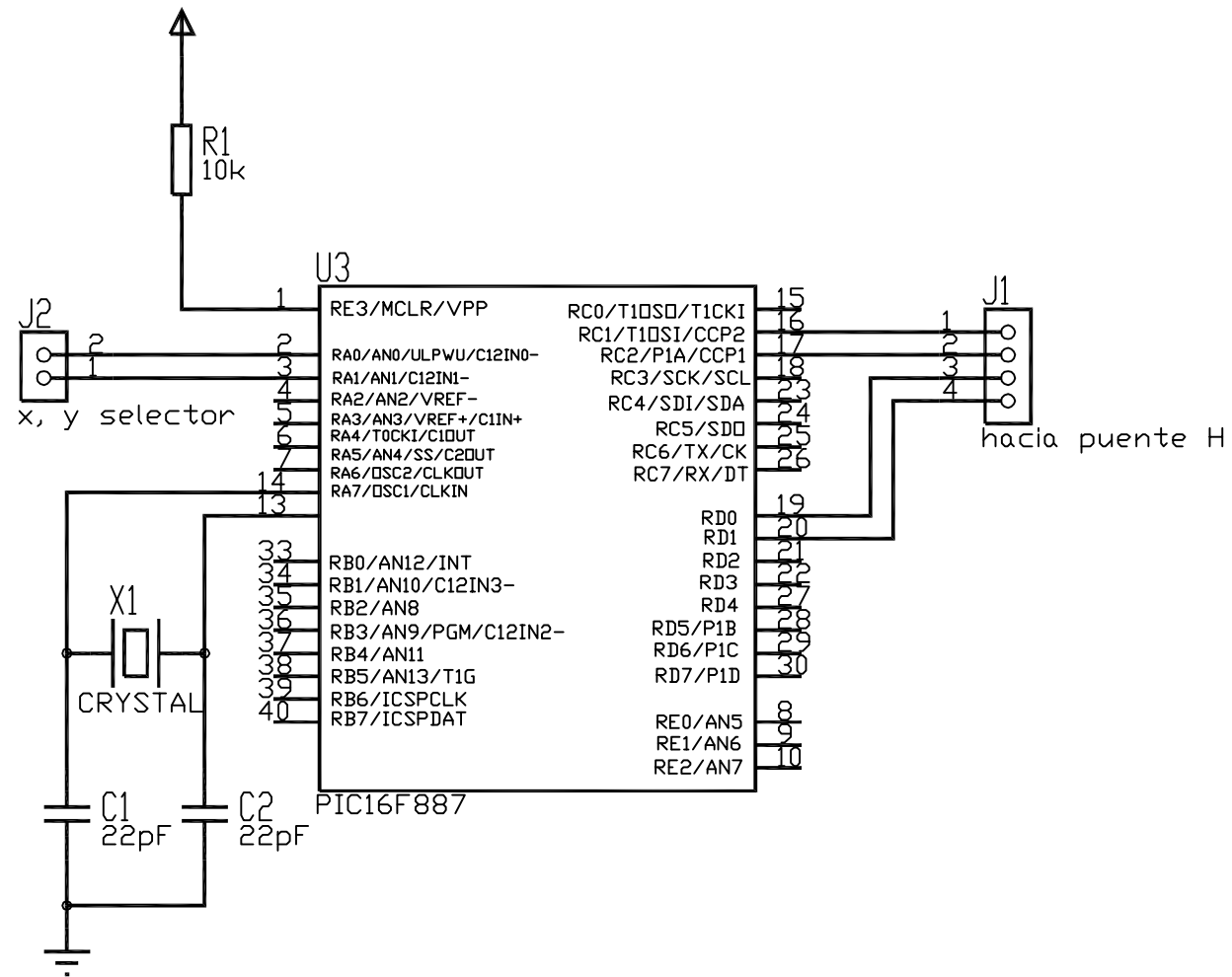
Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.	
Plano: Diagrama Esquemático del puente H	Plano N° 7
ESCALA	Fecha:
S/escala	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic

Q1, 2 TRANSISTOR TIP32
 Q3, 4 TRANSISTOR TIP31
 Q5, 6 TRANSISTOR 2N2222
 D1, 2 DIODOS DE 3 AMP.
 D3, 4 DIODOS DE 3 AMP.
 R1, 2 RESISTORES DE 27 OHM
 R3, 4 RESISTORES DE 100 OHM
 J1 CONECTOR MOTOR DC
 J2 CONECTOR ALIMENTACION
 J3 CONECTOR CONTROL GIRO

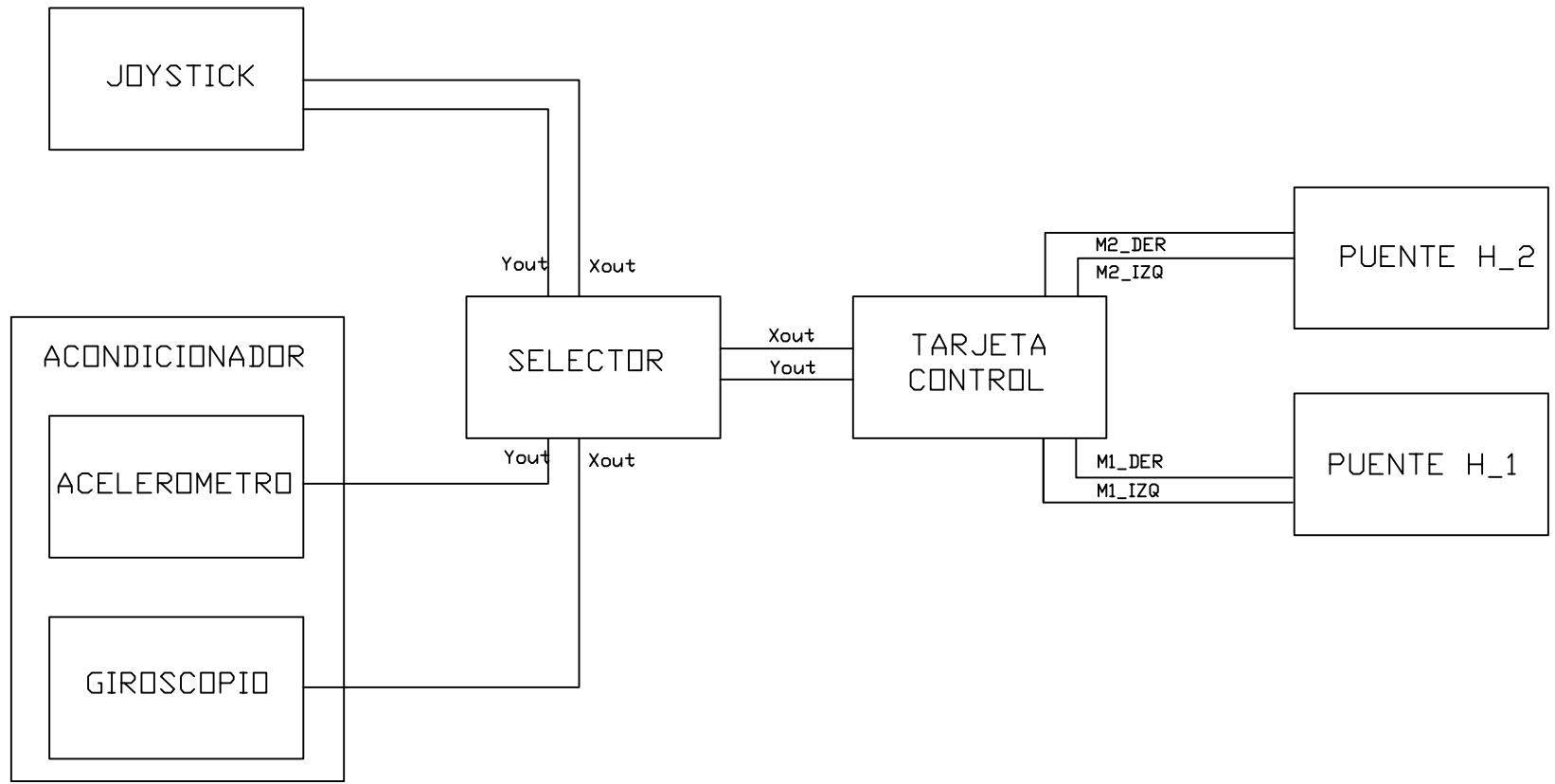
	Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.		
	Plano: Listado de componentes del puente H		Plano N° 8
	ESCALA	Fecha:	
S/escala	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic		



	Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.		
	Plano: PCB del puente H		Plano N° 9
	ESCALA 1:1	Fecha:	
	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic		



Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.	
Plano: Circuito de control del vehiculo.	Plano N° 10
ESCALA	Fecha:
S/escala	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic



Proyecto: Dispositivo de captura de movimiento de la cabeza y el cuello.	
Plano: Diagrama en bloques del sistema	Plano N° 11
ESCALA	Fecha:
S/escala	Autor: Fredy Leonel Ramos Sanic