



**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA
DETERMINAR EL NIVEL DE RESISTENCIA DE HUESOS DE
POLLOS PARA LA INDUSTRIA AVÍCOLA**

PRESENTADA POR

LUIS ARMANDO BAUTISTA HOLGUINO

ARMANDO ANDRÉ HUAMÁN DE LA CRUZ

ASESOR

FERNANDO MAURICIO JIMENES MOTTE

CHRISTIAN CARLOS DEL CARPIO DAMIÁN

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

LIMA – PERÚ

2019



CC BY-NC-ND

Reconocimiento – No comercial – Sin obra derivada

La autora sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede cambiar de ninguna manera ni se puede utilizar comercialmente.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>



USMP
UNIVERSIDAD DE
SAN MARTÍN DE PORRES

FACULTAD DE
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO ELECTRÓNICO PARA
DETERMINAR EL NIVEL DE RESISTENCIA DE HUESOS DE
POLLOS PARA LA INDUSTRIA AVÍCOLA**

TESIS

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRÓNICO

PRESENTADA POR

**BAUTISTA HOLGUINO, LUIS ARMANDO
HUAMÁN DE LA CRUZ, ARMANDO ANDRÉ**

LIMA – PERÚ

2019

Dedicatoria

A Dios por guiarnos a lo largo de nuestra carrera universitaria.

Agradecimiento

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	x
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	1
1.1 Estado del arte	1
1.2 Bases teóricas	25
CAPÍTULO II. MODELAMIENTO	40
2.1 Materiales	40
CAPÍTULO III. DESARROLLO	55
3.1 Metodología	55
CAPÍTULO IV. DISEÑO	63
4.1 Especificaciones de diseño	63
4.2 Limitaciones	63
4.3 Restricciones	63
4.4 Métodos de diseño	64
4.5 Prototipo final	70
CAPÍTULO V. PRUEBAS, VALIDACIONES Y RESULTADOS	73
5.1 Pruebas y validaciones	73
5.2 Resultados	77
CONCLUSIONES	97
RECOMENDACIONES	98
FUENTES DE INFORMACIÓN	99

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Perú Precio al productor de carne entre 2007 - 2017; 2017 (nuevos soles por kilogramo)	x
Figura 2: Perú producción de carnes por región, 2017 (toneladas)	xi
Figura 3: Perú producción de carnes por región, 2017 (miles de unidades)	xi
Figura 4: Datos estadísticos de producción avícola.	xiii
Figura 5 Sistema de Instrumentación	1
Figura 6 Panel frontal del programa.	2
Figura 7: Algoritmo de Programación	3
Figura 8: a) Escaner 3D, b) Fémur humano en 3D.	4
Figura 9: a) Leeb portátil, b) Brinell.	5
Figura 10: Prueba de compresión en tibia humana.	5
Figura 11: a) Prueba de compresión en tibia de pollo	5
Figura 12: Modelado de tibia humana utilizando FEA.	6
Figura 13: Modelado de tibia humana utilizando FEA.	7
Figura 14: (a) Curva de tensión-deformación	8
Figura 15: Diagrama de bloques del sistema para la medición de deformación ósea.	9
Figura 16: Configuración experimental para las mediciones de precisión de desplazamiento	10
Figura 17: (a) Curva de tensión-deformación	11
Figura 18: Prueba de flexión de tres puntos utilizando una tibia porcina.	11
Figura 19: Resultado del desplazamiento.	12
Figura 20: Grafica de lectura detención y sistema de ultrasonido utilizando tibia porcina.	12
Figura 21: Módulos de elasticidad.	14
Figura 22: Momento doblado y torsión.	15
Figura 23: Momento de inercia y resistencia.	15
Figura 24: Ejemplos de placas (arriba), clavos (Derecha) y tornillos (Izquierda) de material bioabsorbible.	16
Figura 25: Tibias de gallinas preparadas con materiales copolímeros.	17
Figura 26: Diagrama del sistema de compresión.	17
Figura 27: Ensayo con tibia de pollo	20
Figura 28: Herramienta de fresado	21
Figura 29: Modelamiento de elementos finitos	22

Figura 30: Modelamiento de elementos finitos	23
Figura 31: Esquema del diseño	25
Figura 32: Partes de un motor DC	26
Figura 33: Puente Wheatstone	27
Figura 34: Detección de un objeto metálico	29
Figura 35: Forma de Onda de Oscilación	29
Figura 36: Bloque de un sensor inductivo	29
Figura 37: Corriente de Foucault	30
Figura 38: Conversión Análoga - Digital	31
Figura 39: Corriente de Foucault	32
Figura 40: Configuración común de las galgas extensiométricas.	33
Figura 41: Configuración de puente completo.	33
Figura 42: Tipos de Fuerza a los que se puede someter un hueso	39
Figura 43: Diagrama de pines	41
Figura 44: Figura comparativa	42
Figura 45: Diagrama de bloque del temporizador	44
Figura 46: Registro de 16 bits	45
Figura 47: Onda cuadrada	45
Figura 48: Trenes de impulso	46
Figura 49: Diagrama de pines	48
Figura 50: Configuración de pines del Raspberry 3 Model B+	48
Figura 51: Celda de carga Tipo single	49
Figura 52: Actuador eléctrico	51
Figura 53: Driver YC-MD1301	52
Figura 54: Terminales del MK2P-I	53
Figura 55: Acondicionamiento del sensor	54
Figura 56: Vista frontal de la pantalla	54
Figura 57: Viga de madera	57
Figura 58: Pesas para calibración.	61
Figura 59: Vista frontal.	64
Figura 60: Vista lateral izquierda.	65
Figura 61: Diseño Final.	65
Figura 62: Área de prueba.	66
Figura 63: Tablero de control.	66
Figura 64: Diseño de PCB 1.	67
Figura 65: Diseño de PCB 2.	67
Figura 66: Interfaz GUI.	68
Figura 67: Interfaz GUI.	68
Figura 68: Interfaz GUI.	69
Figura 69: Diagrama de flujo general.	70
Figura 70: Vista del prototipo final	71
Figura 71: Vista del prototipo final	71
Figura 72: Vista del prototipo final	71
Figura 73: Vista del prototipo final	72

Figura 74: Vista del prototipo final	72
Figura 75: Pesa de 2 kg calculado en el Prototipo.	73
Figura 76: Pesa de 3 kg calculado en el Prototipo.	74
Figura 77: Digital Force Gauge Modelo FH 1K.	75
Figura 78: Estructura para realizar el cálculo de resistencia ósea compatible con el Digital Force Gauge Modelo FH 1K.	75
Figura 79: Muestras de madera	76
Figura 80: Comparación entre tibia de pollo y madera prensada	76
Figura 81: Tibia de pollo broiler.	77
Figura 82: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material	79
Figura 83: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	80
Figura 84: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo	81
Figura 85: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material	84
Figura 86: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	85
Figura 87: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo	87
Figura 88: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material	89
Figura 89: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	90
Figura 90: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo	91
Figura 91: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material	93
Figura 92: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	94
Figura 93: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo	95
Figura 94: Grafica de resultados con madera balsa 5 mm	108
Figura 95: Grafica de resultados con madera balsa 6 mm	108
Figura 96: Grafica de resultados con huesos	109

RESUMEN

La presente tesis se propone desarrollar, automatizar e implementar un prototipo electrónico mediante el procesamiento de señales provenientes de sensores analógicos y digitales, para determinar el nivel de resistencia ósea de aves de corral en la industria avícola. Dicho prototipo está orientado a colaborar con el estudio nutricional de pollos y optimizar su dieta con la finalidad de obtener huesos más resistentes. La producción de aves de corral es uno de los sectores agropecuarios con mayor crecimiento y se estima que para los próximos años la tendencia continúe con un incremento de 1.6% anual según la FAO-OCDE (Perspectivas agrícolas 2014-2023).

Este prototipo muestra una gráfica de fuerza con respecto al tiempo que toma realizar el ensayo; la fuerza ejercida sobre el hueso fue de un área de 1 cm². Esta resistencia se designa con magnitudes de KgF/cm². Además, se genera una base de datos en Excel con los resultados obtenidos de cada ensayo. Para generar la fuerza necesaria para que el hueso llegue al punto de ruptura se empleó un actuador eléctrico con una capacidad de 500 N. Este se conecta a un driver de puente H que permite hacer uso de PWM para controlar la velocidad del motor. Para el monitoreo de la fuerza se utilizó una celda de carga que se encuentra adaptado al módulo Hx711. El resultado logrado es la implementación de una interfaz hombre máquina que registre y recupere los datos de las pruebas de resistencia realizadas, además de la visualización de una gráfica y determine el punto máximo de resistencia.

Palabras clave: Procesamiento de señales, PWM (pulse-width modulation), Actuador, Punto de ruptura, Resistencia ósea.

ABSTRACT

The following thesis proposes to develop, automate and implement an electronic prototype by signal processing by analog and digital sensors, to determine the level of poultry bone strength in the industry. This prototype is oriented to collaborate with the nutritional study of chickens and optimize their diet with the purpose of obtaining more resistant bones. Poultry production is one of the agricultural sectors with more development. According to FAO-OCDE (2014-2023 agricultural perspectives), for the following years, the tendency is estimated to continue with an annual increase of 1.6%.

This prototype shows a force vs time spent in the essay graphic; the force imposed on the bone was of an area of 1 cm². Resistance is designated with magnitudes of KgF/cm². In addition, an Excel data base was generated with the results obtained in each essay. To produce the force required to induce the bone breakdown point, an 500 N electric actuator was used. The late one is connected to a H bridge that allows the use of PWM to control the motor speed. Loadcells adapted to Hx711 module were used to monitor the force. The result obtained was the implementation of a Human-Machine interphase able to register and save the results of resistance tests made, apart from visualizing a graphic and determine the maximum resistance point.

Keywords: Signal Processing, PWM (pulse-width modulation), Actuator, Breaking point, Breakdown point, bone strength.

INTRODUCCIÓN

Los problemas relacionados con la integridad ósea de pollos son preocupantes para la industria avícola, debido a un alto índice de descarte por el poco desarrollo y/o fracturas óseas.

Existen ciertas condiciones que afectan la rentabilidad de la producción, las cuales están relacionada con los problemas esqueléticos como patas torcidas, cojeras y discondroplasia tibial (DT), una de las causas más frecuentes de descarte e incremento en la mortalidad tardía en aves de mayor peso, donde se registra que la presencia de este problema es al menos el 1% en la mayoría de los lotes, representando aproximadamente el 30% del total de pérdidas.

En las Figuras 1, 2 y 3, se observa la producción de aves de corral al año 2017, afirmando la importancia en la investigación de prevención de enfermedades óseas de los pollos de carne; debido a que representa la mayor producción entre las aves de corral vivas (León C., 2017).

Sector/Producto	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017 ^a	VAR. % 17/16
Sector agropecuario	22 808,2	24 741,8	25 379,1	26 407,4	27 861,2	29 538,1	30 131,9	30 698,2	31 894,0	32 587,9	33 488,1	2,8
Subsector agrícola	14 533,2	15 862,1	15 991,2	16 616,0	17 377,3	18 471,3	18 672,8	18 832,5	19 407,9	19 996,6	20 137,0	2,8
Subsector pecuario	8 275,0	8 879,7	9 387,9	9 791,4	10 483,9	11 066,7	11 459,1	11 864,7	12 486,1	12 991,3	13 351,1	2,8
Industria avícola ^b	4 330,6	4 847,6	5 254,7	5 560,1	6 092,9	6 526,7	6 835,4	7 152,1	7 724,6	8 184,5	8 482,7	3,6
Ave	3 534,8	4 024,4	4 424,6	4 679,4	5 111,6	5 556,6	5 754,9	6 044,3	6 531,3	6 945,9	7 199,8	3,7
Huevo	796,8	823,3	830,0	880,7	961,2	970,0	1 080,5	1 107,8	1 193,1	1 236,6	1 263,0	3,6
Ovino	412,5	406,5	407,8	410,4	417,6	430,3	425,5	419,6	404,2	413,9	407,7	-1,5
Porcino	542,7	545,9	543,6	548,1	557,2	579,8	605,0	641,6	677,3	708,0	747,5	5,6
Vacuno	1 396,3	1 397,0	1 408,9	1 470,2	1 631,9	1 696,3	1 651,6	1 678,5	1 676,7	1 648,4	1 613,9	-2,1
Caprino	61,6	59,0	56,6	56,4	56,5	57,4	59,2	56,7	54,3	53,6	51,0	-4,8
Alpaca	166,7	169,6	181,4	191,6	201,5	213,6	216,6	224,2	212,1	221,5	226,9	2,4
Llama	31,9	31,3	32,9	32,1	33,4	34,3	32,9	32,9	31,4	31,3	31,6	0,8
Leche fresca vaca	1 209,6	1 301,0	1 372,9	1 394,7	1 488,6	1 488,0	1 502,3	1 529,2	1 561,5	1 624,0	1 671,1	2,9
Fibra Alpaca	71,4	73,7	80,4	79,8	85,5	88,0	81,0	82,2	81,4	82,7	79,1	-4,3
Fibra Llama	4,6	4,3	4,3	3,9	4,2	4,6	4,4	4,6	4,0	4,1	4,2	1,6
Lana	47,2	43,6	44,5	44,2	44,5	47,7	49,0	43,2	38,8	40,5	36,2	-13,0

Figura 1: Perú Precio al productor de carne entre 2007 - 2017; 2017 (nuevos soles por kilogramo)

Fuente: (Ministerio de Agricultura y Riego – Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA), 2017)

Región	Ave	Ovino	Porcino	Vacuno	Caprino	Alpaca	Llama
NACIONAL	1 989 288	33 448	157 741	188 888	2 547	12 749	4 069
Tumbes	164	37	398	892	378	0	0
Piura	28 902	1 362	4 739	7 680	1 377	0	0
Lambayeque	22 689	329	1 665	3 079	456	0	0
La Libertad	270 847	2 413	16 876	7 660	507	0	0
Cajamarca	3 617	1 219	6 393	26 794	234	0	0
Cajamarca	2 442	894	2 317	10 929	115	0	0
Chota	575	255	2 293	8 232	13	0	0
Jaén	601	70	1 784	4 623	106	0	0
Amazonas	3 637	91	1 712	8 985	57	0	0
Ancash	39 416	1 376	1 375	9 019	214	10	0
Lima	848 198	976	71 506	21 642	603	80	50
Ica	72 365	61	3 935	2 005	211	0	0
Huánuco	1 213	1 751	6 784	18 496	242	26	1
Pasco	406	1 381	1 263	3 407	14	321	116
Junín	12 053	3 300	4 447	9 511	48	321	279
Huancavelica	948	1 601	1 496	3 654	369	783	376
Arequipa	153 406	2 034	11 382	5 486	178	1 169	380
Moquegua	170	84	888	986	13	145	77
Tarma	20 606	182	2 621	570	72	182	129
Ayacucho	1 059	1 829	2 332	11 418	306	1 132	263
Apurímac	764	960	2 874	4 699	194	969	291
Abancay	463	505	922	2 499	51	454	152
Andahuaylas	301	454	1 951	2 200	133	115	140
Cusco	4 092	3 232	3 824	9 690	45	2 267	326
Puno	2 535	8 891	2 540	20 416	0	5 667	1 329
San Martín	37 961	80	2 636	5 901	0	0	0
Loreto	23 704	36	2 381	1 503	0	0	0
Ucayali	12 045	28	873	2 016	0	0	0
Madre de Dios	8 393	46	807	2 389	0	0	0

Figura 2: Perú producción de carnes por región, 2017 (toneladas)
Fuente: (Ministerio de Agricultura y Riego – Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA), 2017)

Región	Ave	Alpaca	LLama	Caprino	Ovino	Porcino	Vacuno	VACAS EN ORDEÑO
TOTAL NACIONAL	156 637 701	4 339 710	1 106 281	1 814 329	11 328 424	3 187 234	5 525 065	889 114
Tumbes	154 270	0	0	62 430	7 590	30 480	22 330	389
Piura	6 138 281	79	0	349 496	341 213	169 821	278 297	24 278
Lambayeque	1 868 821	0	0	91 548	68 810	68 810	113 514	18 913
La Libertad	25 241 243	7 891	0	98 187	396 486	113 018	237 501	43 942
Cajamarca	839 389	1 180	0	99 202	495 967	297 734	645 182	162 289
Cajamarca	344 734	1 180	0	66 334	343 654	89 450	262 247	97 808
Chota	201 487	0	0	20 460	103 320	104 660	276 310	99 949
Jaén	293 186	0	0	12 408	8 593	103 634	106 625	5 431
Amazonas	1 521 527	0	0	12 640	21 744	85 690	247 610	74 985
Ancash	2 640 326	10 329	0	169 610	872 175	170 334	305 720	13 463
Lima	58 064 430	46 625	21 904	167 335	308 462	490 253	243 891	76 070
Ica	14 767 142	0	0	78 925	29 996	54 124	90 124	11 507
Huánuco	1 783 595	6 890	3 530	102 170	529 453	405 230	282 412	32 349
Pasco	141 630	133 225	44 169	6 173	698 026	91 993	119 663	28 427
Junín	3 554 426	91 678	99 805	10 680	1 478 438	168 586	321 666	37 586
Huancavelica	392 876	262 713	127 731	171 966	620 737	174 439	174 439	12 803
Arequipa	19 046 582	421 292	87 181	20 736	187 138	95 391	205 693	75 027
Moquegua	60 333	145 310	38 640	8 347	49 611	13 480	23 870	5 297
Tarma	1 184 631	79 245	28 405	17 155	36 005	36 232	18 894	5 666
Ayacucho	843 901	209 143	85 162	204 583	511 215	106 587	431 096	29 964
Apurímac	307 629	215 030	72 980	109 650	455 479	134 847	296 290	32 433
Abancay	189 229	195 470	54 860	55 429	314 412	50 902	189 870	20 337
Andahuaylas	118 400	19 580	18 120	54 230	141 067	63 945	106 420	11 896
Cusco	1 192 249	674 929	142 964	37 966	1 422 140	160 173	423 941	79 622
Puno	1 727 193	2 056 210	394 830	0	2 950 650	112 320	721 050	99 130
San Martín	4 484 868	0	0	0	7 821	129 292	213 966	19 483
Loreto	4 158 978	0	0	360	12 800	85 320	46 870	1 283
Ucayali	6 058 039	0	0	0	10 129	49 530	45 490	3 920
Madre de Dios	485 976	0	0	0	9 559	13 730	56 420	1 352

Figura 3: Perú producción de carnes por región, 2017 (miles de unidades)
Fuente: (Ministerio de Agricultura y Riego – Sistema Integrado de Estadísticas Agrarias (SIEA), 2017)

Como problema se planteó: ¿Cómo es posible obtener un sistema de medición, visualización y registro que es capaz de procesar las señales físicas del proceso, ajustar parámetros e interpretar la información, a fin de que un sistema electrónico se oriente, específicamente, a la resistencia de huesos de aves orientado al sector avícola?

El objetivo general es diseñar e implementar un sistema electrónico que controle un actuador lineal de fuerza por medio del procesamiento de señales provenientes de sensores analógicos y digitales y a través de una interfaz de visualización permita la medición y determinación de la resistencia de huesos de pollo.

Los objetivos específicos son:

- a) Construir una estructura metálica que presente: los elementos de sujeción para un actuador lineal de fuerza y una base que resista la fuerzas a la que somete los huesos de pollo.
- b) Adecuar y acoplar señales de deformación de celdas de cargas en configuración de Puente Wheatstone utilizando un circuito integrado especializado.
- c) Adecuar y acoplar señales eléctricas digitales de sensores de proximidad inductivo al voltaje que maneja una entrada de microcontrolador.
- d) Implementar un algoritmo de PWM que permita variar la velocidad de un motor de corriente continua que se encuentra acoplado al actuador lineal de fuerza.
- e) Implementar una interfaz hombre máquina que registre y recupere datos de las pruebas de resistencia realizadas. Además, permita la visualización de medición de la resistencia a la que se somete el hueso a través de una gráfica y determine el punto máximo de resistencia.

Como justificación tecnológica, es necesario el desarrollo de un prototipo electrónico orientado a la estimación del nivel de resistencia ósea en pollos que cumpla con los requerimientos y necesidades específicas de forma eficiente y

concluyente, reduciendo el tiempo de operación, mano de obra y brindando datos que permitan graficar una curva de resistencia.

Como justificación económica, a nivel nacional, el sector con mayor participación económica es el sector avícola y la producción de pollos y huevos (SIEA, 2019). Esto se refleja en la figura 4, donde se observa los principales productos avícolas del mes de febrero del 2019.

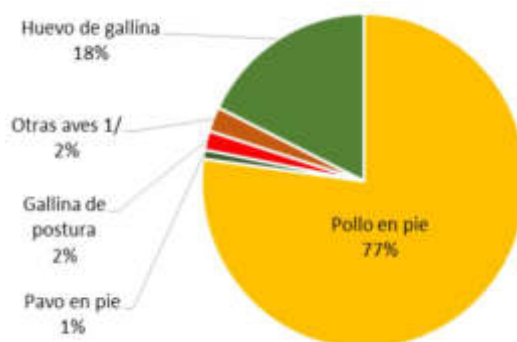


Figura 4: Datos estadísticos de producción avícola.
Fuente: Boletín estadístico mensual de la producción y comercialización avícola (SIEA), febrero 2019)

Como justificación social es contribuir a la investigación de la estimación de una variable de resistencia ósea en pollos con diferentes niveles de alimentación mineral.

La viabilidad económica a diferencia de otros sistemas de alto costo, el prototipo se ha diseñado con materiales incluyendo la estructura física en la que se ubica el sistema de bajo costo lo cual genera que el precio final del mismo sea más accesible para empresas mypes de producción de pollos.

En la viabilidad social, el sistema electrónico, las prueba y ensayo sobre distintas muestras durante un mayor rango de tiempo sin perjudicar la salud física del cliente o personas que vayan a operar el sistema ya que el mencionado producto no depende del esfuerzo físico humano, dejando a decisión del operador el inicio y finalización del proceso de estimación.

Como vía operativa, el sistema fue de mucha utilidad para industrias que se dedican a la fabricación de alimentos para aves, ya que ellos buscan mejorar su producto alimenticio para ofrecerlos al mercado avícola.

La tesis comprende cinco (5) capítulos, El primero trata sobre el marco teórico donde se evidencia una compilación de resultados de otras investigaciones que dan soporte a la tesis. El segundo aborda el modelamiento, en el que se comparan los diversos componentes existentes en el mercado, en el que se analizaron y validaron los componentes, a fin de obtener un resultado experimental sólido. En el tercero, se validó teóricamente cada etapa del diseño propuesto al inicio de la investigación. Además, se realizaron cálculos matemáticos por cada etapa. En el cuarto, se analizaron los resultados teóricos y experimentales, así como los alcances, limitaciones y sus restricciones. Y en el quinto capítulo, se explican sobre las pruebas con huesos de pollos, donados por el laboratorio de zootecnia de la Universidad Agraria La Molina. Los valores obtenidos fueron comparados con los datos de los ensayos realizados en el laboratorio de zootecnia, y así se obtuvo los resultados.

CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO

1.1 Estado del arte

Monroy J., M., Díaz A, A. & Fabio A., H. **INSTRUMENTACIÓN DEL EQUIPO DE LABORATORIO DE RESISTENCIA DE MATERIALES PARA ENSAYOS DINÁMICOS A FLEXIÓN DE PROBETAS RANURADAS.**

En esta investigación, los autores describen el proceso de implementación de un instrumento de ensayo el cual cuenta con dispositivos para la medición, acondicionamiento de señal, adquisición de datos y el uso de un software para la manipulación y visualización de la información obtenida.

Se menciona que en el laboratorio de resistencia de materiales de la Universidad Tecnológica de Pereira se encuentra un equipo de ensayo a flexión denominado **ensayo Charpy**, pero este no cuenta con una resolución de buen nivel, por lo cual con el fin de elevar y mejorar las capacidades de este se realizó la adaptación de dispositivos electrónicos de medición (Figura N° 5).

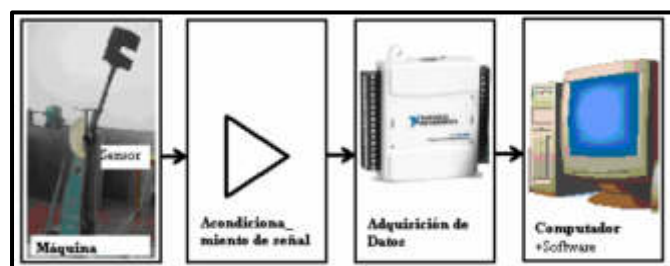


Figura 5 Sistema de Instrumentación
Fuente: Scientia Et Technica, vol. XV, núm. 41, mayo, 2009

Uno de los procesos que realizan al inicio es el del acondicionamiento de la señal y el uso del sensor el cual se refiere a un potenciómetro lineal multivuelta (R1) que está mecánicamente acoplado al péndulo de la máquina. Como método

de precaución se consideró que en el péndulo el potenciómetro R1 no debe llegar a los extremos.

Como consecuencia de lo anterior, se utilizó un trimmer R2 para ajustar el valor de tensión.

Para la tensión de funcionamiento de la tarjeta de adquisición de datos, se consigue con una señal diferencial de tensión tipo puente Wheatstone. Esta señal se ingresa al amplificador AD620 para amplificar de 0V a 5V.

La ganancia del amplificador con el que el instrumento contó se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{49400}{R3 + R4} \quad (1)$$

Donde:

R3 + R4 son la resistencia combinada de ajuste

Vin es la tensión de la señal de entrada

Vout es la tensión de la señal de salida

Para la elaboración de la etapa de software, se usó el LabView(TM), el cual forma parte de la interacción entre la tarjeta de adquisición de datos, se realizan cálculos y muestran los resultados (Figura N° 6).

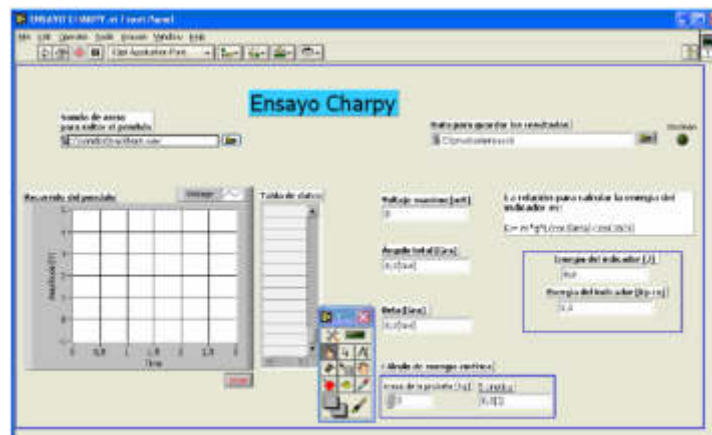


Figura 6 Panel frontal del programa.
Fuente: Scientia Et Technica, vol. XV, núm. 41, mayo, 2009

Forero, J. A., Henao, F. A. & Moncada, D. M. *Laboratorio de simulación y ensayos para resistencia de materiales.*

A medida que transcurrió el tiempo, los avances tecnológicos, en países desarrollados y en vías de desarrollo, los estudios sobre las deformaciones en ingeniería han sido fundamentales para el diseño de estructuras, mecanismos y máquinas; para tal fin el deformímetro eléctrico y la galga extensométrica son elementos frecuentemente utilizados.

Se plantearon dos tipos de pruebas, la estación de trabajo a flexión y el banco para pruebas a tensión, en los cuales se utilizaron galgas extensiométricas, de igual manera, se implementó una tarjeta de adquisición de datos para realizar la interacción entre la estación de trabajo y la interfaz para el usuario y la PC.

La parte de software fue desarrollada en la plataforma Lab VIEW® la cual cuenta con indicadores en los que se visualiza la deformación unitaria en tiempo real, la curva esfuerzo deformación y generar y guardar datos la cual exporta un archivo Microsoft Office Excel®, el siguiente diagrama de bloques muestra la programación de esta (Figura N° 7).

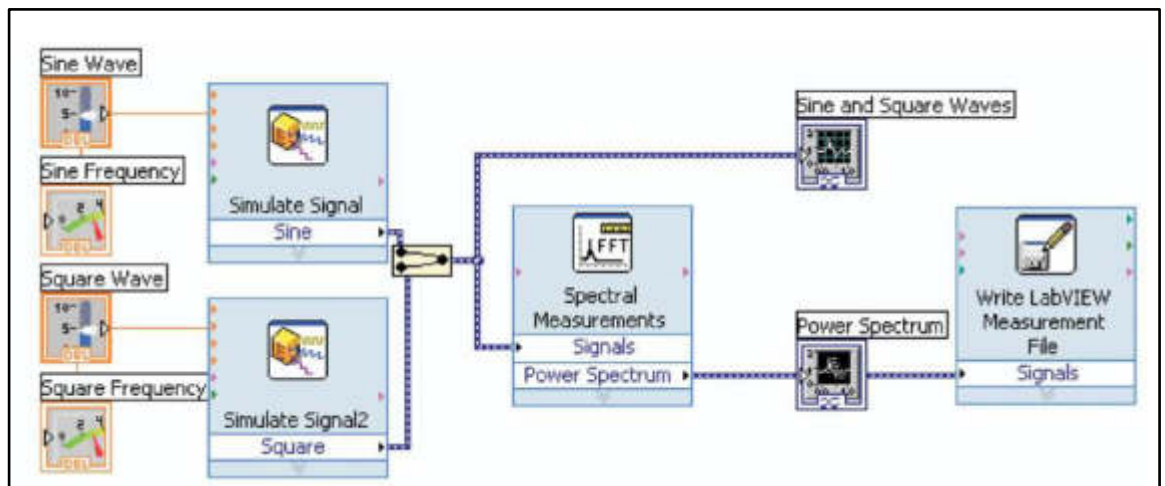


Figura 7: Algoritmo de Programación
Fuente: Simulación y ensayo para resistencia de materiales

MANARVI, IRFAN. An investigation of human and animal bones to predict the probable location of fractures.

En la siguiente publicación, se detallan los ensayos de estrés a los que fueron sometidos diferentes huesos, tanto humanos como de animales domésticos. Estos ensayos se realizaron con la finalidad de predecir las fracturas y deterioro de huesos. En el caso de animales domésticos, son originados por maniobras inapropiadas por exigencia de sus dueños, mientras tanto las fracturas en las personas pueden ser ocasionadas por accidentes, ejercicio físico que pueden llegar a ser extenuantes. Las fracturas de tibia son comunes en las personas, por ello son casos de constante estudio.

En la publicación, se hace mención del uso de equipos de prueba experimental en paralelo con algunas técnicas y herramientas modernas, como el análisis de elementos finitos (FEA), en donde es necesario utilizar un escáner 3D para la creación de modelos informáticos como se observa en la figura 8. La finalidad de la investigación es comparar los resultados obtenidos de los diferentes ensayos y pruebas realizadas. Se tuvo como objeto de estudio tibia y húmero humano debido a sus propiedades de dureza y de su deformación al aplicar pruebas de compresión; para el caso de animales, se utilizó tibia de pollo.

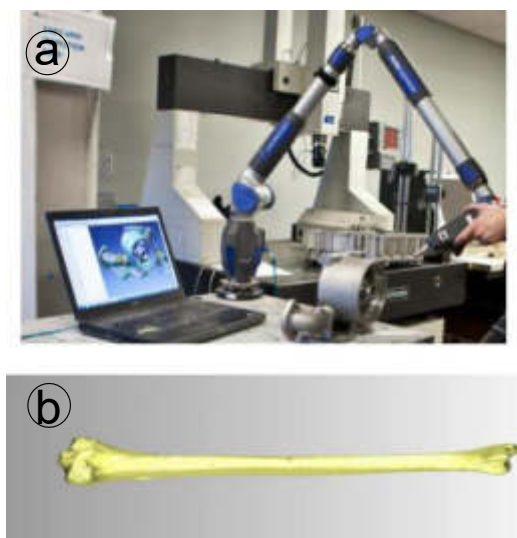


Figura 8: a) Escaner 3D, b) Fémur humano en 3D.
Fuente: IEEEExplore.ieee.org

Para los ensayos, se utilizó un medidor de dureza portátil Leeb, el que se basa en el método de rebote dinámico a través de sondas generadas; el equipo Brinnel fue otra herramienta usada y se basa en ensayos de compresión para determinar la dureza ósea. Estas herramientas se muestran en la figura 9.

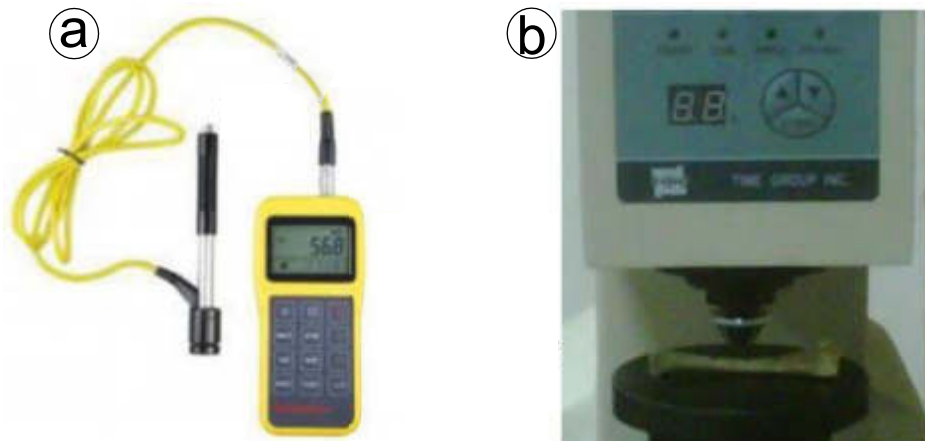


Figura 9: a) Leeb portátil, b) Brinnel.
Fuente: IEEEExplore.ieee.org

Para los ensayos, se utilizó el Brinnel en tibias humanas y de pollo como se observa en las figuras 10 y 11.



Figura 10: Prueba de compresión en tibia humana.
Fuente: IEEEExplore.ieee.org



Figura 11: a) Prueba de compresión en tibia de pollo
b) Resultado del ensayo.
Fuente: IEEEExplore.ieee.org

Los datos obtenidos del equipo Brinnel se encuentran en unidades de HBS, debido a que utiliza una bola de acero para realizar los ensayos de dureza; estos datos obtenidos de las pruebas realizadas se muestran en la tabla 1, donde se deduce que el hueso con mayor resistencia es la tibia humana, seguida de la tibia de pollo y húmero humano.

Tabla 1: Resultado de pruebas

N°	Tibia de pollo (HBS)	Humero humano (HBS)	Tibia humana (HBS)
1	330	195	379
2	347	202	361
3	320	196	343
4	288	198	325
5	320	203	307
6	300	204	310
7	278	196	351
8	308	197	370
9	356	200	312
10	313	200	365
Promedio	316	199.1	342.3

Fuente: IEEExplore.ieee.org

Para el análisis de elementos finitos (FEA), se utilizó el software ANSYS 14.0 el cual soporta archivos en formato SAT. Sin embargo, la tibia escaneada en 3D no se encuentra en dicho formato, por ese motivo se utilizan los softwares Geomagic Qualify 12 y Pro E 5. El software ANSYS 14.0 genera una malla triangular con 154691 nodos y 104962 elementos como se observa en la figura 12.

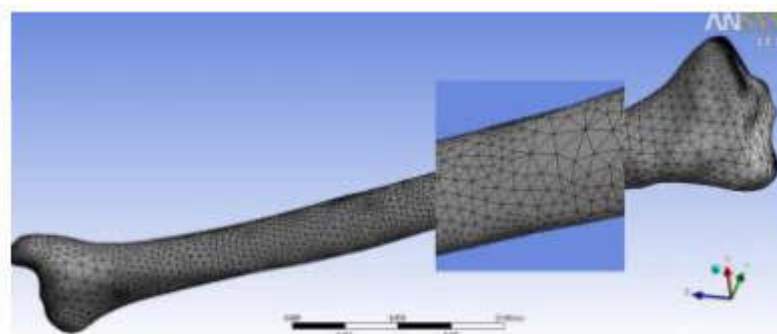


Figura 12: Modelado de tibia humana utilizando FEA.
Fuente: IEEExplore.ieee.org

Al final de ambos experimentos, los resultados se muestran en la tabla 2, donde se concluyó que los valores obtenidos en ambos ensayos son similares, validando que los ensayos aplicando FEA son tan precisos como los ensayos de experimentales.

Tabla 2: Resultado comparación experimentaste y FEA.

Test	Carga KN	Esfuerzo máximo (Pa)	Deformación máxima (mm)	Esfuerzo mínimo (Pa)	Mínima deformación (mm)
Exp.	490	1.24E9	0.016	0.127	0
FEA	490	1.67E9	0.012	0.189	0

Fuente: IEEEExplore.ieee.org

ACHDJIAN H. Y HASAN A. EFFECT OF BONE DENSITY ON THE MECHANICAL COMPRESSION PROPERTIES OF BOVINE TRABECULAR BONE.

Esta publicación menciona los métodos tecnológicos que han permitido la reconstrucción digital del hueso, mediante técnicas de imágenes que se podrían utilizarse para el estudio de la osteoporosis con el fin de evaluar su gravedad.

Se utilizaron muestras óseas trabecular bovina para pruebas mecánicas de compresión uniaxial para establecer una correlación entre el efecto de la densidad ósea sobre la compresión. Tomaron 15 muestras cubicas de promedio 11.04 mm con una desviación estándar de 0.15 mm de 4 diferentes cabezas femorales de un novillo de 18 meses como se observa en la figura 13.

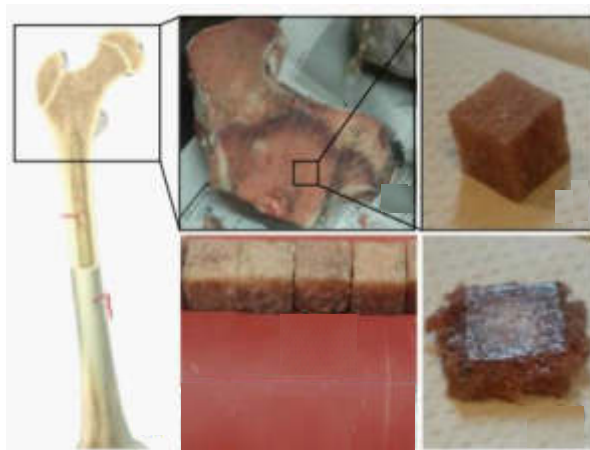


Figura 13: Modelado de tibia humana utilizando FEA.

Fuente: IEEEExplore.ieee.org

Las muestras óseas cúbicas son sometidas, individualmente, a pruebas de compresión utilizando una máquina de prueba universal (UTM), el cual contaba con una celda de carga de 10 KN que era la encargada de censar y obtener los datos para generar las curvas de tensión – deformación y esfuerzo-tensión, ver figura 14, a una velocidad de esfuerzo constante de 5 mm / min.

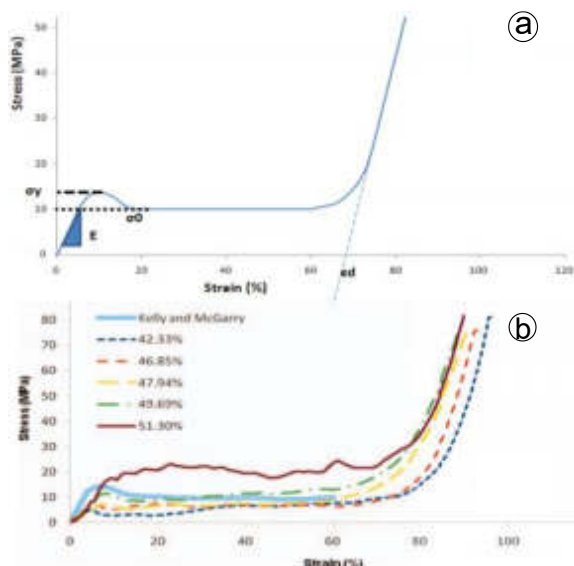


Figura 14: (a) Curva de tensión-deformación
(b) Curvas de esfuerzo-tensión.
Fuente: IEEEExplore.ieee.org

La finalidad del trabajo de investigación fue comprender la correlación entre la densidad y la compresión mecánica, obteniendo como resultado que los huesos más densos son mucho más resistentes a la compresión que los huesos porosos. Por lo tanto, con la información obtenida se puede utilizar para predecir la gravedad de la osteoporosis y los niveles de estrés que el paciente puede soportar.

HARADA A., SAKAI R., MIYASAKA K., SUZUKI H., OHTSUKA T., YOSHIKAWA Y., MATSUYAMA J., OHNISHI I. Y NAKAMURA K. A New Method for Measure Bone Strength Using Echo-Tacking.

Esta publicación explica el uso del método de exposición no invasiva para determinar la resistencia ósea y prevenir fracturas, debido a ello se realizó diversas pruebas utilizando pruebas de ultrasonido para determinar la resistencia

ósea y fue comparada con los ensayos de compresión, el cual es considerado como un método fiable para la medición de resistencia ósea.

Recientemente el ultrasonido cuantitativo (QUS) fue objeto de estudio para evaluar el estado óseo mediante la medición de la velocidad del sonido (SOS) y atenuación (BUA). Las pruebas realizadas arrojaron como resultado que los valores de SOS y BUA están estrechamente correlacionados con la densidad mineral ósea, estos resultados fueron medidos por un absorciómetro dual de rayos X (DXA).

Para llevar a cabo la investigación, se utilizó una máquina de ultrasonido SSD-1000 a 7,5 MHz de matriz lineal, un ordenador personal Optiplex GX270 equipada con una tarjeta A/D analógica CS1450.

A continuación, en la figura 15, se muestra el diagrama de bloques aplicando el ultrasonido, donde se utilizó una señal RF con una frecuencia de muestreo de 50MHz con una resolución de 14 bits. Las señales de RF grabados fueron interpolados a ocho veces la frecuencia de muestreo para permitir la detección de cambio de fase a una frecuencia de muestreo equivalente de 400 MHz.

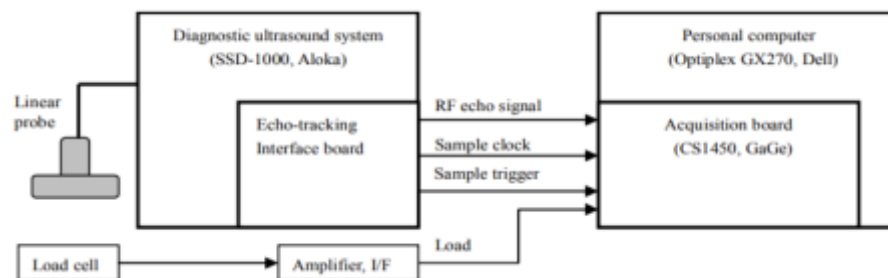


Figura 15: Diagrama de bloques del sistema para la medición de deformación ósea.

Fuente: IEEExplore.ieee.org

Para el uso correcto y preciso del haz de ultrasonido, se hicieron pruebas desplazando una placa de aluminio en forma vertical, sumergiéndola en una fuente llena de agua, la cual se mantuvo a una temperatura constante de 24 °C. Para el desplazamiento en forma vertical, se utilizó un motor paso a paso PK566-A a una velocidad de 500 µm/s, el desplazamiento se midió simultáneamente por

un potenciómetro lineal AT104 con una precisión 1.0 μm ; En la figura 16, se observa el diagrama de bloques usado para la calibración de ultrasonido.

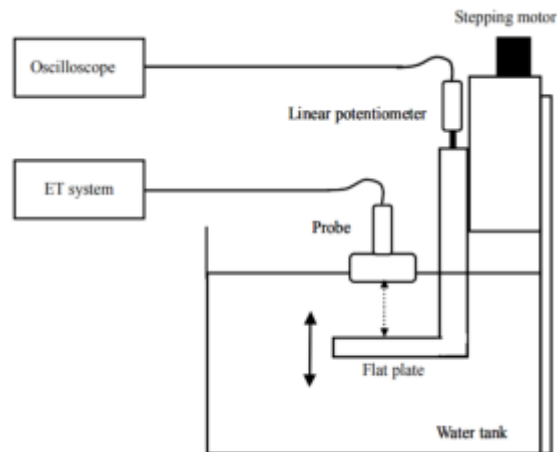


Figura 16: Configuración experimental para las mediciones de precisión de desplazamiento

Fuente: IEEEExplore.ieee.org

Ya calibrado el sistema de ultrasonido se procedió a validar la curva de deformación, para ello se colocarán cinco puntos a lo largo del eje lateral de la sonda a una distancia de 10 mm y cada punto se midió simultáneamente con una frecuencia de 500 Hz.

En la figura 17, se observan las señales de ECO RF de cada punto y además en el panel se muestra la curva de deformación, la cual será cuantificada utilizando la siguiente fórmula. La curva de deformación se interpoló para cada punto.

$$ETS = D/L \quad (2)$$

Donde:

L: distancia desde el primer punto de seguimiento a la última.

D: distancia máxima de la curva de ajuste.

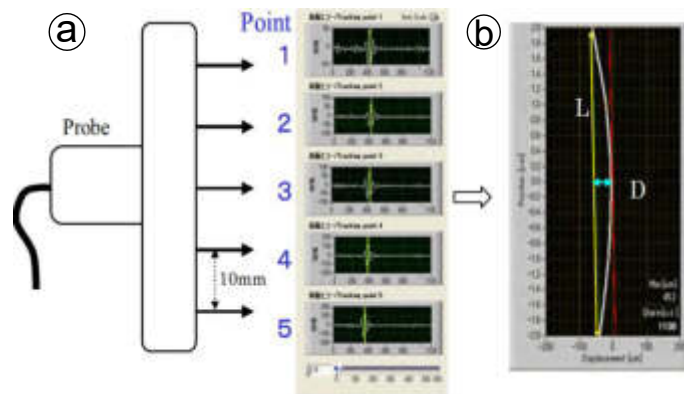


Figura 17: (a) Curva de tensión-deformación
 (b) Curvas de esfuerzo-tensión.
 Fuente: IEEExplore.ieee.org

Para el inicio de las pruebas, se utilizó una tibia de porcino, ver figura 18, medidores de tensión y el sistema de ultrasonido que fue previamente calibrado. La tibia fue colocada en el medidor de tensión y en paralelo, se establecieron 5 puntos del sistema de ultrasonido a lo largo del eje de la tibia a 20 mm de distancia, entre ellos.



Figura 18: Prueba de flexión de tres puntos utilizando una tibia porcina.
 Fuente: IEEExplore.ieee.org

La fuerza aplicada a la tibia se fue incrementando de 100 N a 1500 N a una velocidad de 25 N/s. La tasa de muestreo de los datos para el sistema de ultrasonido y de deformación fue de 100 Hz. Los resultados mostraron una relación lineal con el aumento de carga, las gráficas se muestran en la figura 19.

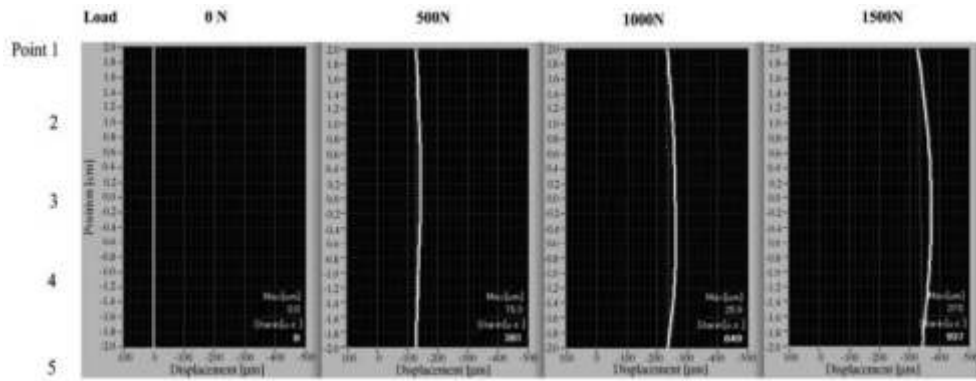


Figura 19: Resultado del desplazamiento.
Fuente: IEEExplore.ieee.org

En conclusión, el método indirecto de ultrasonido mide en promedio el desplazamiento óseo 40 mm, los valores de tensión obtenidos de ambos métodos están correlacionados en $R=0.998$, como se observa en la figura 20.

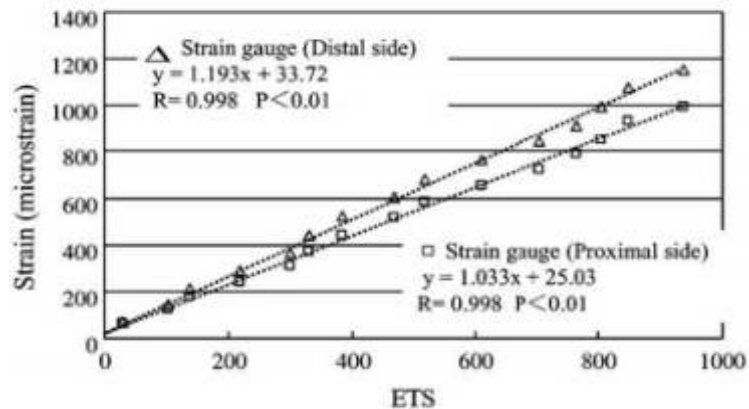


Figura 20: Gráfica de lectura detención y sistema de ultrasonido utilizando tibia porcina.
Fuente: IEEExplore.ieee.org

HAVITCIOGLU A., CECEN B., BAKTIROGLU C., EDURAN D. Y KARAKASLI E. *The Biomechanical Properties of the Menisco.*

La siguiente publicación hace referencia a la importancia de los meniscos al soportar la carga y absorber impactos tanto en las articulaciones como en las rodillas. Además, indican lo limitado que se encuentra el estudio de las propiedades biomecánicas del menisco, debido a eso realizaron ensayos biomecánicos de tracción y compresión utilizando meniscos de pacientes que se sometieron a cirugía de rodilla.

Para realizar el ensayo, se utilizó el dispositivo de tracción y compresión AG-I, con una carga de 10kN a una velocidad de 5 mm/min y fueron evaluados estadísticamente con la correlación de rango de SPEARMAN. En la tabla 3, se muestran los datos obtenidos de los ensayos, donde se deduce que hubo una correlación significativa en las pruebas de compresión $p=0037$.

Tabla 3: Valores de desplazamiento de fuerza en experimentos de compresión.

Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
4494,06	9,83
4498,75	7,21
4501,20	3,99
4495,94	8,43
4497,34	6,67

Fuente: IEEExplore.ieee.org

Mientras que los resultados para las pruebas de tracción se obtuvo valores significativos de $p = 0.045$, como se observa en la tabla 4.

Tabla 4: Valores de desplazamiento de fuerza en experimentos de compresión.

Fuerza (N)	Desplazamiento (mm)
17,50	6,60
24,06	6,04
21,40	5,09
55,93	16,60
105,05	14,37
29,21	11,10
22,18	3,87
29,21	4,08
46,56	9,34

Fuente: IEEExplore.ieee.org

Estos resultados obtenidos ayudaron a determinar las propiedades biomecánicas del menisco, los cuales servirán en el futuro de base para estudios artificiales de meniscos.

THOMAS N. (2007). *Image-Based Strength Assessment of Bone.*

La siguiente publicación hace referencia a la limitación que representa realizar ensayos mecánicos con huesos por ser un método invasivo y la simulación por computadora a través del análisis de elementos finitos, el cual tiene el potencial de proporcionar estimaciones razonables si se cumplen ciertos parámetros que deben ser estimados, además, sin contar toda la carga computacional necesaria para ejecutar las simulaciones.

Es por ello, que los investigadores proponen un método más simple, el cual consiste en determinar la resistencia ósea a través de imágenes, encontrando como sustituto la atenuación de los rayos X. Es decir, se desarrollaron enfoques más sofisticados para crear modelos básicos de deformación para obtener los parámetros de deformación.

Para ello se consideraron modelos básicos de deformación como: Módulos elásticos y de cizalla (figura 21), doblado y torsión (figura 22) y por último el momento de inercia y resistencia (figura 23).

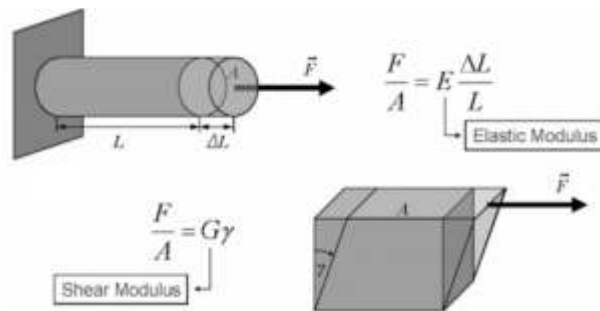


Figura 21: Módulos de elasticidad.
Fuente: IEEExplore.ieee.org

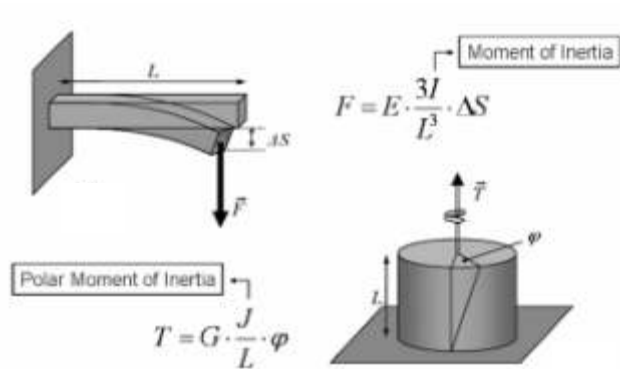


Figura 22: Momento doblado y torsión.

Fuente: IEEEExplore.ieee.org

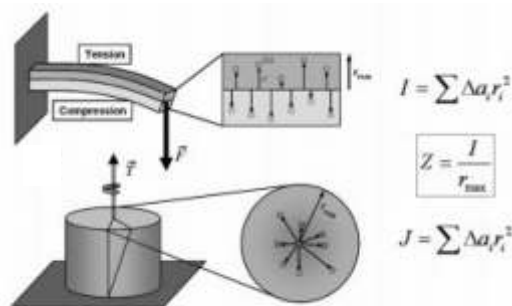


Figura 23: Momento de inercia y resistencia.

Fuente: IEEEExplore.ieee.org

A continuación, se hace mención del medio que fue utilizado para el análisis de imágenes como: Tomografía computarizada cuantitativa, el cual tiene mayor potencial para una simulación mecánica precisa. Mientras que la tomografía micro computarizada contiene una alta resolución de imágenes que suele asociarse con un tiempo de medición. Y por último, la absorciometría de rayos X de energía dual, el cual es un método de imagen bidimensional que refleja la densidad de la superficie medida en cada punto de la imagen.

Los investigadores llegaron a la conclusión de que determinar la resistencia ósea a través de imágenes tridimensionales o bidimensionales, puede llegar a tener un alto potencial de proporcionar información considerablemente reformada sobre la resistencia del hueso, aunque es probable que el análisis de elementos finitos proporcione la información más precisa sobre la resistencia ósea.

Duran P. A., Nieto R. L., Correa B. M. & A. S. *Evaluación mecánica del material de osteosíntesis bioabsorbible para cirugía de mano.*

La siguiente publicación fue obtenida de la Revista Colombiana de Cirugía Plástica y Reconstructiva en donde realizan una comparación entre implantes bioabsorbibles e implantes metálicos (titanio), usualmente usados en fracturas metacarpianos y de falanges.

Esta investigación nace a raíz de las complicaciones que existe al usar implantes metálicos, entre ellas las más comunes son: rigidez, osteopenia, dolor e infección ósea causado por el ingreso de microorganismos, además de interferir con el seguimiento radiológico de los pacientes.

Una alternativa a los implantes metálicos fueron los implantes bioabsorbibles, los cuales son metabolizados y eliminados por el cuerpo. En la figura 24, se observan implantes de materiales bioabsorbibles, los cuales en la actualidad se utiliza estos implantes de forma rutinaria en cirugías.



Figura 24: Ejemplos de placas (arriba), clavos (Derecha) y tornillos (Izquierda) de material bioabsorbible.

Fuente: Revista Colombiana de Cirugía Plástica y Reconstructiva

Para realizar la comparación de ambos implantes, se utilizaron tibias de gallinas, las cuales fueron preparadas con materiales copolímeros 50/50 PDLLA y 85/15 PLLA-PGA como se observa en la figura 25.



Figura 25: Tibias de gallinas preparadas con materiales copolímeros.
Fuente: Revista Colombiana de Cirugía Plástica y Reconstructiva.

Una vez preparado las tibias se procede a fijarlos en una máquina universal de ensayos y sometidos a diferentes fuerzas deformantes hasta llegar al punto de ruptura, los datos son registrados en una hoja de cálculo de EXCEL y por medio del software STATA se realiza el procesamiento para el estudio estadístico. En la figura 26, se muestra un diagrama del sistema universal utilizado para los ensayos de compresión.

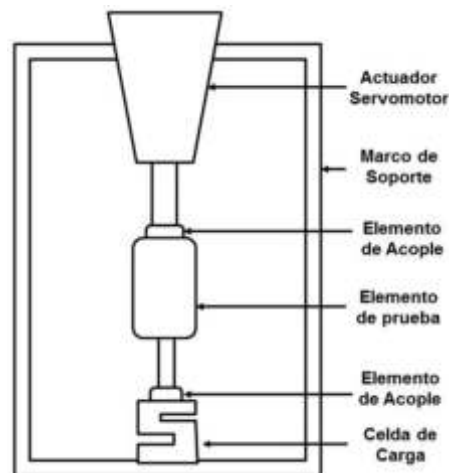


Figura 26: Diagrama del sistema de compresión.
Fuente: Revista Colombiana de Cirugía Plástica y Reconstructiva.

Los resultados estadísticos mostrados, en la tabla 5 de los ensayos de compresión, no fueron estadísticamente significativos, debido a que ambos implantes ofrecen una resistencia similar a la compresión representada por una variable cuantitativa continua ($p: 0.7$).

Tabla 5: Valores de ensayos experimentales.

Fuerza de compresión	Resistencia máxima	Falla	Valor P
Material bioabsorbible	250.5 +/- 10.57	290.8 +/- 8	0.7
Material metálico	205.5 +/- 7.57	307 +/- 2	

Fuente: IEEEExplore.ieee.org

Dados los resultados, es posible aplicar los implantes bio-absorbibles en las prácticas clínicas y así evaluar las ventajas y desventajas demostrando las ventajas reales en la tasa de complicaciones y los resultados funcionales de los pacientes.

Pestana, L. M., Calado, M. R. A. & Mariano, S. *Experimental force characterization of linear switched reluctance machine.*

En la siguiente publicación, los autores presentan un proceso semiautomático de recopilación de datos que se utiliza en la Caracterización de la Fuerza de un Actuador de Reluctancia Conmutada Lineal (LSRA) de tipo trifásico 6/4. Para la adquisición del sistema, es necesaria una celda de carga de bajo costo, un convertidor analógico digital de 24 bits y un módulo HX711 de acondicionamiento de señales, un codificador y sensores de corriente de efecto Hall y un microcontrolador TMS320f28335, el cual envía información a una computadora que ejecuta el software MATLAB-SIMULINK para su procesamiento y análisis.

Para la conversión analógica-digital A / D, los autores seleccionaron el módulo de precisión HX711 debido a su fuente de alimentación regulada integrada y el oscilador de reloj en chip. Entre las ventajas de este chip, tenemos su alta integración, velocidad de respuesta rápida, datos sin interferencias robustos.

Este conversor analógica-digital A / D de precisión de 24 bits y módulo de acondicionamiento de señal está diseñado específicamente para escalas de peso y aplicaciones de control industrial para interactuar directamente con un sensor de puente Wheatstone para minimizar los errores de adquisición, las señales de

salida del sensor generalmente se amplifican antes del procesamiento debido a su rango muy pequeño y para aumentar la relación señal / ruido.

Las celdas de carga usan un puente de Wheatstone de cuatro cables para conectarse al HX711. El módulo amplifica la señal analógica del sensor original y realiza la conversión a una resolución digital de 24 bits, lo que permite una precisión de medición superior.

El valor medido se transmite al microcontrolador mediante una interfaz en serie de 2 hilos, lo que permite que se puedan conectar 2 sensores al mismo tiempo utilizando solo un módulo HX711.

El microcontrolador junto con el código de dominio público con respecto al uso del módulo HX711 para recopilar información sobre el peso dictó su uso para transmitir la información de fuerza del módulo al microcontrolador DSP TMS320f28335.

Yang G. Y., Garrett J., Tang W. C. & Keyak J. H. (2007). *Parylene-Based Strain Sensors for Bone*.

Este artículo presenta un nuevo material para la fabricación de galgas extensiométricas que proporcionan datos de esfuerzo mecánico de alta resolución de una superficie ósea en tiempo real. El diseño fue validado utilizando elementos finitos a través del programa ANSYS.

Los sensores fueron fabricados con material Parylene-Cde y adaptados en tibias de pollos como se observa en la figura 27, para las pruebas utilizaron una máquina INSTRON MODELO 3367. Debido a que las superficies óseas son irregulares, la distribución de tensión fueron diferentes a medida que fueron variando las posiciones.

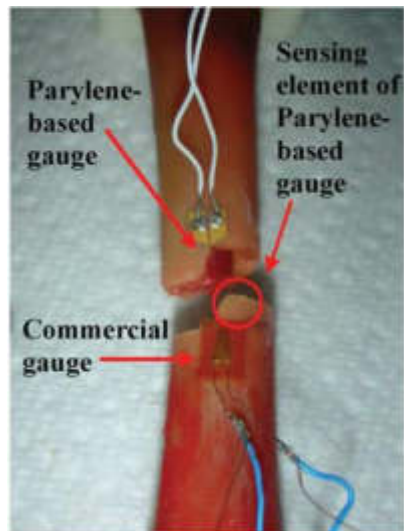


Figura 27: Ensayo con tibia de pollo
Fuente: ieee.org/

Al finalizar las pruebas, los autores notaron que cada medidor mostró una mayor sensibilidad a la deformación, proporcionando así una mejor resolución. Además, los medidores se adaptaron correctamente a la deformación de la superficie ósea.

ULRICH N. & MOKWA W. Strain Gauge foil for the Measurement of Elastic Deformations in Orthopedic Milling Tools.

La siguiente publicación hace referencia a la integración de galgas extensiométricas en instrumentos quirúrgicos para medir la deformación elástica en dos direcciones. Para ello, los autores utilizaron cuatro medidores de tensión en dos configuraciones de medio puente de Wheatstone. Esto debido al riesgo que existe en las extracciones de material cementado en prótesis de caderas; dicho material debe eliminarse por completo con una herramienta de fresado especial.

Los medidores de tensión fueron diseñados para ser acoplados en las herramientas de fresado mediante adhesivos, como se observa en la figura 28.



Figura 28: Herramienta de fresado
Fuente: ieee.org/

Por otro lado, para que el sistema recopile los datos al momento de realizar las pruebas, los medidores fueron conectados a un circuito electrónico basado en un microcontrolador y de esta manera, corregir la posición al momento de que se ejecute la extracción del material cementado.

Todos los instrumentos de medición fueron controlados por un programa Labview, el cual automatiza el proceso de medición y garantiza que la tensión del puente.

De esta publicación se puede resaltar la configuración de las galgas en puente Wheatstone para realizar pruebas al momento de la extracción de la cementación en prótesis de caderas.

YOUSIF A.E. Y AZIZ M. Y. *Biomechanical Analysis of the Human Femur Bone During Normal Walking and Standing Up.*

En esta publicación, se menciona la investigación sobre el comportamiento del fémur humano durante las actividades diarias. Esta investigación se realizó haciendo uso del análisis de elementos finitos (FEA) en donde realizaron el modelamiento del fémur para entender su comportamiento mecánico, mediante la aplicación de las leyes y concepto de la física.

Para el modelado, los autores utilizaron un fémur de una persona sana de 45 años de edad cuyo peso era de 75 Kg. El fémur fue reconstruido a partir de imágenes de CT (DICOM) e importado a ANSYS Workbench V12.1 donde se generaron una malla con 17148 nodos como se observa en la figura 29.

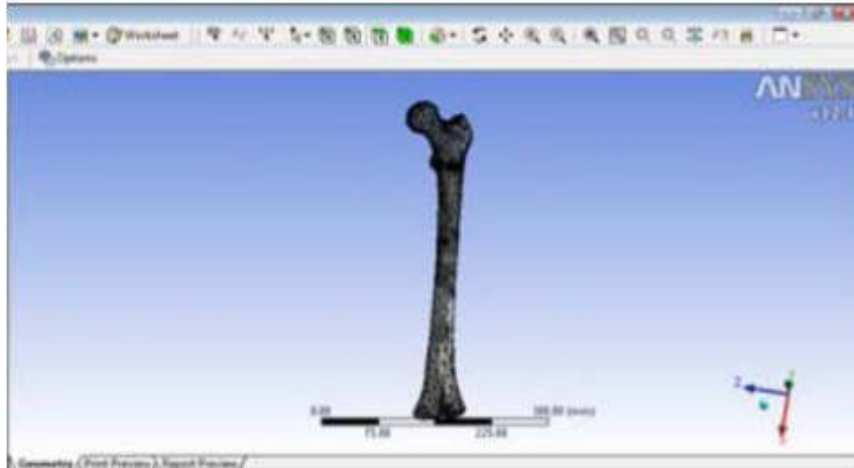


Figura 29: Modelamiento de elementos finitos
Fuente: ieee.org/

Para el modelado de tensión, en el fémur, se consideraron algunos parámetros importantes y necesarios para el análisis de las propiedades del material óseo; uno de estos parámetros a considerar fue la densidad, según la relación matemática que correlaciona la unidad HU (Unidad Hounsfield); otro parámetro considerado fue el módulo de elasticidad pero debido al comportamiento anisotrópico del hueso, los investigadores asumieron un comportamiento ortotrópico y homogéneo del fémur con valores de acuerdo con la relación empírica que correlacionan la densidad del hueso con el módulo de elasticidad. En la tabla 6 se muestran los parámetros para el hueso trabecular y cortical que se utilizaron para asignar las propiedades del material óseo.

Tabla 6: Parámetros de asignación de propiedades del material.

PARÁMETROS	HUESO CORTICAL	HUESO TRABECULAR
Unidad de Hounsfield (HU)	2200	800
Densidad (g / cm ³)	2.0208	1.3712
Módulo de Elasticidad (MPa)	E1 = 6982.9	E1 = 2029.4
	E2 = 6982.9	E2 = 2029.4
	E3 = 18155	E3 = 3195.3
El coeficiente de Poisson	V12 = 0.4	V12 = 0.4
	V23 = 0.25	V23 = 0.25
	V31 = 0.25	V31 = 0.25
Módulo de Corte (GPa)	G12 = 4.69	G12 = 4.69
	G23 = 5.61	G23 = 5.61
	G31 = 7.68	G31 = 7.68

Fuente: ieee.org/

Los valores obtenidos del ensayo son útiles para pruebas de fuerza, fijación y fricción en implantes, para optimizar su diseño y materiales; además la información obtenida es importante para las cirugías de fémur y prótesis. En la figura 30 se observa la distribución de la tensión al ser modelado utilizando análisis de elementos finitos.

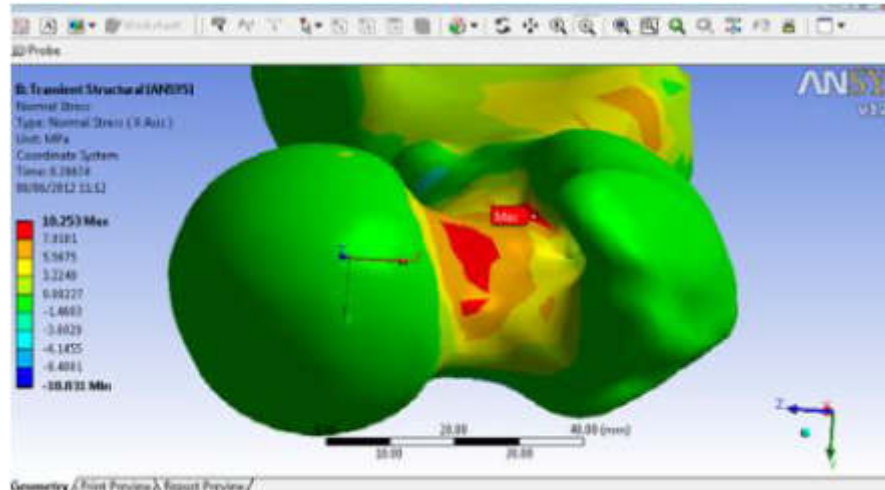


Figura 30: Modelamiento de elementos finitos
Fuente: ieee.org/

Al finalizar la investigación, los autores llegaron a la conclusión estimar el esfuerzo puede llegar ayudar en el proceso de diseño y ayudar en la fabricación de una mejor prótesis e implantes más duraderos. Además, resaltan que los parámetros pueden llegar a variar dentro de las actividades diarias en relación con la otra.

NICHOLSON P. H. F. Ultrasound and the Biomechanical Competence of Bone.

En la siguiente investigación, se hacen referencias del potencial del ultrasonido para caracterizar las propiedades mecánicas del hueso, además en este artículo hacen referencia de los logros y deficiencias del ultrasonido como una herramienta para determinar las propiedades mecánicas del hueso. Asimismo, mencionan que los tejidos óseos entre el hueso cortical y trabecular son similares pero las propiedades mecánicas son diferentes, dado que el nivel de porosidad en ambos es distinto.

Los autores de la publicación mencionan los pocos estudios que han intentado comparar los ensayos mecánicos para el hueso cortical con ultrasonido; sin embargo, en un estudio las mediciones de velocidad ultrasónica con un dispositivo clínico se correlacionaron bien con las propiedades mecánicas del hueso cortical tibial, produciendo $r^2 = 0,84$ y $0,75$ para el módulo elástico y la resistencia final, respectivamente.

Por otro lado, muchos estudios evaluaron la correlación entre las mediciones de ultrasonido con las propiedades mecánicas del hueso trabecular donde se observó correlaciones tanto con el módulo elástico como con la resistencia final, con valores de r^2 de típicamente $0.5-0.9$, donde la velocidad de ultrasonido y atenuación ultrasónica de banda ancha en general tienen una capacidad predictiva similar para las propiedades mecánicas, además se presenta una correlación más fuerte entre la velocidad del sonido y la fortaleza de los huesos trabeculares.

ROBERTO C. GÜERRI FERNÁNDEZ Y ADOLFO DÍEZ PÉREZ. LA MEDICIÓN DIRECTA DE LA RESISTENCIA MECÁNICA ÓSEA.

La siguiente publicación fue extraída de la revista de reumatología clínica donde mencionan que la medición de la resistencia se realiza con la densitometría; sin embargo, gran parte de la información obtenida no se explica en las pruebas que se realizan con la densitometría.

Por ello se ha desarrollado la búsqueda de marcadores de calidad ósea que complementen a la densitometría para caracterizar mejor la resistencia, pero sin recurrir a prácticas de biopsia ósea o el uso de explantes óseos obtenidos durante la cirugía.

Solo algunas técnicas de imágenes han logrado analizar la resistencia ósea, la técnica más desarrollada es el análisis de elementos finitos ya que proporciona información sobre los cambios en la arquitectura, macroscópica y microscópica, además permite calcular la resistencia teórica a la fractura. No obstante, los algoritmos empleados generan errores mínimos sobre las

propiedades óseas, pero que no puede diferenciar tejidos con una mecánica diferente.

Los ensayos que más progresaron fueron el análisis directo de la resistencia mecánica ósea medida en la tibia, esta técnica se basa en la microindentación, la cual permite estimar directamente la resistencia a la fractura midiendo la distancia de penetración; en otras palabras, el análisis mecánico produce fracturas microscópicas, además es capaz de calibrar de forma precisa para producirlas.

1.2 Bases teóricas

A continuación, se procede a explicar al detalle cada etapa del proyecto y al final se muestra un diagrama de bloques.

1.2.1 Esquema pictórico

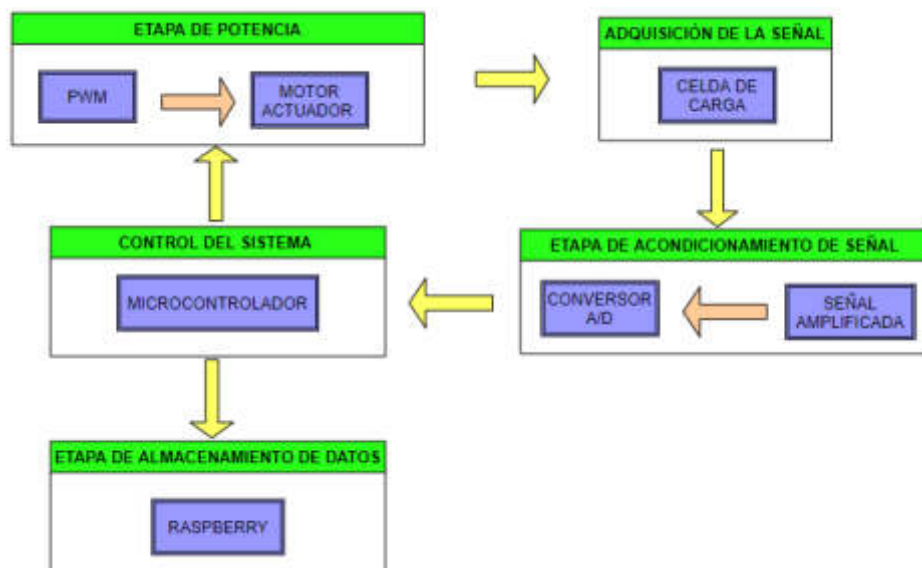


Figura 31: Esquema del diseño
Elaboración: Los autores

1.2.2 Etapa electrónica

Motor de corriente continua

También denominado Motor de corriente directa o motor DC, convierte la energía eléctrica en energía mecánica, por el cual se genera un movimiento rotatorio.

Cuenta con dos partes principales; el rotor de forma cilíndrica y con núcleo. Cuenta con varias espiras a los cuales se le aplica la corriente por el mismo extremo y genera un movimiento rotatorio al colector (Geekbot, 2015).

El estator representa el soporte mecánico, cuenta con un área vacía en el centro de forma cilíndrica donde se ubican, por lo general, imanes y devanados de hilo de cobre en cada polo.

De igual manera, cuenta con una escobilla, electroimanes, un eje y la carcasa (Figura 32).



Figura 32: Partes de un motor DC
Fuente: Geekbotelectronics.com

Principio de funcionamiento:

Los imanes del estator producen un campo magnético permanente, las espiras forman el rotor del motor y al estar inmerso el conductor en cual pasa una corriente eléctrica a un campo magnético se genera una fuerza denominada Fuerza de Lorentz (Geekbot, 2015).

Dicha fuerza está dada por la siguiente ecuación:

$$F = B.L.I.\sin\theta \quad (3)$$

Donde:

F: Fuerza [N]

I: Intensidad que recorre el conductor [A]

- L: Longitud de conductor [m]
- B: Densidad de campo magnético
- θ : Angulo que forma L con B

Puente de Wheatstone

Un puente de Wheatstone es un dispositivo eléctrico de medida, inventado por Samuel Hunter Christie en 1832, mejorado y popularizado por Sir Charles Wheatstone en 1843. El puente de Wheatstone es un instrumento de gran precisión que puede operar en corriente continua o alterna y permite la medida tanto de resistencias óhmicas como de sus equivalentes en circuitos de corriente alterna en los que existen otros elementos como bobinas o condensadores (impedancias).

Es un circuito utilizado (Figura 33) para la medición de la resistencia eléctrica estática o dinámica. La tensión de salida del puente de Wheatstone se expresa en milivoltios de salida por voltaje de entrada como se observa en la siguiente ecuación (Bolton W, 2013).

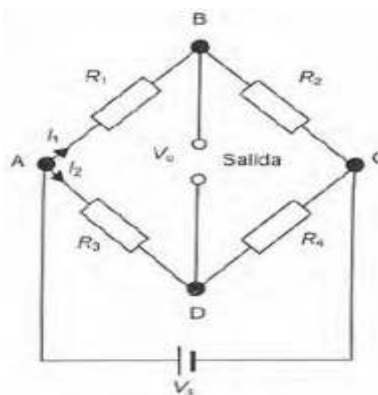


Figura 33: Puente Wheatstone
Fuente: Libro Bolton, W. (2013)

Cuando el voltaje de salida V_o es cero, el potencial B debe ser igual al potencial en D. la diferencia de potencial en R1, es decir, V_{AB} debe ser igual a la diferencia en R3, o sea, V_{AD} . Por lo tanto:

$$I_1 \cdot R_1 = I_2 \cdot R_2 \tag{4}$$

También significa que la diferencia de potencia en R2, es decir, V_{BC} , debe ser igual a la de R4, es decir V_{DC} (Bolton W, 2013). Dado que en BD no hay corriente,

la de R2 debe ser igual a la que hay en R1 y la corriente en R4 debe ser la misma que en R3. Por consiguiente:

$$I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_4 \quad (5)$$

Dividiendo las dos ecuaciones se obtiene:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad (6)$$

Se dice que el puente está balanceado. Se considera cuando una de las resistencias cambia su condición de balance. El voltaje de alimentación V_s se conecta entre los puntos A y C, y por eso la caída de potencia en el resistor R1 es la fracción:

$$\frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7)$$

Por lo tanto:

$$V_{AB} = \frac{V_s \cdot R_1}{R_1 + R_2} \quad (8)$$

De igual manera, la diferencia de potencia en R3 es:

$$V_{AD} = \frac{V_s \cdot R_3}{R_3 + R_4} \quad (9)$$

Entonces, la diferencia de potencia entre B y D, es decir, la diferencia de potencial a la salida V_o es:

$$V_o = V_{AB} - V_{AD} = V_s \cdot \left[\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \right] \quad (10)$$

Sensor de proximidad Inductivo

Un sensor de proximidad detecta un objeto metálico a una cierta distancia. El sensor está conformado por una bobina L el cual genera un campo magnético de

alta frecuencia. Al acercarse un objeto al campo magnético se genera una corriente de inducción (corriente de Foucault) en este (Figura 34).

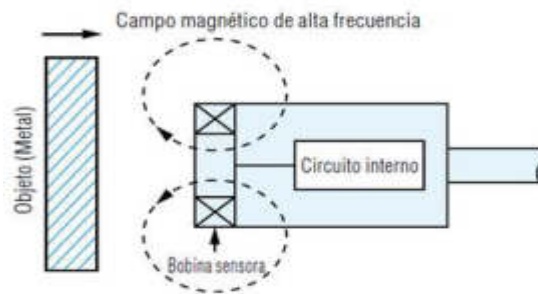


Figura 34: Detección de un objeto metálico
Fuente: www.keyence.com.mx

El cambio en la distancia entre el objeto y el sensor se refleja en el circuito de oscilación, que aumenta y decrece la señal de oscilación, respectivamente (Figura 35).

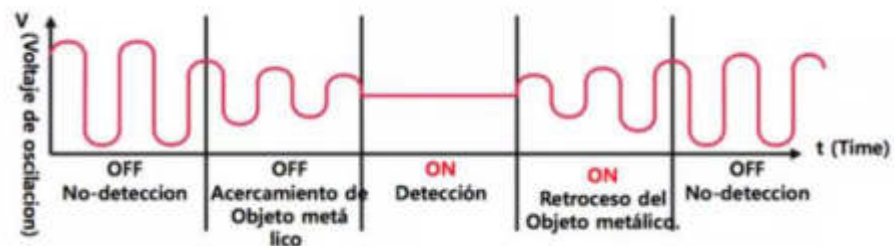


Figura 35: Forma de Onda de Oscilación
Fuente: www.ingmecafenix.com

Un sensor de proximidad inductivo está conformado por una de detección, una bobina, oscilador, rectificador, comparador, indicador del estado de la salida y etapa de salida (Figura 36).

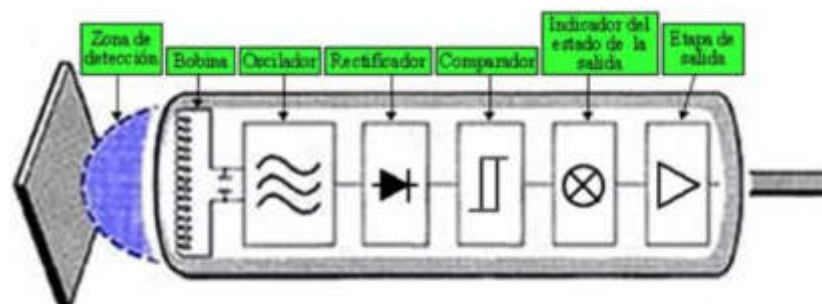


Figura 36: Bloque de un sensor inductivo
Fuente: www.ingmecafenix.com

Corrientes de Foucault

Se denomina corriente de Foucault al fenómeno eléctrico que se produce al atravesar un conductor y un campo magnético. Descubierta por el físico León Foucault en 1851. Estas corrientes crean electroimanes con campos magnéticos que se oponen al efecto del campo magnético (Figura 37).

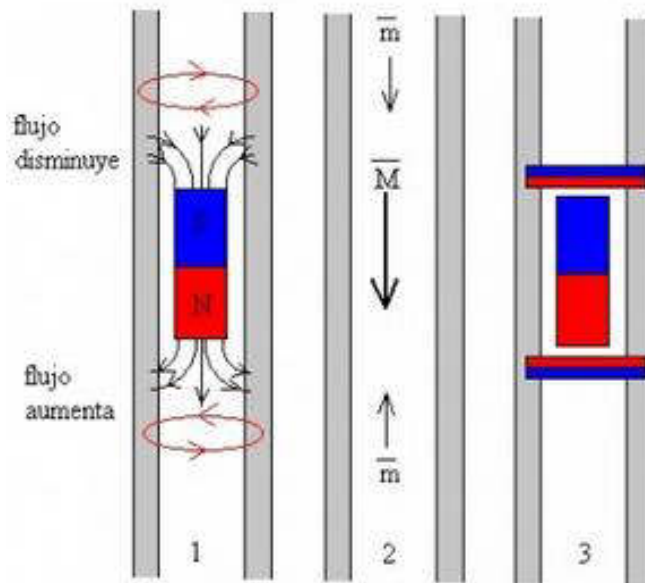


Figura 37: Corriente de Foucault
Fuente: www.ecured.cu

Adquisición de datos

Conversión ADC

Por sus siglas, en inglés, Analogue to Digital Converter o sistema de Conversores de analógico – digital, transformar una señal eléctrica análoga en una señal digital representada por un número binario, mediante una serie de pasos que se deben de realizar para no perder información.

Los parámetros pueden ser la resolución, la velocidad de conversión, los rangos de entrada.

En la figura 38, se muestra el diagrama de bloques del proceso que realiza la señal análoga para convertirse en digital, en el cual debe ser

muestreada tomando valores discretos en un instante de tiempo también conocido con el nombre de sampling.

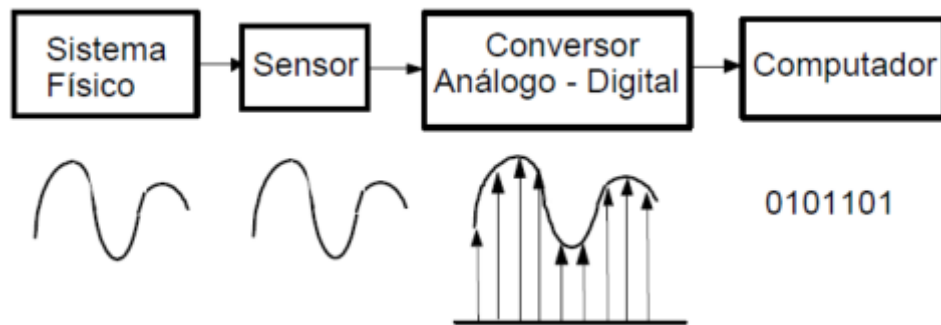


Figura 38: Conversión Analógica - Digital
Fuente: Huircán Juan Ignacio

Para realizar una toma de muestras y la conversión de forma correcta se debe considerar la velocidad de muestreo.

Según el teorema de Nyquist, la frecuencia de muestreo debe ser menor al doble del ancho de banda como se observa en la ecuación

$$f_s > 2 \cdot f_m \quad (11)$$

Donde:

f_s : Frecuencia de muestreo

f_m : Ancho de banda de la señal muestreada

Las principales características estáticas son las siguientes:

Resolución

Depende del escalón que se tomó como referencia respecto a los niveles de tensión (Ver figura 38)

$$Fullscale.resolución = \frac{Fullscale}{2^n} \quad (12)$$

Comunicación serial UART

La comunicación UART transmite y recibe datos bit a bit, entre un microcontrolador (Figura 39).

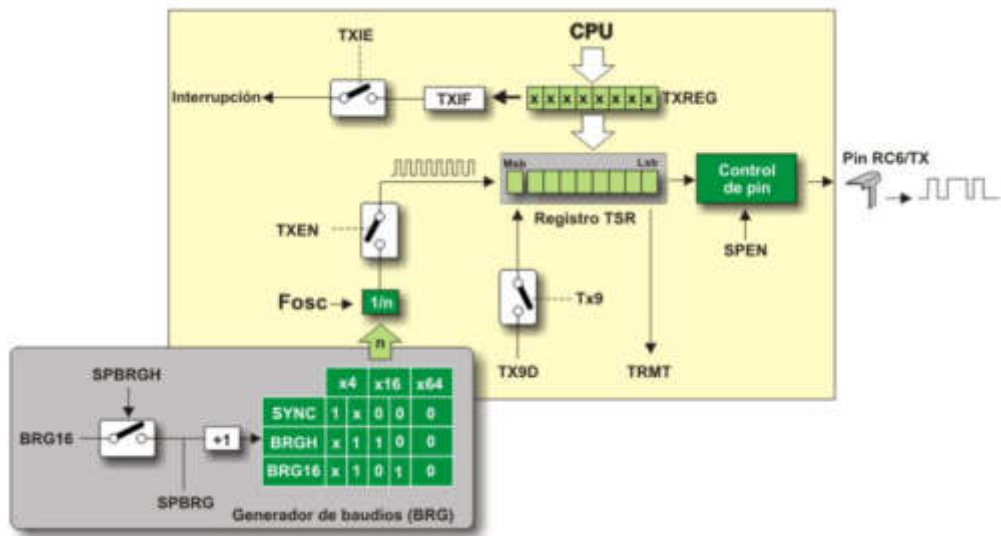


Figura 39: Corriente de Foucault
Fuente: www.ecured.cu

Entre sus características principales están el realizan operaciones síncrona y asíncrona, operaciones de 8 a 9 bits, calibración automática de velocidad de Baudios y 2 interruptores TX Y RX independientes.

La comunicación UART usa una serie de registros los cuales se pueden observar en el anexo 1.

Galga extensiométrica

La galga extensiométrica es básicamente una resistencia eléctrica. La variación de resistencia depende de la deformación que sufre la galga; cada galga extensiométrica está diseñada para medir la deformación a lo largo de un eje claramente definido, por lo que puede ser alineado adecuadamente. Las galgas extensiométricas son resistencias variables por la deformación y su ecuación básica es la siguiente (Mercado C, 2006):

$$R_g = R_o \cdot (1 + K \cdot \epsilon) \quad (13)$$

R_g = Resistencia de la galga.

R_o = Resistencia nominal (resistencia en reposo).

K = Constante de galga.

ε = Deformación.

Usualmente, los materiales que se utilizan para fabricar galgas son elementos semiconductores como el silicio y el germanio en láminas metálicas delgadas (Mercado C, 2006). Como se mencionó la celda de carga tiene cuatro galgas extensiométricas y su configuración más común para medir deformaciones es el puente Wheatstone [20].

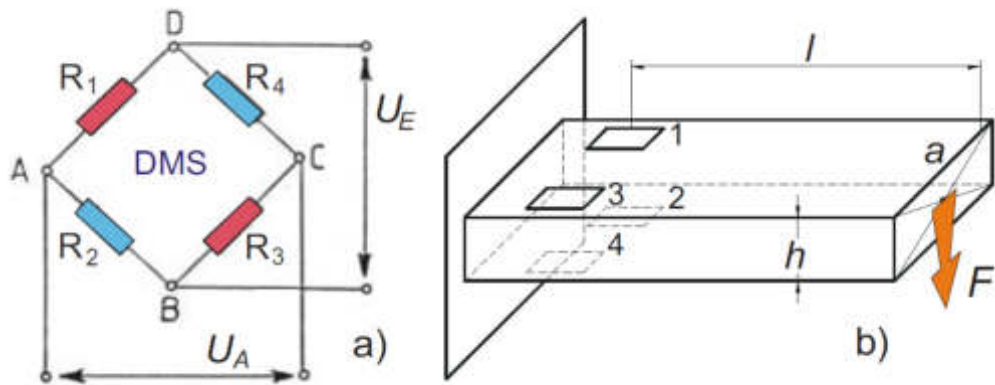


Figura 40: Configuración común de las galgas extensiométricas.
Fuente: IEEExplore.ieee.org

Puente de medida con cuatro galgas (Puente Completo): La utilización de cuatro galgas cuadruplica la sensibilidad del puente respecto al puente de una sola galga. De igual forma que en el caso anterior, las galgas están compensadas en temperatura.

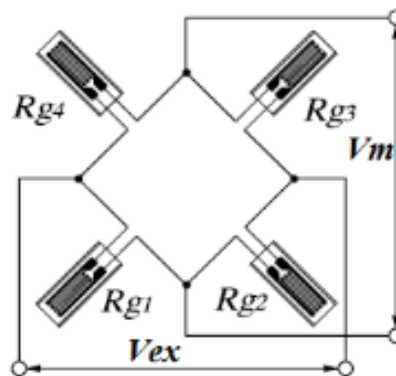


Figura 41: Configuración de puente completo.
Fuente: Configuración común de las galgas extensiométricas

1.2.3 Etapa mecánica

Para determinar la resistencia de un material, lo primero que se debe tener en claro es el concepto básico de fuerzas, la cual dice que es la acción de un cuerpo sobre otro y que siempre existen en pares de igual magnitud y direcciones opuestas.

Equilibrio de un cuerpo rígido

Se dice que un cuerpo se encuentra en equilibrio cuando la resultante del sistema de fuerzas que afectan al cuerpo es cero.

$$\sum F = 0 \quad (14)$$

$$\sum M_o = 0 \quad (15)$$

Ambas ecuaciones son las condiciones necesarias y suficientes para lograr el equilibrio de un cuerpo rígido. Además, si se requiere descomponer en el plano de xyz pueden describirse en las siguientes ecuaciones.

$$\sum F_x = 0 \quad \sum F_y = 0 \quad \sum F_z = 0 \quad (16)$$

$$\sum M_x = 0 \quad \sum M_y = 0 \quad \sum M_z = 0 \quad (17)$$

Es importante identificar claramente todas las fuerzas conocidas como desconocidas para incluirlas en las ecuaciones de equilibrio, en la siguiente figura se observa un diagrama de cuerpo en equilibrio.

Mecánica de materiales

La mecánica de materiales es una de las tantas ramas de la ciencia de la ingeniería que se encarga de estudiar el comportamiento físico de un cuerpo deformable bajo una carga constante o variable.

Por ello, con el fin de medir las propiedades mecánicas del hueso para investigaciones médicas, este se considera tanto un tejido como una estructura, el cual desempeña una de sus funciones básicas que es soportar y proteger los órganos.

La resistencia ósea no depende solamente de su masa, sino también de sus propiedades geométricas, estructurales y materiales contenidas todas en un concepto denominado calidad ósea. Para realizar las pruebas mecánicas en huesos, primero se debe tener claro algunos conceptos básicos.

Carga y desplazamiento.

La carga (P) o también denominada fuerza (F) es un vector con magnitud, dirección y punto de aplicación [21]. Al aplicar una carga o fuerza sobre un cuerpo, en este caso un hueso, este cambia su forma; mientras que el desplazamiento es el resultado de la fuerza aplicada sobre un cuerpo dentro de un límite elástico, pero el resultado del desplazamiento no es la misma para todos los materiales (Guide D, 2013).

Al realizarse un ensayo mecánico sobre cualquier material, se obtiene una curva denominada carga-desplazamiento que da como resultado una deformación total.

La carga y el desplazamiento pueden nominarse como esfuerzo y deformación respectivamente (Guide D, 2013).

Esfuerzo y deformación

La resistencia interna que opone un material a una fuerza determinada se denomina esfuerzo (σ) y se mide en pascuales (Pa) o newton (N); el esfuerzo está representado por la siguiente ecuación.

$$\sigma = \frac{P}{A} \cong \sigma = \frac{F}{A} \quad (18)$$

Donde:

σ : Esfuerzo [Pa]

P: Carga o Fuerza (F) [N]

A: Área [m²]

Por otro lado, la deformación es la representación del cambio de las dimensiones que sufre el material al ser sometida a una fuerza determinada y está representado por la siguiente ecuación con una magnitud adimensional.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (19)$$

Donde:

ε : Deformación

ΔL : Variación de longitud [mm]

L_0 : Longitud inicial [mm]

Propiedades mecánicas de los materiales

Los materiales tienen características distintas y esto los hace diferentes entre sí desde el punto de vista del comportamiento mecánico.

Elasticidad y plasticidad

La elasticidad es la propiedad de un material de recuperar su forma inicial luego de ser afectado por una fuerza intentando destruirlo, un ejemplo de ello es el caucho; por otro lado, la plasticidad es lo opuesto a la elasticidad debido a que a pesar de haber cesado la fuerza el material mantiene su deformación, un ejemplo de esta propiedad es la plastilina.

Rigidez y flexibilidad

La rigidez es una característica mecánica donde se necesita un gran esfuerzo para inducir una pequeña deformación elástica sobre el material. Esta propiedad es conocida como el módulo de Young y está representada por la siguiente fórmula:

$$\gamma = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{ó} \quad \sigma = \gamma \times \varepsilon \quad (20)$$

Donde:

γ : Módulo de Young [Pa] o [N]

σ : Esfuerzo [Pa] o [N]

ϵ : Deformación

En cambio, la flexibilidad es la propiedad opuesta a la rigidez, esto a su característica principal la cual muestra una deformación en la zona elástica antes de alcanzar la zona plástica.

Un material con un módulo de Young pequeño sufriría grandes deformaciones con pequeños esfuerzos, mientras que un material con un módulo de Young elevado sufrirá pequeñas deformaciones con grandes esfuerzos (Guide D, 2013).

Tenacidad, trabajo de rotura y resiliencia

La tenacidad representa la cantidad de energía absorbida por la estructura hasta llegar a la fractura. Esta no debe confundirse con la dureza debido a que son dos conceptos distintos, la dureza es la resistencia que soporta un material con respecto a una fuerza.

En cambio, la resiliencia es la capacidad de la estructura para resistir la deformación elástica y esta representa la energía que el material absorbe sin deformarse.

Resistencia

La resistencia es la oposición de una fuerza a la que un material es sometido sin llegar a deformarse o fracturarse, mientras la resistencia máxima es el esfuerzo máximo o fuerza máxima que es necesario para que el material llegue a la ruptura, la ecuación está representada en.

Conceptos referidos a las dimensiones del material

Coefficiente de Poisson

Un material al ser sometido a una fuerza de compresión, su dimensión disminuye en dirección a la fuerza aplicada (dirección longitudinal), pero aumenta en dirección transversal; por otro lado, al aplicar una fuerza de

tracción o tensión las dimensiones disminuyen en dirección transversal y aumenta en dirección longitudinal. El coeficiente de poisson está representada por la siguiente fórmula para el eje x mientras que para el eje yz se representa la ecuación

$$\nu = \frac{\text{deformación unitaria lateral}}{\text{deformación unitaria axial}} \quad (21)$$

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{\gamma} \quad (22)$$

$$\epsilon_y = \epsilon_z = - \frac{\nu \times \sigma_x}{\gamma} \quad (23)$$

Donde:

ν : Coeficiente de Poisson

γ : Modulo de Young [Pa] o [N]

σ_x : Esfuerzo en el eje x [Pa] o [N]

ϵ_x : Deformación en el eje x

ϵ_y : Deformación en el eje y

ϵ_z : Deformación en el eje z

Fractura y fatiga

La fractura es el resultado de una fuerza ejercida sobre un material hasta llegar al punto de su deformación o fracaso mecánico. Mientras que la fatiga es el daño producto de esfuerzos repetidos por debajo del esfuerzo máximo, es importante recalcar que el material llegara a la fractura, aunque dicha carga o fuerza estén por debajo del valor de ruptura.

Existen tres tipos básicos de las fuerzas y estas son: compresión, (tracción o tensión), flexión y torsión los cuales se detallan en los siguientes puntos.

Ensayos mecánicos de compresión y tracción

Son pruebas a las que se somete un material a una fuerza uniaxial en una máquina universal; existe estudios de compresión con huesos trabeculares donde se demuestra que el módulo de Young se va a la baja debido a que la dimensión del hueso no es uniforme de estos ensayos se puede calcular el esfuerzo, la deformación y el módulo de Young. Estas fórmulas fueron detalladas líneas arriba.

Ensayos mecánicos de torsión

Los ensayos de torsión se aplican para determinar las propiedades mecánicas de corte hasta la ruptura, la cual se mide a través de un transductor. Este mide la fuerza o torque necesario para llegar al punto de ruptura.

Ensayos mecánicos de flexión

Existen dos tipos de ensayos de flexión los cuales son de tres y cuatro puntos, en ambas la muestra se coloca sobre dos soportes. Para la flexión sobre tres puntos, se le aplica una fuerza en el centro del material a flexionar; mientras que en el ensayo de cuatro puntos dos fuerzas iguales son aplicadas asimétricamente del material, esta clase de ensayos se aplica en huesos largos.

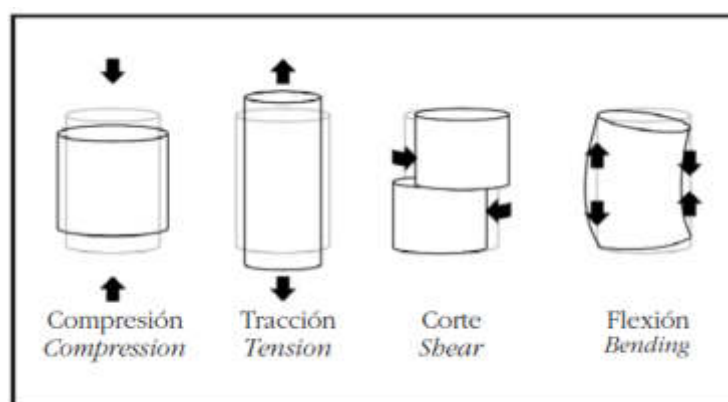


Figura 42: Tipos de Fuerza a los que se puede someter un hueso
Fuente: Biomecánica y hueso de David Guede – Trabeculae

CAPÍTULO II MODELAMIENTO

2.1 Materiales

2.1.1 Microcontrolador pic 18F4550 de microchip technology

El microcontrolador PIC 18F4550 es un circuito integrado que posee memoria, 4 temporizadores o TIMERS de los cuales hasta 2 pueden ser utilizados como módulos de captura/comparación/PWM y circuitos auxiliares; además, cuenta con una unidad aritmética y lógica conocida como ALU, el cual es uno de los componentes principales del microcontrolador. El PIC 18F4550 puede llegar a operar a velocidades de hasta 12 MIPS. De esa manera los algoritmos de control pueden llegar a ser calculados con mayor rapidez [22].

A fin de lograr una comunicación con otros dispositivos, el microcontrolador dispone de tres puertos serie como: FS-USB de hasta 12Mbit/s, I²C y SIP de hasta 10Mbit/s, también cuenta con una serie asíncrona compatible con protocolo LIN, que permite el intercambio de información entre diferentes unidades y puertos EUSART con una tasa de baudios de hasta 9600.

A continuación, se presenta la tabla 7 con características adicionales y en la tabla 8 los parámetros del microcontrolador.[22]

Tabla 7: Características adicionales

Interfaz USB 2.0 de velocidad completa (12Mbit/s)
1 K byte de doble puerto RAM + 1k byte GP RAM
Transceptor de velocidad completa
16 pines finales (entrada / salida)
Puerto de streaming
Resistencias internas Pull Up (D + / D -)
Rendimiento de 48 MHz (12 MIPS)

Fuente: Microchip technology

Tabla 8: Parámetros

Nombre	Valor
Numero de pines	40
Tipo de memoria	Flash de 32K bytes
Memoria RAM	2K bytes
EEPROM/HEF	256 bytes
Velocidad de CPU	12 MIPS
Oscilador externo de dos modos	48MHz
Oscilador interno	3KHz – 8MHz
Temporizadores (TIMER)	1 x 8 bits, 3 x 16 bits
Periféricos de comunicación digital	1-UART, 1-SPI, 1-I2C1-MSSP (SPI / I2C)
Periféricos Captura/Compara/PWM	1 PCC, 1 ECCP
Entrada de ADC	13 CH. a 16 bits

Fuente: Datasheet PIC18F4550

En la figura 43, se observa el diagrama de pines de salida/entrada del microcontrolador PIC18F4550. Así mismo, en la figura 44, se observa una comparación entre varios dispositivos de la familia 18F como sus principales características.

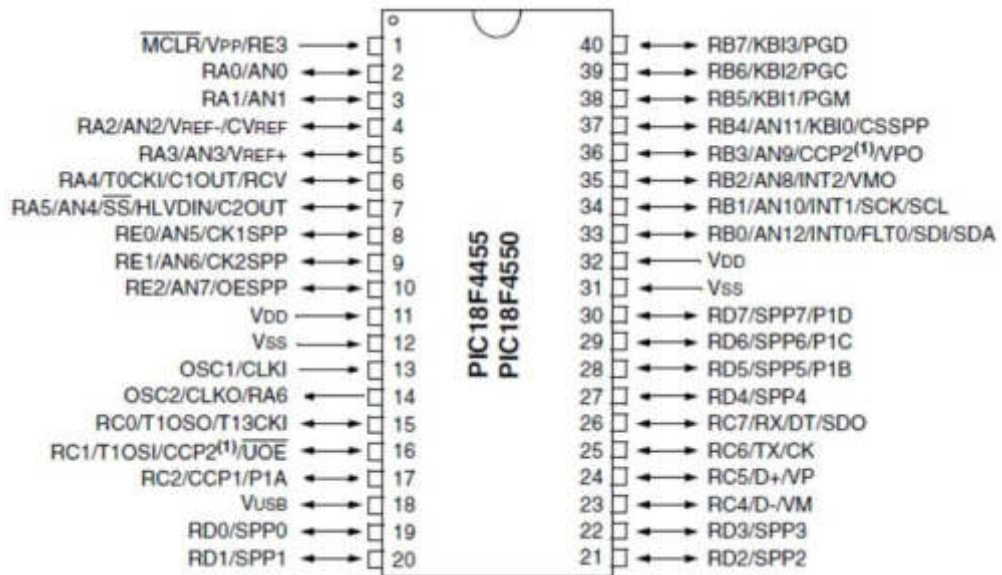


Figura 43: Diagrama de pines
Fuente: Datasheet PIC18F4550

Features	PIC18F2455	PIC18F2550	PIC18F4455	PIC18F4550
Operating Frequency	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz	DC – 48 MHz
Program Memory (Bytes)	24576	32768	24576	32768
Program Memory (Instructions)	12288	16384	12288	16384
Data Memory (Bytes)	2048	2048	2048	2048
Data EEPROM Memory (Bytes)	256	256	256	256
Interrupt Sources	19	19	20	20
I/O Ports	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, (E)	Ports A, B, C, D, E	Ports A, B, C, D, E
Timers	4	4	4	4
Capture/Compare/PWM Modules	2	2	1	1
Enhanced Capture/Compare/PWM Modules	0	0	1	1
Serial Communications	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART	MSSP, Enhanced USART
Universal Serial Bus (USB) Module	1	1	1	1
Streaming Parallel Port (SPP)	No	No	Yes	Yes
10-Bit Analog-to-Digital Module	10 Input Channels	10 Input Channels	13 Input Channels	13 Input Channels
Comparators	2	2	2	2
Resets (and Delays)	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT	POR, BOR, RESET Instruction, Stack Full, Stack Underflow (PWRT, OST), MCLR (optional), WDT
Programmable Low-Voltage Detect	Yes	Yes	Yes	Yes
Programmable Brown-out Reset	Yes	Yes	Yes	Yes
Instruction Set	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled	75 Instructions; 83 with Extended Instruction Set enabled
Packages	28-pin PDIP 28-pin SOIC	28-pin PDIP 28-pin SOIC	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP	40-pin PDIP 44-pin QFN 44-pin TQFP

Figura 44: Figura comparativa
Fuente: Datasheet PIC18F4550

Además, se realiza una comparación, tabla 9, entre el microcontrolador PIC18F4550 y el microprocesador ATmega 328P en donde resalta la diferencia en la tasa de instrucción el número de pines y el USB.

Tabla 9: Tabla comparativa

	Microchip pic18f4550	Atmel Atmega328
Memoria flash (KB)	32	32
SRAM (KB)	2	2
EEPROM (Bytes)	256	1024
Comunicación serial (USART)	1	1
SPI	1	1
I2C	1	1
USB	1	0
Canales PWM	2	6
Canales ADC (10 bit)	13	8
Temporizadores	1 x 8 bits 3 x 16 bits	2 x 8 bits 1 x 16 bits
Comparadores analógicos	2	1
Rango de voltaje de operación (V)	2-5.5	1.8-5.5
Max I / O Pins	40	23
F.max (MHz)	48	20
Rango de operación (V)	2 – 5.5	3.3 – 5 v

Fuente: Datasheet PIC18F4550 / Datasheet Atmega 328P

2.1.1.1 Configuración del PWM PIC 18F4550

Para el uso del PWM se utilizó el módulo TIMER1 fue configurado como temporizador y para ello se escribió un “0” lógico en el bit TMR1CS del registro T1CON, que permite que la frecuencia por instrucciones sea un cuarto de reloj. En el anexo N° 1, se muestran los registros que intervienen en la configuración del TIMER1.

De igual manera, la velocidad a la que se ejecuta cada instrucción depende de la velocidad del oscilador, para esta investigación se utilizó una frecuencia de oscilación de 48 MHz para aprovechar la máxima

velocidad del microcontrolador 18F4550 [22]. En la figura 45, se observa el diagrama de bloques para la configuración del temporizador del TIMER1.

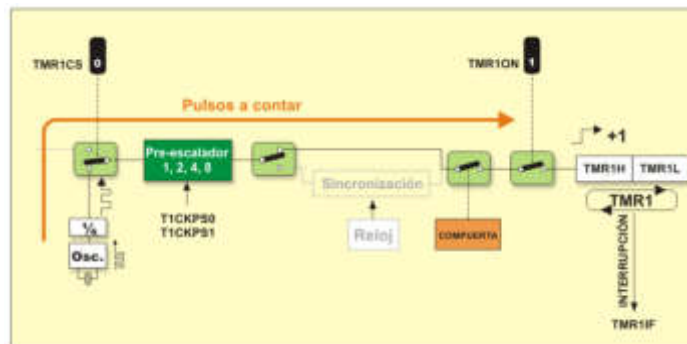


Figura 45: Diagrama de bloque del temporizador
Fuente: google.com

A continuación, se muestra la ecuación para determinar la frecuencia de instrucción.

$$F_{inst} = \frac{F_{osc}}{4} \quad (24)$$

Donde:

F_{inst} : Frecuencia de instrucción.

F_{osc} : Frecuencia de oscilación.

De la ecuación mostrada líneas arriba, se puede determinar el tiempo por instrucción como se observa a continuación:

$$T_{inst} = \frac{1}{F_{inst}} \quad (25)$$

Donde:

T_{inst} : Tiempo de instrucción.

F_{inst} : Frecuencia de instrucción.

Debido a la configuración del módulo TIMER1 como un temporizador de 16 bits, este podrá contar hasta 65535 pulsos en un solo ciclo, lo que significó que tuvo dos registros los cuales se muestran en la figura 46:

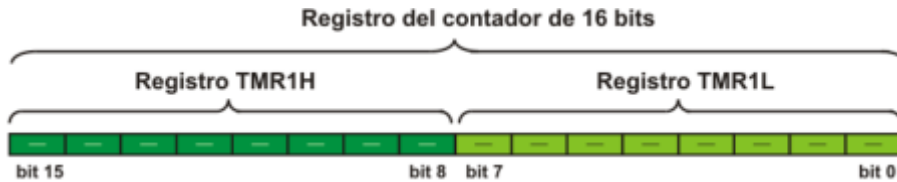


Figura 46: Registro de 16 bits
Fuente: google.com

Esta cantidad de pulsos se puede calcular a través de la siguiente fórmula:

$$\text{Interrupciones en TMR1} = 2^n = 0xFFFF \quad (26)$$

Donde:

n: es el número de bits.

Para la modulación del ancho de pulso se debe considerar el periodo (T) de duración de la onda, la que debió trabajar en altas frecuencias; en esta tesis se empleará una frecuencia de 2MHz. El microcontrolador envía ondas cuadradas como se observa en la figura 47, en donde se observa las partes de una onda cuadrada, desde el periodo y la duración de pulso.

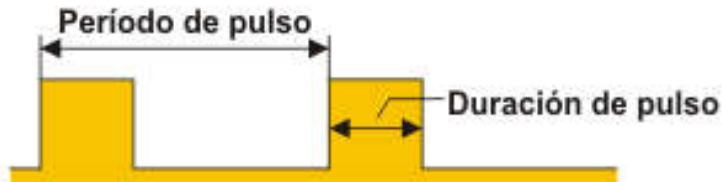


Figura 47: Onda cuadrada
Fuente: google.com

Además, para determinar el periodo del pulso, se tiene como dato la frecuencia, que se puede emplear la siguiente ecuación.

$$T = \frac{1}{F} \quad (27)$$

Donde:

T: Periodo del tren de pulsos

F: Frecuencia del tren de pulsos

Es importante tener claro la configuración del prescaler (ps) ya que son usados para extender el rango de frecuencias; para el cálculo del número de cuentas es necesario la siguiente fórmula:

$$T = \frac{1}{F_{inst}} \times ps \times \text{cuentas} \quad (28)$$

Donde:

T: Periodo del tren de pulsos

F_{inst} : Frecuencia de instrucción.

ps: Prescaler.

Con el número de cuentas se puede modificar la duración del pulso y así obtener el PWM deseado. En la figura 48, se muestran los diferentes anchos de pulsos para diferentes números de cuentas.

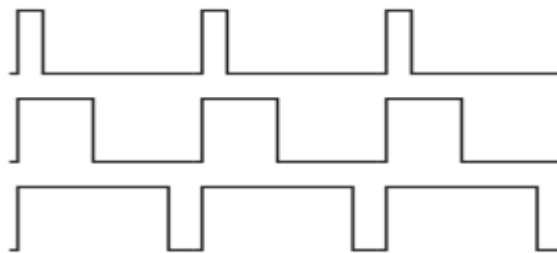


Figura 48: Trenes de impulso
Fuente: google.com

2.1.1.2 Configuración del periférico UART

Con la configuración de este periférico se puede transmitir o recibir datos bit a bit. Este proceso recibe el nombre de comunicación serial y puede realizarse entre el microcontrolador y otras unidades. Es importante tener en cuenta la configuración del BAUD RATE para una correcta Transmisión/Recepción y sin pérdida de datos; esta configuración se realizó a través de los registros SPBRGH y SPBRG. En el anexo 2, se explica al detalle la configuración de los registros del periférico UART [22].

Para esta etapa de Transmisión/Recepción de datos se requiere unos baudios de 9600 bps, se deberá calcular el valor que se debe configurar en el registro SPBRG a través de la siguiente ecuación.

$$\text{BAUD} = \frac{F_{\text{osc}}}{64(\text{SPBRG} + 1)} \quad (29)$$

Donde:

BAUD: Tasa de baudio

SPBRG: Registro del BAUD RATE

Para validar si el resultado no es exacto se puede calcular el error con la siguiente ecuación:

$$\text{Error [\%]} = \left(\frac{\text{BAUD}}{\text{BAUD calculado}} - 1 \right) \times 100\% \quad (30)$$

2.1.2 Módulo Hx711

El módulo Hx711 es muy utilizado en procesos industriales, sistemas de medición automatizada e industria médica [23]. La arquitectura del módulo Hx711 le permite amplificar los datos entregados por la celda de carga; además de convertir estos datos de analógico a digital; esto gracias a su convertor A/D interno de 24 bits. Para el envío de datos al microcontrolador, el módulo posee una interfaz de dos hilos (reloj y datos) para la comunicación [23], estos datos llegan al microcontrolador en formato complemento a 2.

La velocidad con que el módulo entregue los datos depende de la configuración que se realice al microcontrolador, si se utiliza su frecuencia de oscilación interna, la velocidad de salida de datos del módulo se puede seleccionar entre 10 SPS o 80 SPS. Cuando se utiliza un reloj o cristal externo, la velocidad de datos que entrega el módulo será directamente proporcional al reloj o la frecuencia del cristal [23]. En la tabla 10, se observa las características del módulo, mientras que en la figura 49 se observa el diagrama de pines del módulo.

Tabla 10: Características del módulo

Voltaje de operación	5 V DC
Consumo de corriente	Menor a 10 mA
Voltaje de entrada	40 Mv
Resolución de A/D	24 bit
Frecuencia muestreo	80 Hz

Fuente: Datasheet

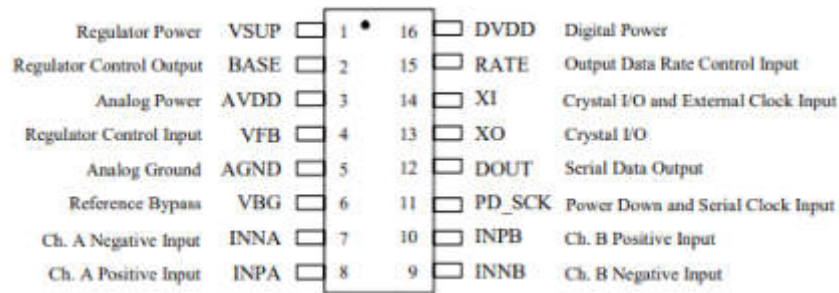


Figura 49: Diagrama de pines
Fuente: Datasheet Hx711

2.1.3 Raspberry PI 3B +

El Raspberry Pi es un minicomputador de bajo costo con un procesador Broadcom de 64 bits QuadCore a 1.4 GHz y una destacable memoria RAM de 1GHz, debido a esta característica es que se eligió este modelo de Raspberry; ya que la alta carga computacional para la elaboración de una interfaz gráfica consumió recursos que el procesador del Raspberry soportó fácilmente. Además, dentro de la familia de Raspberry, el modelo PI 3B+ posee un bajo consumo de sus recursos, permitiéndole una mejor performance al momento de realizar una acción. En la figura 50, se observa la distribución y configuración de pines que posee el Raspberry.[24]

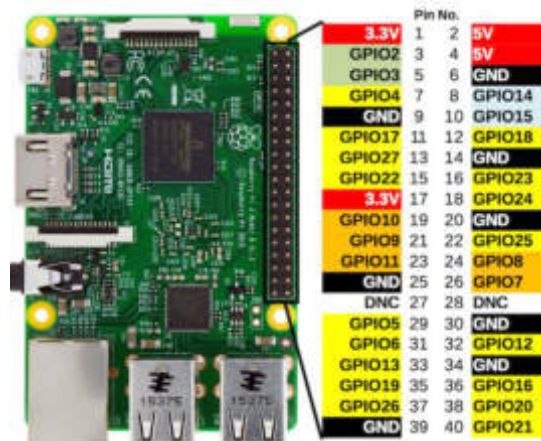


Figura 50: Configuración de pines del Raspberry 3 Model B+
Fuente: Raspberry.org

2.1.4 Celda de carga

Son transductores que tienen como función convertir una fuerza en una señal eléctrica, mediante la deformación ejercida sobre la configuración de galgas extensiométricas como se hizo referencia en el capítulo anterior.

Las celdas de cargas pueden ser de diferentes tipos y cada una diseñada para un tipo de aplicación o función, por ejemplo, las de tracción o tipo S, de flexión, compresión y de tipo barra.

Para este proyecto se escogió una celda tipo single point o de punto único, en la cual la presión se ejerce sobre un punto específico de su estructura, la cual es una característica que debe considerarse para la fijación de la celda de carga. En la figura 51 se muestra el tipo de celda de carga que se implementó. Las especificaciones técnicas de la celda de carga dadas por el fabricante, se encuentra en la tabla 11.



Figura 51: Celda de carga tipo single
Fuente: balanzastrunfo.cl

Tabla 11: Especificaciones técnicas

Carga nominal	80Kg (Kg)
Sensibilidad	2 mV / V
Tensión máxima	15 V
Resistencia de entrada	1050 ± 50Ω
Resistencia de salida	1000 ± 50Ω
Tipo de circuito de compensación	Puente Balanceado
No linealidad	0,03% FS
Histéresis	0,02% FS
Temperatura Operating	-10 °C +40 °C
Resistencia del puente	350 Ω
Código de colores	+excitación=Blanco, +señal= Verde. -excitación=Rojo, - señal= Negro.

Fuente: Datasheet

Las características básicas son:

- a) Capacidad: Es la capacidad total de la celda de carga al que puede ser sometido de cual incluye el peso muerto, el peso neto máximo y la tolerancia (Referencia).

$$\text{Capacidad} = \text{Peso muerto} + \text{Peso neto máximo} + \text{tolerancia} \quad (31)$$

- b) Precisión: Puede ser expresada en términos de linealidad, repetición, deslizamiento y rapidez. Estas condiciones son todas expresadas como un porcentaje de la capacidad total de la celda de carga. Por ejemplo, una celda de carga de 80Kg. Tiene una precisión total figurada en un $\pm 0.02\%$, que viene a ser la histéresis, esto significa que la celda de carga medió cargas entre 0 y 80Kg con ± 16 gramos de precisión.
- c) Sensibilidad: La sensibilidad indica el nivel de voltaje que entrega el circuito de la galga por cada voltio de excitación, cuando se ejerce el peso máximo. La alimentación dada por el fabricante esta entre +5 y +15 Voltios.

$$\text{Señal máxima} = \text{Sensibilidad} \cdot \text{voltaje excitación} \cdot \frac{\text{Carga}}{\text{Capacidad}} \quad (32)$$

Si la carga y la capacidad son iguales, se puede expresar la ecuación como la siguiente:

$$\text{Señal máxima} = \text{Sensibilidad} \cdot \text{voltaje excitación} \quad (33)$$

2.1.5 Actuador eléctrico

Un actuador es un dispositivo que proporciona una fuerza determinada que puede ser generada por tres fuentes posibles como: presión neumática, presión hidráulica o fuerza motriz eléctrica. Se optó por un actuador tipo eléctrico debido a que cuenta con un reductor interno que hace que el torque generado por el motor aumente y esto hace que el tiempo que le toma al pistón en realizar su recorrido sea más lento que los neumáticos e hidráulicos. En la figura 52, se muestra el actuador eléctrico y en la tabla 12, se presenta sus características principales.

Tabla 12: Características del actuador eléctrico

Fuerza	500N
Voltaje de operación	24VDC
Consumo de corriente	2.5A
Longitud de carrera	177 mm
Ciclo de trabajo	10 %

Fuente: Datasheet



Figura 52: Actuador eléctrico
Fuente: Datasheet

2.1.6 Driver YC-MD1301

El driver YC-MD1301 es un módulo de puente H que está compuesto por transistores MOSFET de alta potencia y gracias a su acondicionamiento este driver no necesita un disipador de calor. Se optó por este driver debido a que posee de un diodo TVS encargado de neutralizar, minimizar o anular las descargas electrostáticas a la que puede estar expuesto el driver, liberando la inductancia del motor. Además, como característica principal posee funciones de frenado de emergencia. En la tabla 13, se presenta sus características principales y en la figura 53, se muestra el driver.

Tabla 13: Características driver

Voltaje de operación	5 – 25 VDC
Consumo de corriente	3 – 10 A
Potencia nominal	350W
Temperatura de trabajo	40 – 85 °C

Fuente: Datasheet

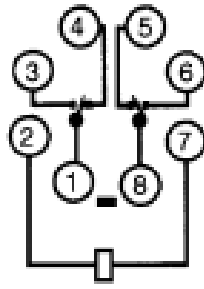


Figura 53: Driver YC-MD1301

Fuente: Datasheet

2.1.7 Relé MK2P-I

El relé es un dispositivo electrónico que funciona como un interruptor del paso de corriente eléctrica a través de una bobina y un electroimán permitiéndole controlar un circuito electrónico [25]. El relé MK2P-I se encuentra compuesto por una bobina, una armadura metálica y un grupo de contactos que pueden ser conmutado por medio de un campo magnético generada por la bobina al paso de la corriente. En la figura 54, se muestran los 8 terminales que cuenta el rele MK2P-I, dos de ellos para excitación de la bobina.



**LED Indicator type (DC coil)
MK2PN-I, -S**

Figura 54: Terminales del MK2P-I
Fuente: Datasheet MK2P-I

Además, se muestra, en la siguiente tabla, las características más importantes del relé.

Tabla 14: Características

Resistencia de contacto	50 mΩ max.
Tiempo de Operación	AC: 20ms max. DC 30ms mac.
Tiempo de liberación	20 ms max.
Frecuencia de operación	Mecánica: 18 000 operation/hour Electrica: 1 800 operation/hour
Resistencia de aislamiento	100 MΩ min.

Fuente: Datasheet MK2P-I

2.1.8 Sensor de proximidad inductivo PR12-4AO

El sensor de proximidad electrónico por el cual se optó es un sensor inductivo, debido a que los capacitivos son extremadamente sensibles a los factores ambientales. En la figura 55, se muestra el acondicionamiento del sensor, también se describen sus características en la tabla 15.[26]

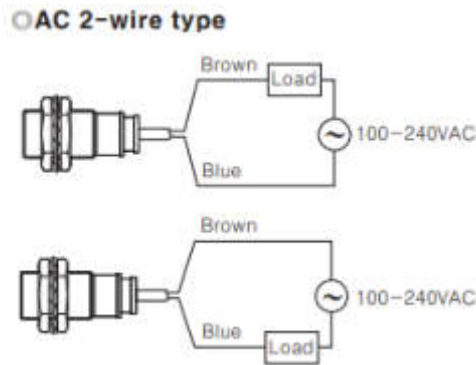


Figura 55: Acondicionamiento del sensor
Fuente: Datasheet

Tabla 15: Características

Distancia de sensado	4mm
Hysteresis	10%
Respuesta de frecuencia	20Hz
Operación	100 – 240V
Corriente de fuga	2.5mA
Salida de control	5 a 150mA
Resistencia de aislamiento	50MΩ
Circuito de protección	Circuito de protección contra sobretensiones

Fuente: Datasheet

2.1.9 Pantalla táctil LCD Display 7"

En la figura 56, se puede observar una pantalla táctil HD LCD de 7" con una resolución de 1024x600 pixeles, además, cuenta con una entrada HDMI y dos conectores micro USB para su fuente de alimentación de 5V y un consumo de hasta 1A.



Figura 56: Vista frontal de la pantalla
Fuente: www.elecrow.com

CAPÍTULO III DESARROLLO

3.1 Metodología

- A. Como primer paso se desarrolla el modelamiento matemático para establecer la relación entre la salida – Fuerza mecánica y la entrada corriente en el motor de DC.
- B. Para la entrada de corriente, en el motor de DC, se establece el control de PWM en base a la configuración de temporizadores en el microcontrolador.
- C. Configuración del convertidor analógico digital del microcontrolador para la lectura del valor de la celda de carga y posterior linealización a base de pesas de valor conocido.
- D. Establecer la secuencia del funcionamiento del equipo.

3.1.1 Modelamiento de matemático

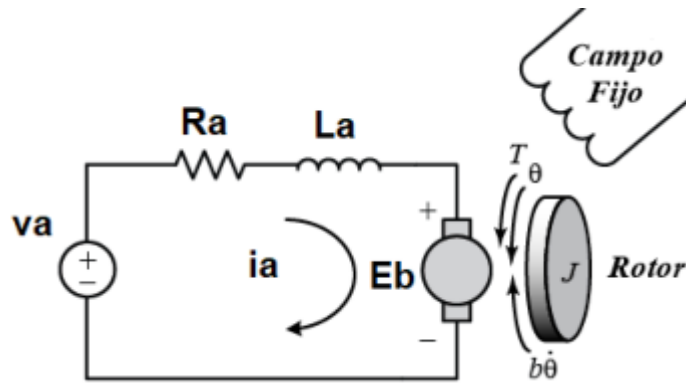
El actuador que se utiliza es un motor de continua, que luego de un arreglo de engranajes el movimiento circular se convierte a un movimiento lineal. La figura siguiente muestra el circuito equivalente respecto a la armadura. Donde se obtiene las fórmulas siguientes:

$$V_a(t) = R_a \times i_a(t) + L_a \frac{d i(t)}{dt} + E_b(t)$$

$$E_b(t) = k_b \times w(t)$$

Transformada de Laplace (S):

$$i_a(s) = \frac{1}{R_a + ia(s)} \times (v_a(s) - E_b(s))$$



Para relacionar la corriente de armadura con el torque se utiliza la siguiente fórmula:

$$T_m(t) = k_m \times i_a(t)$$

$$T_m(s) = k_m \times i_a(s)$$

En el eje del motor se presenta carga inercial del mismo acoplamiento y los engranajes que se puede representar en una equivalencia como indica la fórmula siguiente:

$$T_m(t) - b_{eq} \times w(t) - t_d(t) = J_{eq} \times \frac{dw(t)}{dt}$$

$$T_m(s) - b_{eq} \times w(s) - t_d(s) = J_{eq} \times s w(s)$$

$$w(s) = \frac{1}{J_{eq}(s) + b_{eq}} \times (T_m(s) - T_d(s))$$

Se asume que no existe perturbaciones que modifique el torque de entrada, por tanto:

$$T_d(s) \rightarrow 0$$

Además, la velocidad y aceleración angular se relacionan de la siguiente manera:

$$\frac{d\theta_m(t)}{dt} = w(t) \rightarrow sQ(s) = w(s)$$

Reemplazando en la fórmula del torque se tiene:

$$Q_m(s) = \frac{1}{J_{eq}(s^2) + b_{eq}} \times T_m(s)$$

Por último, la aceleración angular $Q_m(t)$ y lineal $a(t)$, se relacionan con el movimiento lineal aplicando una fórmula trigonométrica y la segunda derivada a ambos miembros de esta ecuación.

$$x(t) = r \theta(t)$$

$$x''(t) = r \theta''(t)$$

$$a(t) = r \theta''(t)$$

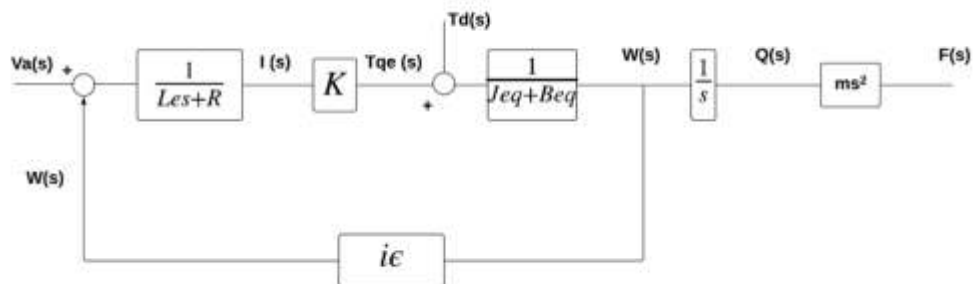
$$a(s) = r s^2 \theta(s)$$

Establecida la relación de aceleraciones se aplica la segunda ley de Newton.

$$F(t) = m a(t)$$

$$F(s) = m r s^2 \theta(s)$$

Del modelamiento planteado se obtiene el diagrama de bloques de la figura siguiente:



La siguiente figura muestra la prueba, tomando en cuenta un bloque de madera que se asemeja a las características de hueso de pollo, considerando un radio de 0.6 mm y un movimiento lineal de arriba hacia abajo.

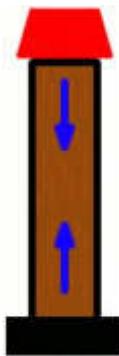


Figura 57: Viga de madera
Elaboración: Los autores

Considerando la fórmula de deformación en la etapa de modelamiento se tiene que:

$$\sigma = \frac{F}{A}$$

$$\sigma = \frac{34.5 \text{ KgF}}{\pi \times \left(\frac{0.6}{2}\right)^2}$$

$$\sigma = 122.1 \frac{\text{KgF}}{\text{cm}^2}$$

Donde:

σ : Esfuerzo [Pa]

P: Carga o Fuerza (F) [N]

A: Área [m²]

3.1.2 Etapa de generación de señal PWM

Para la selección del PWM adecuado se consideró una frecuencia de 20 MHz en respuesta del filtro RL del circuito de armadura. Por otro lado, se ha previsto ejercer una fuerza de sujeción en el hueso previo, a la fuerza de ruptura. Esto con la finalidad de mantener inmóvil al hueso para esto el actuador lineal debe bajar lo más lento posible aproximadamente al 40% de la velocidad nominal.

Luego de la sujeción, se debe conseguir que el motor ejerza una fuerza constante y no genere picos. Por lo tanto, se ha previsto que la fuerza en el hueso se relacione con el 70% de la velocidad nominal.

Para el cálculo del 40% y 70%, se utilizó la frecuencia de instrucción, timer1 y el pre-escalamiento de dicho timer

$$T = \frac{1}{2\text{MHz}} = 0.5\mu \text{ seg} \quad (34)$$

$$F_{\text{inst}} = \frac{48\text{MHz}}{4} = 12\text{MHz} \quad (35)$$

$$T_{\text{inst}} = \frac{1}{12\text{MHz}} = 8.3333333 \times 10^{-8} \text{ seg} \quad (36)$$

Donde:

T: Periodo.

Finst: Frecuencia por instrucción

Tinst: Periodo por instrucción.

Una vez hallado el Tinst, se procede a calcular el número de cuentas, considerando un prescaler (ps) de 8 y así obtener el PWM deseado.

$$T = \frac{1}{F_{inst}} \times ps \times \text{cuentas} \quad (37)$$

$$\frac{1}{2\text{MHz}} = \frac{1}{12\text{MHz}} \times 8 \times \text{\#cuentas} \quad (38)$$

$$\text{\#cuentas} = 750 \quad (39)$$

Para un **PWM al 40%**, se deben calcular las cuentas para un ancho de pulso en alta (TH) y cuando está en baja (TL)

$$\text{Cuentas en TH} = 0.4 \times 750 = 300 \text{ cuentas} \quad (40)$$

$$\text{Cuentas en TL} = 750 - 300 = 450 \text{ cuentas} \quad (41)$$

Como el temporizador trabaja en modo de 16 bits, se procede a calcular las interrupciones

$$\text{Interrupciones en TMR1} = 2^{16} = 65536 = 0xFFFF \quad (42)$$

Las interrupciones para los registros de TMRH y TMR1L deberían ser:

$$\text{TMR1H} = 65536 - \text{TH} = 65536 - 300 = 65236 \quad (43)$$

$$\text{TMR1L} = 65536 - \text{TL} = 65536 - 450 = 65086 \quad (44)$$

Para un **PWM al 70%**, se deben calcular las cuentas para un ancho de pulso en alta (TH) y cuando está en baja (TL)

$$\text{Cuentas en TH} = 0.7 \times 750 = 525 \text{ cuentas} \quad (45)$$

$$\text{Cuentas en TL} = 750 - 525 = 225 \text{ cuentas} \quad (46)$$

Como el temporizador trabaja en modo de 16 bits, se procede a calcular las interrupciones

$$\text{Interrupciones en TMR1} = 2^{16} = 65536 = 0xFFFF \quad (47)$$

Las interrupciones para los registros de TMRH y TMR1L deberían ser:

$$\text{TMR1H} = 65536 - \text{TH} = 65536 - 525 = 65011 \quad (48)$$

$$\text{TMR1L} = 65536 - \text{TL} = 65536 - 225 = 65311 \quad (49)$$

3.1.3 Etapa ADC mediante el Módulo HX711 y linealización

La celda de carga presenta un arreglo de galgas extensiométricas en puente Wheatstone. Un circuito especializado en la medición de la diferencia de voltaje que causa el desbalance del arreglo tipo puente Wheatstone y disponible en el mercado es el circuito integrado HX711.

El HX711 presenta una salida del convertidor analógico digital de 24 bits a solicitud de un microcontrolador. Esta salida por defecto se presenta en complemento dos. Un método adecuado para restablecer el complemento a dos es aplicar una función XOR de la siguiente manera:

$$\text{Valor sin complemento a dos} = \text{ADC (24 BITS)} \text{ xor } 0x800000$$

Luego de obtener el valor sin complemento a dos, el siguiente paso es linealizarlo para poder mostrarlo en términos de valores de fuerza sobre un área conocida (resistencia mecánica). Para este paso se cuenta con pesas entre 10 g a 5 kg (figura), cada vez que se coloque una pesa sobre la plataforma de prueba el sistema electrónico muestra el valor crudo de la conversión analógica digital sin complemento a dos. Este par ordenado es (x,y) donde "x" es valor crudo de la conversión e "y" es peso colocado en la plataforma. Con dos pares es suficiente para calcular una ecuación de una recta y por consiguiente, obtener una linealización de valores que se muestra a continuación.



Figura 58: Pesas para calibración.
Elaboración: Los autores

$$Y - Y1 = m (X - X1)$$

Donde:

Y: Eje de las ordenadas

Y1: Punto en el eje de las ordenadas

m: Pendiente de la recta

X: Eje de las abscisas

X1: Punto en el eje de las abscisas

$$Y - 10 = \frac{100 - 10}{19 - 2} (X - 2) \quad (50)$$

$$Y = \left(\frac{90}{17}\right)X - \left(\frac{10}{17}\right) \quad (51)$$

Este valor obtenido es tomado en cuenta al realizar la programación en lenguaje Python en el Raspberry.

3.1.4 Secuencia de funcionamiento

Para el diseño se consideran elementos de protección como fines de carrera que permite que actuador lineal solo presente un desplazamiento intermedio sin tocar los limites inferiores y superior que pueden ocasionar daños al equipo.

El actuador lineal siempre de iniciar en la parte superior lo cual permite colocar el hueso sobre la plataforma. Para luego bajar y sujetar el hueso previo a la aplicación nominal de la fuerza.

También se ha previsto un estado de reconocimiento de fallas, que permite comprobar el correcto funcionamiento del sensor de fuerza, finales de carrera y el actuador lineal.

CAPÍTULO IV

DISEÑO

4.1 Especificaciones de diseño

- Se utilizó acero de 1" para la estructura que soporta la celda, el motor y los sensores de proximidad inductivos de CA. Para el tablero de control se utilizó acero de ½ ", dentro de este se encuentra ubicado el raspberry, microcontrolador, módulo ADC, puente H, las fuentes de 24 VDC, 5 VDC y dos relees de alterna.
- Para la protección del usuario, el recinto donde se realizan las pruebas es semicerrado, con una abertura de 24 cm para colocar la muestra (hueso de pollo).
- La estructura tiene una altura de 50 cm con una base cuyas dimensiones son de 20 cm x 21 cm.
- Si bien es cierto que la posición del hueso al realizar el proceso puede ser de forma vertical o horizontal sin tener una variación significativa en los resultados.

4.2 Limitaciones

- La estructura fue diseñada para ejecutar un ensayo por muestra.

4.3 Restricciones

- La celda de carga tiene un peso máximo de 80kg, ejercer más peso sobre ella podría descalibrar o dañar la misma.

- El diseño de las pistas de la tarjeta de control que contiene el microcontrolador solo soporta hasta 2 A.

4.4 Métodos de diseño

4.4.1 Diseño asistido por computadora de estructura mecánica

La estructura principal es de material de acero y que fue diseñada mediante el software de diseño AutoCAD 2018.

La estructura se acondicionó para incluir un área de prueba y un tablero de control donde se ubican los circuito y fuentes de alimentación. En el área de prueba, se encuentra una galga extensiométrica, el actuador eléctrico y un sensor de proximación.

El tablero de control cuenta con una puerta con un botón de seguridad, de igual manera está diseñado para poner la pantalla LCD de 7 pulgadas. En las figuras 59, 60, 61, 62 y 63 se observan el dibujo en CAD de la vista frontal, lateral izquierda y superior.

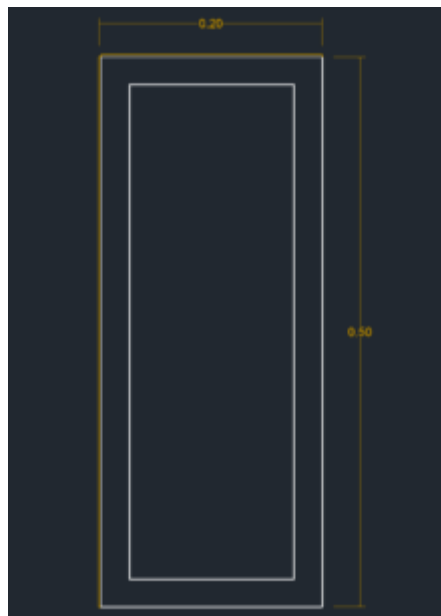


Figura 59: Vista frontal.
Elaboración: Los autores

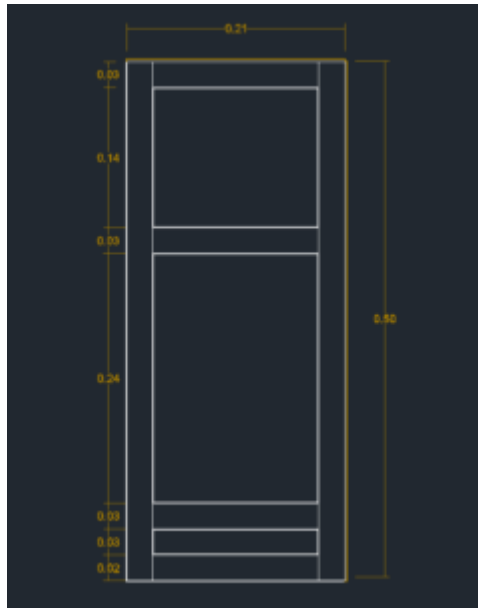


Figura 60: Vista lateral izquierda.
Elaboración: Los autores



Figura 61: Diseño Final.
Elaboración: Los autores



Figura 62: Área de prueba.
Elaboración: Los autores

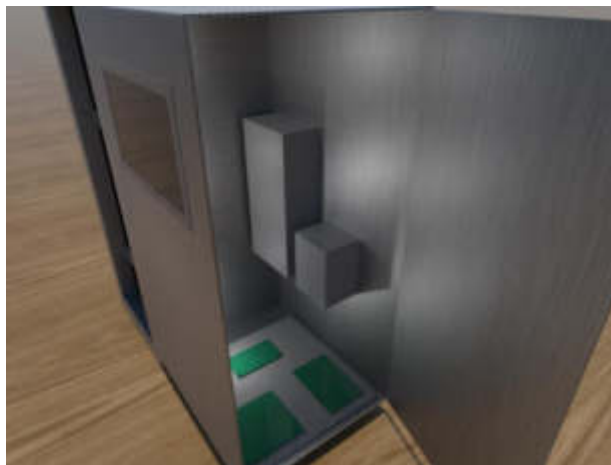


Figura 63: Tablero de control.
Elaboración: Los autores

4.4.2 Diseño del PCB

Se realizaron dos diseños de PBC a doble capa con material de fibra de vidrio para aumentar su tiempo de vida.

El primer diseño de PCB que se realizó contiene un microcontrolador 18f4550, un led, un botón de reset, condensadores y salidas para conexión con el módulo de puente H y el módulo HX711, en la figura 64 se muestra dicho diseño.

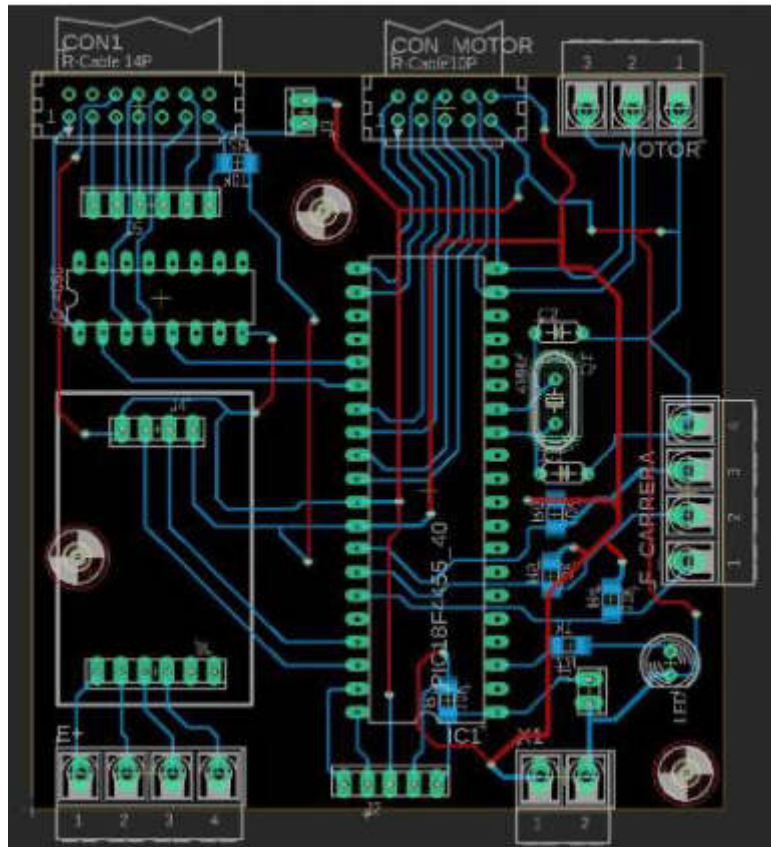


Figura 64: Diseño de PCB 1.
Elaboración: Los autores

En la figura 65, se observa el diseño de la segunda placa PCB, en el cual por medio de un conector flat se envía los datos entre el PIC 18f4550 y el módulo raspberry para que este sea mostrado por una pantalla LCD de 7”.

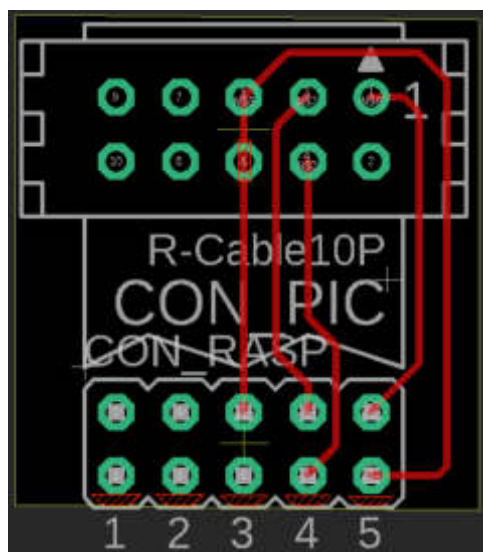


Figura 65: Diseño de PCB 2.
Elaboración: Los autores

4.4.3 Diseño del interfaz GUIDE del Raspberry

El desarrollo de la interfaz GUIDE en lenguaje Python ofrece muchas opciones de desarrollo, debido a esto se optó por usar el GUI TKINKER, además por su facilidad para crear aplicaciones GUI, interfaz rápida y estándar de Python. El sistema operativo Python incluye el kit de herramientas GUI de TK.

El paquete TKINKER para el desarrollo del GUI es una herramienta de fácil desarrollo para una mejor manipulación.

A continuación, se presenta los siguientes criterios para el desarrollo de la definitiva interfaz como podemos observar en la figura 66.

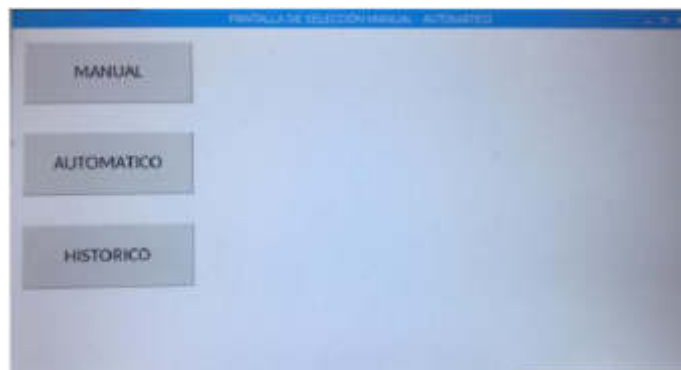


Figura 66: Interfaz GUI.
Elaboración: Los autores

Botón Manual:

Incluye dos botones, arriba y abajo, los cuales están diseñados para realizar pruebas sobre el funcionamiento y estado del actuador eléctrico (ver figura 67).

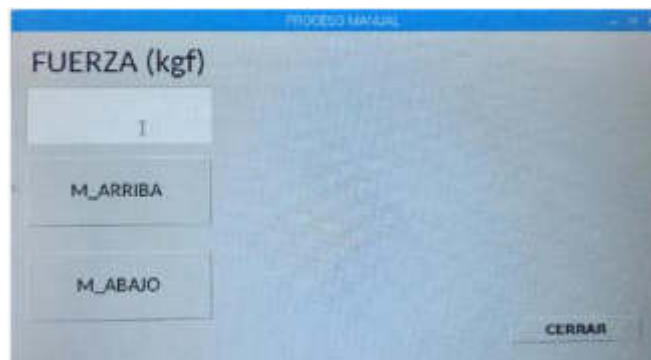


Figura 67: Interfaz GUI.
Elaboración: Los autores

Botón automático:

Busca el punto inicial el actuador eléctrico, colocándose en la parte superior. La interfaz muestra el nivel de fuerza en un cm^2 , de igual manera se encuentra el botón de inicio para empezar el proceso, ver figura 66.

Botón histórico:

Al terminar una prueba se pueden verificar los resultados mediante una gráfica la cual sirve para comparar el nivel de resistencia de cada prueba (ver figura 68).

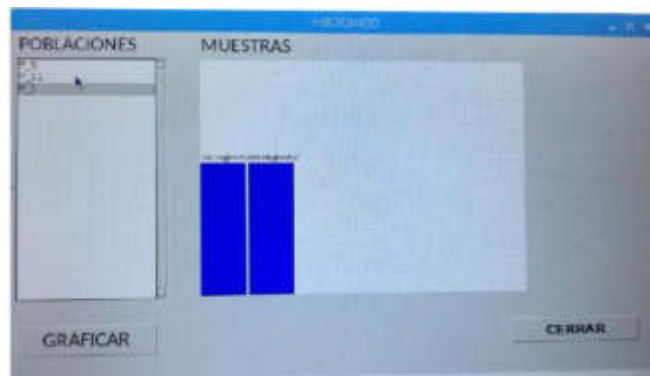


Figura 68: Interfaz GUI.
Elaboración: Los autores

En la figura 69, se aprecia un diagrama de flujo del proceso general, desde que se inicia el ensayo hasta que este culmine.

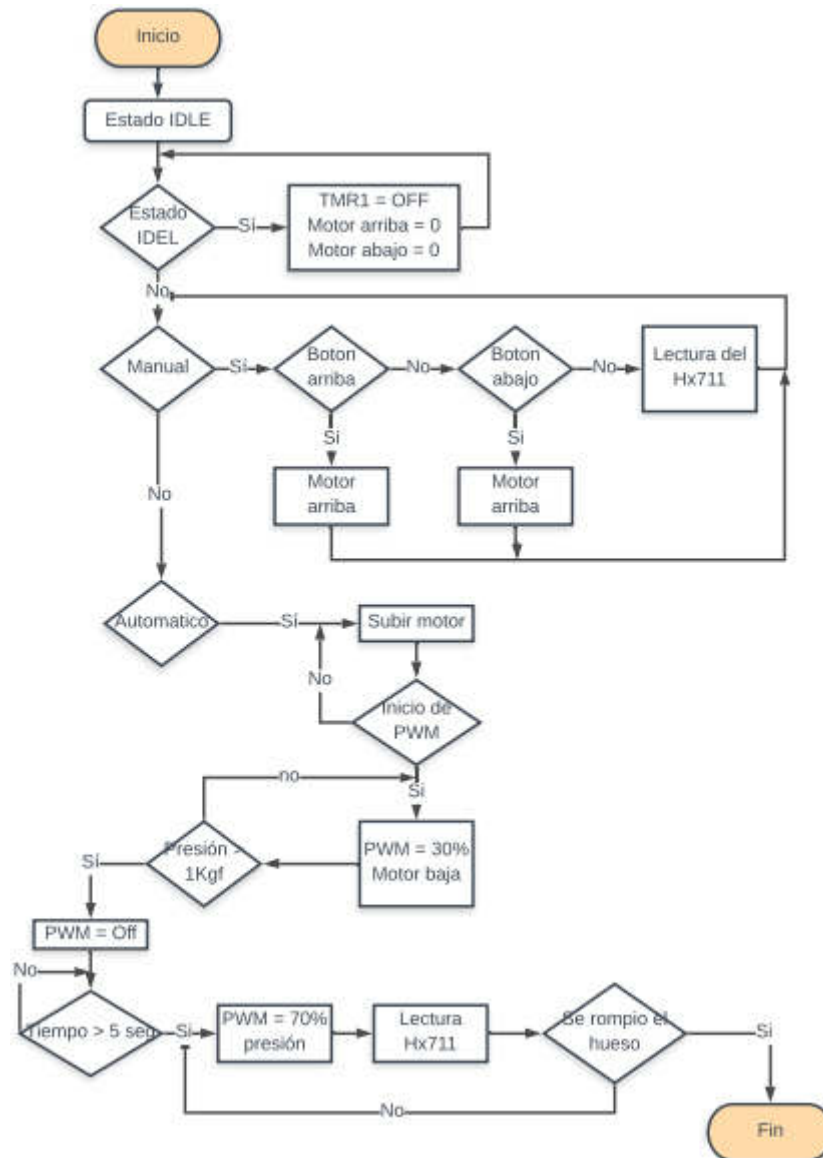


Figura 69: Diagrama de flujo general.
Elaboración: Los autores

4.5 Prototipo final

A continuación, se muestra el producto final (ver figuras 70, 71, 72, 73, 74):



Figura 70: Vista del prototipo final
Elaboración: Los autores



Figura 71: Vista del prototipo final
Elaboración: Los autores



Figura 72: Vista del prototipo final
Fuente: Propia



Figura 73: Vista del prototipo final
Elaboración: Los autores



Figura 74: Vista del prototipo final
Elaboración: Los autores

CAPÍTULO V PRUEBAS, VALIDACIONES Y RESULTADOS

5.1 Pruebas y validaciones

5.1.1 Validaciones de la celda de carga

Para realizar las validaciones de la celda de carga, se utilizaron pesas reglamentarias de 200 gr, 500gr (ver figura 58) y pesas de 2kgr a 3kgr (ver figura 75 y 76) para obtener la tabla 16.

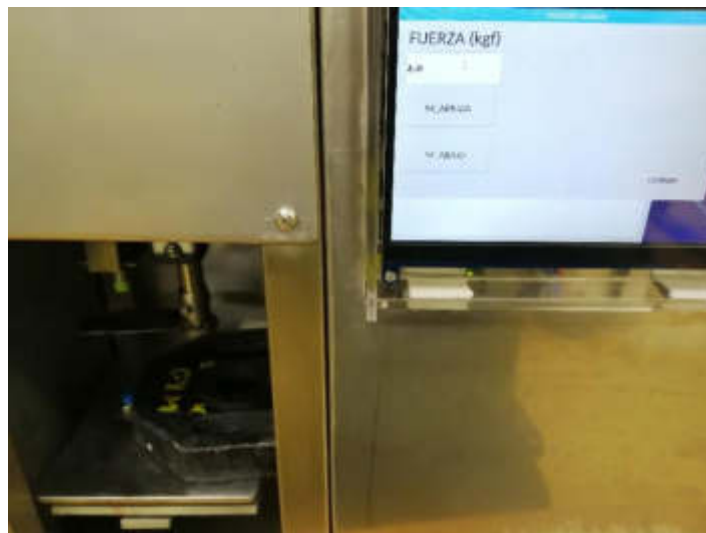


Figura 75: Pesa de 2 kg calculado en el Prototipo.
Elaboración: Los autores



Figura 76: Pesa de 3 kg calculado en el Prototipo.
Elaboración: Los autores

Tabla 16: Peso de la conversión y pesos calculados

Pesas	Peso a la conversión ADC	Valores de la balanza OPALUX	Voltaje (Multímetro Fluke)
1 kg	1.00. kg	1.00. kg	0.331 volt.
2 kg	1.95 kg	1.95 kg	0.346 volt.
3 kg	2.90 kg	2.90 kg	0.350 volt.
4 kg	3.90 kg	3.80 kg	0.371 volt.
5 kg	5.00 kg	5.00 kg	0.375 volt.
6 kg	5.95 kg	5.65 kg	0.375 volt.
7 kg	6.95 kg	6.76 kg	0.386 volt.
8 kg	7.95 kg	7.60 kg	0.397 volt.

Elaboración: Los autores

5.1.2 Pruebas del prototipo

Las pruebas se realizaron en el laboratorio de la Facultad de Zootecnia de la Universidad Agraria La Molina a cargo del Doctor Carlos Vílchez. Se hizo uso del equipo Digital Force Gauge Modelo FH 1K (ver figura 77) y su estructura (ver figura 78) el cual funciona de forma manual, haciendo uso de un volante lo cual al girar aplicando una presión a la muestra de ensayo. La estructura que contiene una galga tipo S en la parte superior el cual captura la

señal de la fuerza ejercida en un área de 1 cm² a la muestra de ensayo y esta es mostrada en el equipo Digital Force Gauge Modelo FH 1K.



Figura 77: Digital Force Gauge Modelo FH 1K.
Fuente: Laboratorio de la Facultad de Zootecnia



Figura 78: Estructura para realizar el cálculo de resistencia ósea compatible con el Digital Force Gauge Modelo FH 1K.
Fuente: Laboratorio de la Facultad de Zootecnia

La muestra de ensayo solo puede usarse una vez por prueba, puesto que al aplicar una fuerza sobre esta se deforma y rompe. Al realizarse pruebas con muestras de ensayo diferentes los resultados obtenidos variarían según las propiedades físicas en cada una de ellas; forma, longitud, volumen, área, entre otros, por lo cual el procedimiento será el de realizar una cantidad de 50 pruebas con el equipo Digital Force Gauge Modelo FH 1K y el prototipo diseñado, con muestras de ensayo del mismo material.

El objetivo de realizar las pruebas es poder ver la variación de los resultados por cada tipo de material al cual se le aplica una fuerza. Estos variaron según la estructura de la muestra, pero al ser una cantidad considerable se puede obtener gráficas estadísticas y así comparar los resultados con el prototipo diseñado.

5.1.2.1 Pruebas con varillas de madera balsa

Para las pruebas se utilizaron varillas de madera balsa (ver figura 79) con una longitud de 6cm y un diámetro de 5mm y 6 mm, similar que una tibia o fémur de pollo broiler de 21 días que se usan para las investigaciones.



Figura 79: Muestras de madera
Elaboración: Los autores

La madera balsa al ser un material liviano se asemeja mucho al de una tibia o fémur de pollo broiler de 21 días (ver figura 80) e incluso es más fácil de adquirir para realizar una cantidad considerable de pruebas.



Figura 80: Comparación entre tibia de pollo y madera prensada
Elaboración: Los autores

5.1.2.2 Pruebas con huesos de pollo

De igual manera, se realizaron las pruebas con las tibias de pollo broiler de 21 días de edad (ver figura 81) las cuales tienen una longitud aproximada de entre 5 a 7cm y un diámetro de 7 mm.



Figura 81: Tibia de pollo broiler.
Fuente: Laboratorio de la Facultad de Zootecnia

5.2 Resultados

5.2.1 Resultados con varillas de madera balsa de 5 mm

En la tabla 17, se muestran los resultados de las 50 pruebas realizadas con varillas de maderas de 6cm de longitud y 5mm de diámetro.

Tabla 17: Fuerza Aplicada para la ruptura del material

N° de Muestra	FUERZA APLICADA PARA LA RUPTURA DEL MATERIAL (kgF/cm ²)	
	Resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	Resultados obtenidos por el Prototipo
1	28.92	29.26
2	12.94	22.23
3	16.47	25.96
4	25.19	13.54
5	10.38	28.13
6	16.45	21.74
7	18.28	17.84

8	11.15	16.51
9	18.67	20.92
10	18.23	18.66
11	18.47	11.70
12	11.12	27.92
13	21.91	21.98
14	20.78	21.92
15	24.74	29.35
16	24.74	13.92
17	19.23	19.23
18	20.17	14.23
19	12.23	24.98
20	21.43	22.26
21	24.55	13.78
22	24.93	21.48
23	19.79	16.83
24	24.73	31.25
25	15.21	12.22
26	29.53	22.38
27	14.43	18.41
28	25.51	19.42
29	18.35	22.40
30	28.70	18.56
31	21.76	21.53
32	25.66	11.26
33	16.20	26.77
34	20.51	29.59
35	21.28	16.43
36	19.27	21.17
37	17.21	20.38
38	28.59	19.66
39	32.45	21.18
40	15.87	18.83
41	18.52	17.26
42	28.72	17.49
43	15.13	19.34
44	22.35	20.61
45	17.23	17.94
46	16.96	19.34
47	24.76	23.36
48	23.92	23.97
49	24.24	24.61
50	25.58	31.15

Elaboración: Los autores

Los resultados obtenidos en la tabla 16 se ordenaron de forma ascendente puesto que el orden de estos no altera la media aritmética y el cual nos proporciona una gráfica de tendencia ordenada.

En el siguiente gráfico (ver figura 82), se muestran los resultados en ambos equipos y la tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material en kgF/cm² para las 50 pruebas en ambos equipos:



Figura 82: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material
Elaboración: Los autores

Con los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K en la tabla 16, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 18):

Tabla 18: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[10.00 - 15.00]	6
[15.10 - 20.00]	18
[20.10 - 25.00]	16
[25.10 - 30.00]	9
[30.10 - 35.00]	1

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 83).

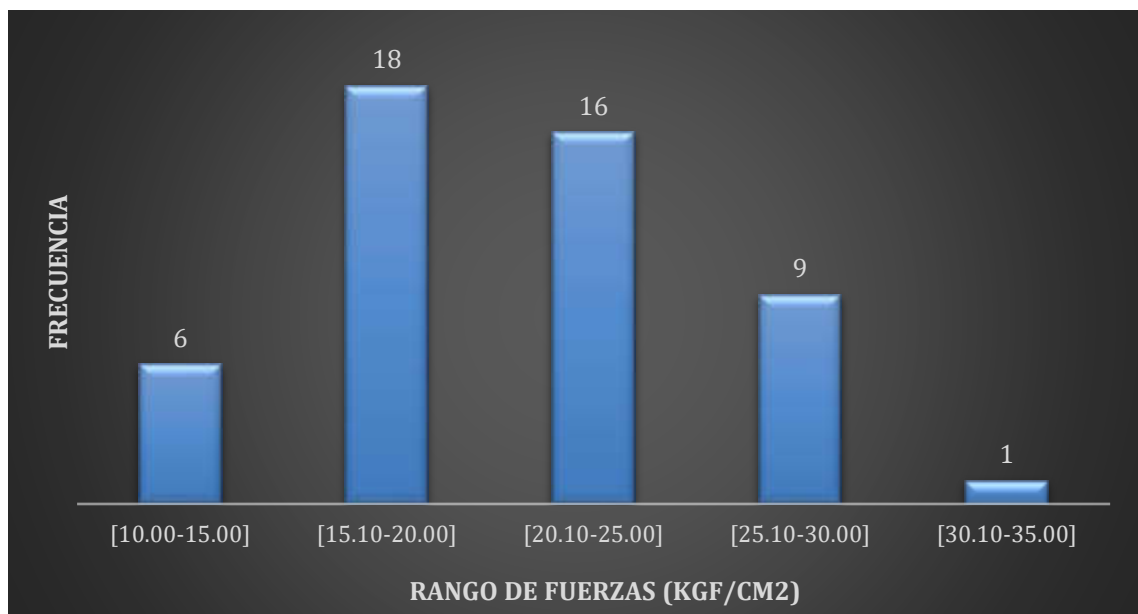


Figura 83: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K
Elaboración: Los autores

De igual manera con los resultados obtenidos por el Prototipo en la tabla 16, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 19):

Tabla 19: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Prototipo

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[10.00 - 15.00]	7
[15.10 - 20.00]	16
[20.10 - 25.00]	18
[25.10 - 30.00]	7
[30.10 - 35.00]	2

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 84).

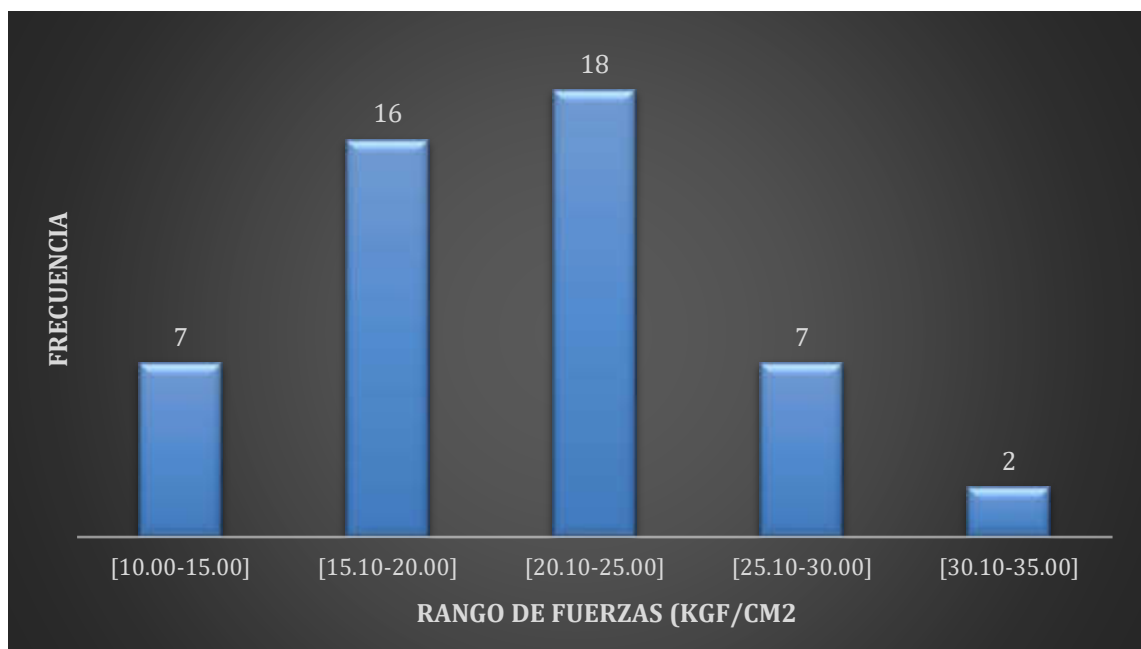


Figura 84: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo
Elaboración: Los autores

Según los histogramas de la figura 83 y 84 se puede apreciar que la tendencia de los resultados de la fuerza aplicada se encuentra entre los rangos de 15.10 a 25 kgF/cm², teniendo una similitud en los resultados de ambos equipos.

Se puede comprobar al calcular la media aritmética en ambos resultados y su porcentaje de error:

$$\text{Promedio } X1 = \frac{\sum \text{de los 50 resultados obtenidos por el DFG - FH1K}}{50}$$

$$\text{Promedio } X1 = 20.67 \text{ kgF/cm}^2$$

$$\text{Promedio } Y1 = \frac{\sum \text{de los 50 resultados obtenidos por el Prototipo}}{50}$$

$$\text{Promedio } Y1 = 20.82 \text{ kgF/cm}^2$$

Con los promedios X1 y Y1 se calcula el % de error:

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Valor Aproximado} - \text{Valor Real}|}{\text{Valor Real}} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{|20.67 - 20.82|}{20.82} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = 0.72 \%$$

5.2.2 Resultados con varillas de madera balsa de 6 mm

En la tabla 20 se muestra los resultados de las 50 pruebas realizadas con varillas de maderas de 6cm de longitud y 6mm de diámetro.

Tabla 20: Fuerza Aplicada para la ruptura del material

N° de Muestra	FUERZA APLICADA PARA LA RUPTURA DEL MATERIAL (kgF/cm ²)	
	Resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	Resultados obtenidos por el Prototipo
1	39.00	33.50
2	20.25	43.20
3	50.30	34.10
4	35.00	23.80
5	14.00	15.80
6	36.45	44.40
7	32.90	26.00
8	33.20	39.55
9	36.20	23.50
10	30.80	33.12
11	32.90	34.47
12	35.15	14.50
13	36.65	19.80
14	32.90	31.50
15	25.25	24.90
16	28.05	37.84
17	32.40	39.61
18	36.35	36.90
19	26.35	41.70
20	28.85	36.75
21	28.25	37.97
22	27.70	32.79
23	29.35	38.46
24	26.45	37.90
25	37.95	34.50
26	37.95	27.00
27	35.20	31.68
28	37.90	37.20
29	35.00	33.44
30	37.65	25.30
31	38.65	26.40
32	43.87	54.50
33	39.10	45.30
34	32.95	32.47
35	44.55	25.10
36	44.50	35.50
37	38.65	33.60
38	32.25	35.10
39	43.85	30.50
40	39.10	29.80
41	38.95	21.80

42	30.60	26.17
43	30.00	26.81
44	37.55	29.68
45	31.95	25.63
46	24.15	39.40
47	30.80	35.20
48	26.40	32.84
49	27.10	30.65
50	23.85	32.50

Elaboración: Los autores

Los resultados obtenidos, en la tabla 20, se ordenaron de forma ascendente puesto que el orden de estos no altera la media aritmética y el cual nos proporciona una gráfica de tendencia ordenada.

En el siguiente gráfico (ver figura 85), se muestran de los resultados, en ambos equipos, y la tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material en kgF/cm² para las 50 pruebas en ambos equipos:

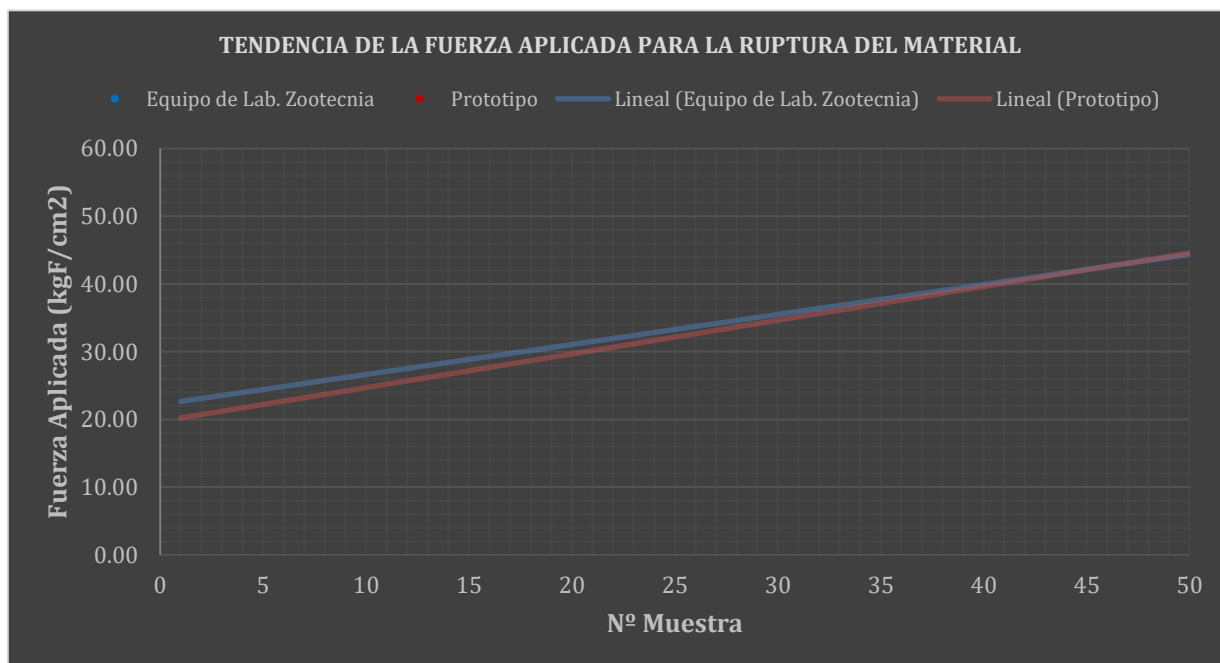


Figura 85: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material
Elaboración: Los autores

Con los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K en la tabla 20, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 21):

Tabla 21: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[10.00 - 15.00]	1
[15.10 - 20.00]	0
[20.10 - 25.00]	3
[25.10 - 30.00]	11
[30.10 - 35.00]	13
[35.10 - 40.00]	17
[40.10 - 45.00]	4
[45.10 - 50.00]	0
[50.10 - 55.00]	1

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 86).

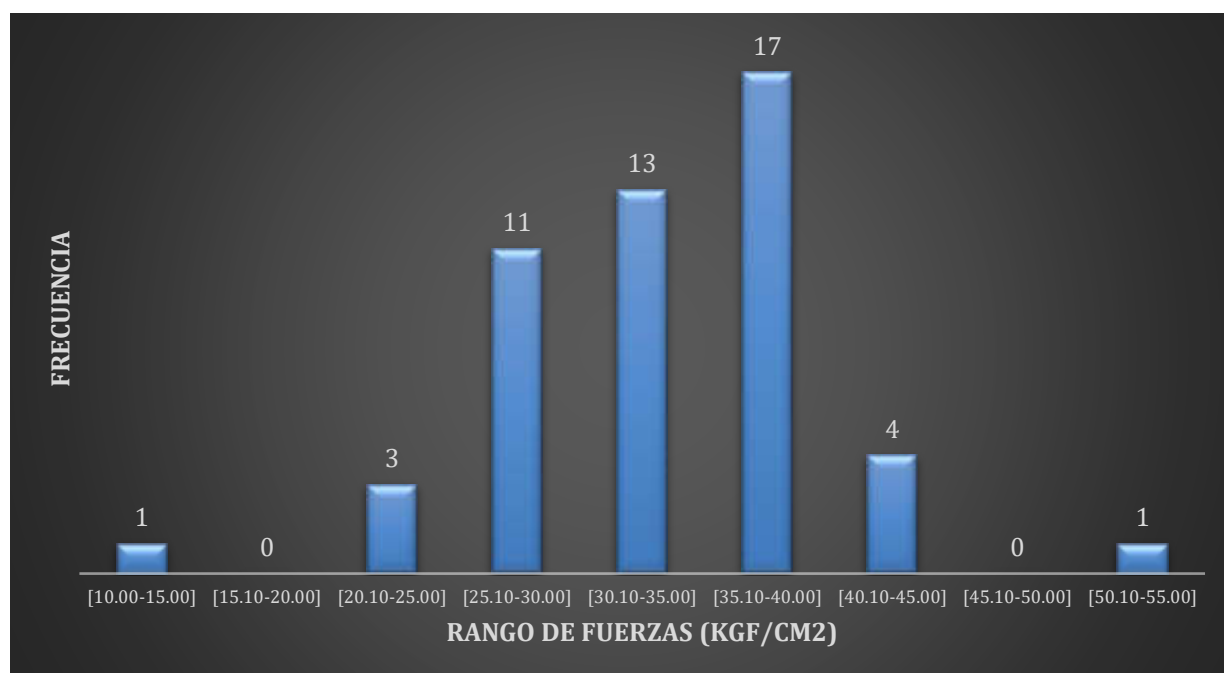


Figura 86: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K
Elaboración: Los autores

De igual manera con los resultados obtenidos por el Prototipo en la tabla 20, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 22):

Tabla 22: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Prototipo

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[10.00 - 15.00]	1
[15.10 - 20.00]	2
[20.10 - 25.00]	4
[25.10 - 30.00]	10
[30.10 - 35.00]	15
[35.10 - 40.00]	13
[40.10 - 45.00]	3
[45.10 - 50.00]	1
[50.10 - 55.00]	1

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 87).

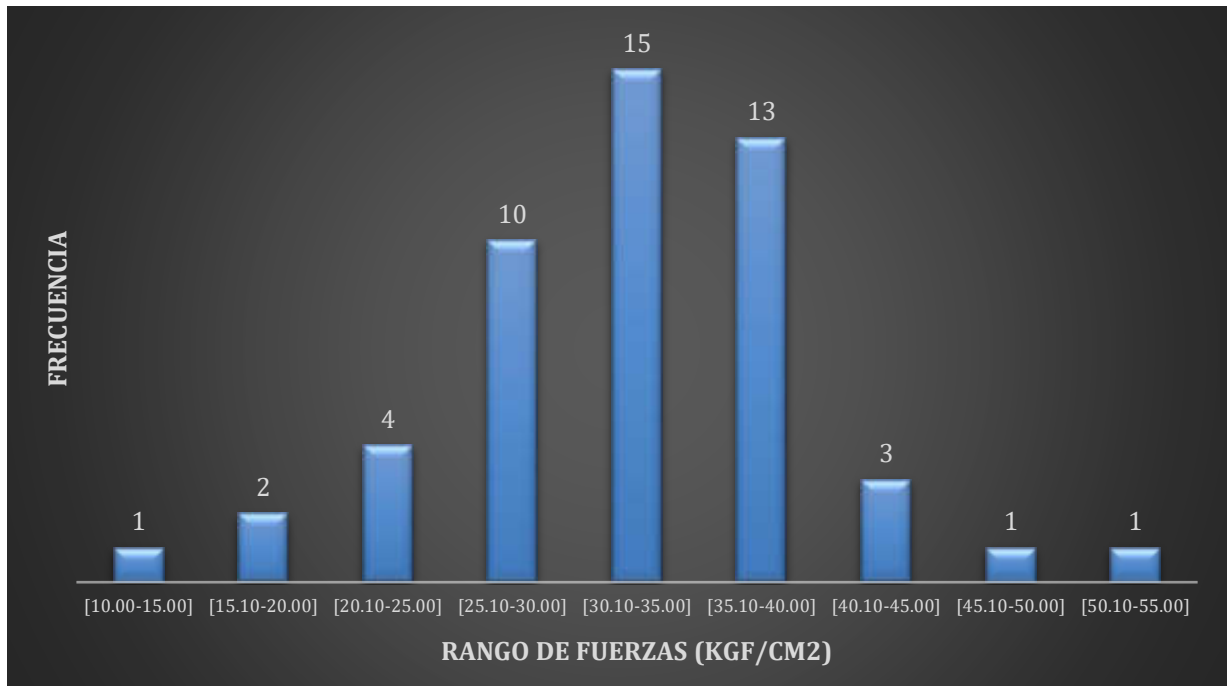


Figura 87: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo
Elaboración: Los autores

Según los histogramas de la figura 80 y 81 se puede apreciar que la tendencia de los resultados de la fuerza aplicada se encuentra entre los rangos de 25.10 a 40 kgF/cm², teniendo una similitud en los resultados de ambos equipos.

Se puede comprobar al calcular la media aritmética en ambos resultados y su porcentaje de error:

$$\text{Promedio } X2 = \frac{\sum \text{de los 50 resultados obtenidos por el DFG - FH1K}}{50}$$

$$\text{Promedio } X2 = 33.50 \text{ kgF/cm}^2$$

$$\text{Promedio } Y2 = \frac{\sum \text{de los 50 resultados obtenidos por el Prototipo}}{50}$$

$$\text{Promedio } Y2 = 32.40 \text{ kgF/cm}^2$$

Con los promedios X2 y Y2 se calcula el % de error:

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Valor Aproximado} - \text{Valor Real}|}{\text{Valor Real}} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{|32.40 - 33.50|}{33.50} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = 3.29 \%$$

5.2.3 Resultados con tibia de pollos de 21 días de edad – Población 1

En la tabla 23, se muestran los resultados de las 20 pruebas realizadas con tibias de pollo de 21 días de edad, la cual pertenece a la población N° 1.

Tabla 23: Fuerza Aplicada para la ruptura del material

N° de Muestra	FUERZA APLICADA PARA LA RUPTURA DEL MATERIAL (kgF/cm ²)	
	Resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	Resultados obtenidos por el Prototipo
1	26.30	28.45
2	27.45	27.64
3	31.25	28.65
4	27.50	24.85
5	25.35	29.15
6	34.30	39.15
7	29.55	32.74
8	21.60	31.85
9	28.05	30.80
10	46.25	27.20
11	30.40	31.97
12	35.65	41.58
13	22.05	37.20
14	37.55	29.70
15	46.55	31.95
16	45.65	35.20
17	33.50	38.48
18	28.25	40.75
19	28.55	24.75
20	39.25	42.45

Elaboración: Los autores

Los resultados obtenidos, en la tabla 23, se ordenaron de forma ascendente puesto que el orden de estos no altera la media aritmética que nos proporciona una gráfica de tendencia ordenada.

En el siguiente gráfico (ver figura 88), se muestran los resultados en ambos equipos y la tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material en kgF/cm² para las 20 pruebas en ambos equipos:

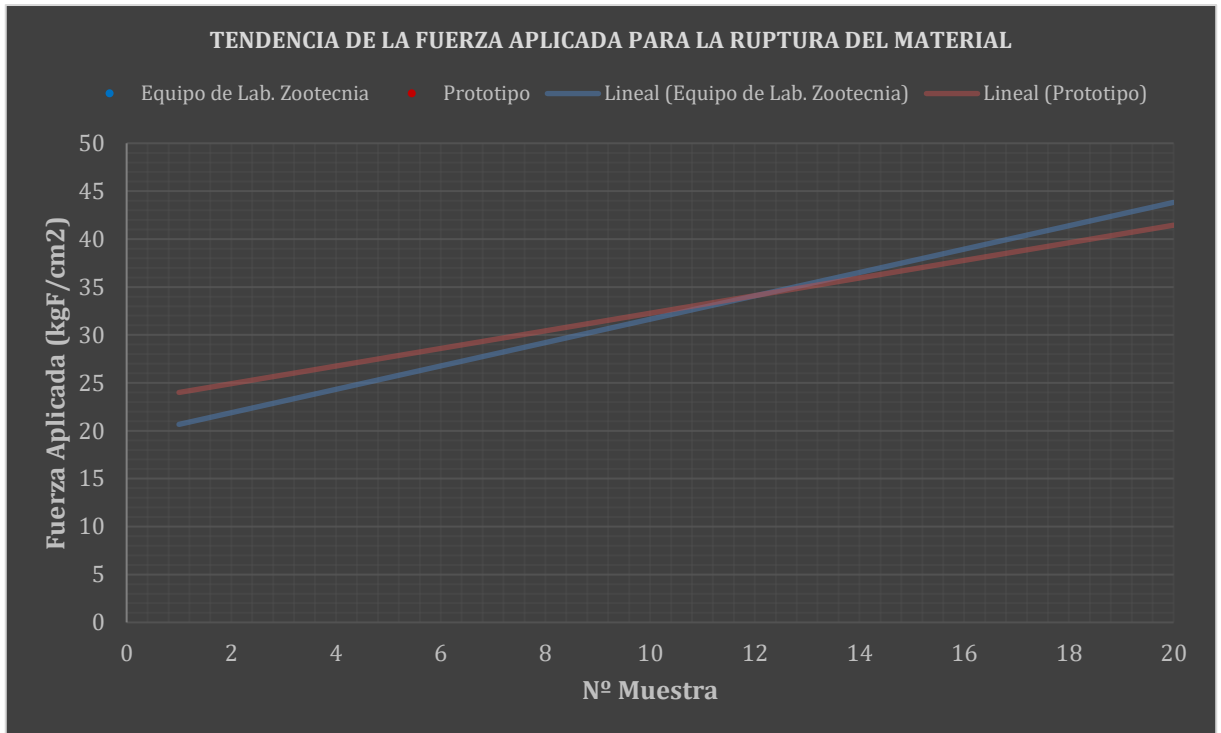


Figura 88: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material
Elaboración: Los autores

Con los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K en la tabla 23, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 24):

Tabla 24: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[20.10 - 25.00]	2
[25.10 - 30.00]	8
[30.10 - 35.00]	4
[35.10 - 40.00]	3
[40.10 - 45.00]	0
[45.10 - 50.00]	3

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 89).

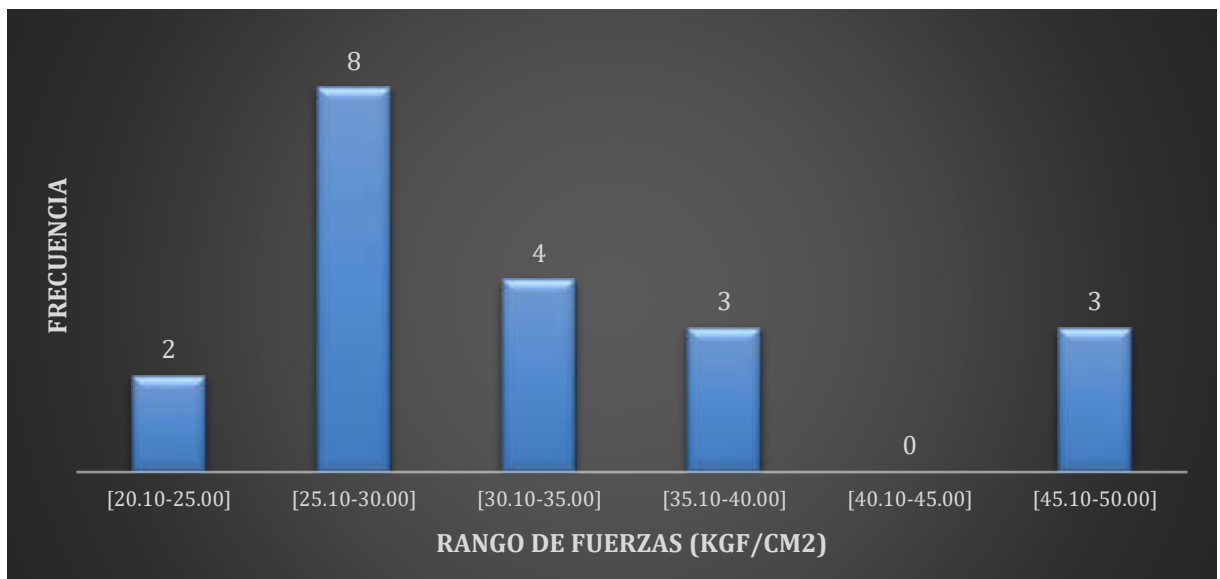


Figura 89: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K
Elaboración: Los autores

De igual manera con los resultados obtenidos por el Prototipo en la tabla 23, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 24):

Tabla 24: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Prototipo

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[20.10 - 25.00]	2
[25.10 - 30.00]	6
[30.10 - 35.00]	5
[35.10 - 40.00]	4
[40.10 - 45.00]	2
[45.10 - 50.00]	1

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 90).

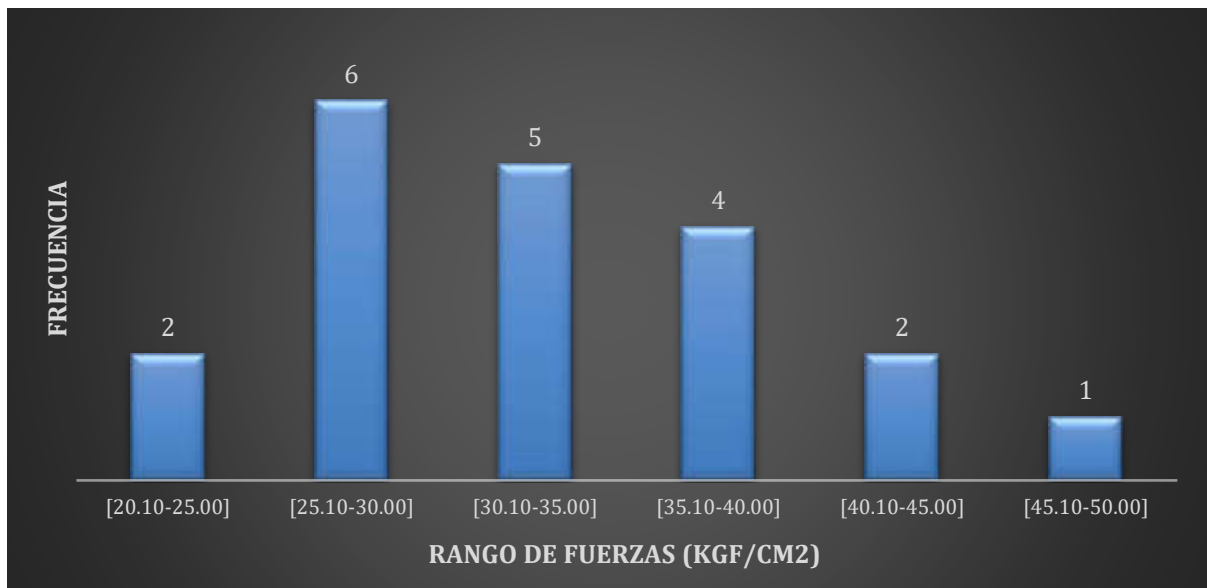


Figura 90: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo
Elaboración: Los autores

Según los histogramas de la figura 89 y 90, se puede apreciar que la tendencia de los resultados de la fuerza aplicada se encuentra entre los rangos de 25.10 a 40 kgF/cm², teniendo una similitud en los resultados de ambos equipos.

Se puede comprobar al calcular la media aritmética en ambos resultados y su porcentaje de error:

$$\text{Promedio X3} = \frac{\sum \text{de los 20 resultados obtenidos por el DFG - FH1K}}{20}$$

$$\text{Promedio X3} = 32.25 \text{ kgF/cm}^2$$

$$\text{Promedio Y3} = \frac{\sum \text{de los 20 resultados obtenidos por el Prototipo}}{20}$$

$$\text{Promedio Y3} = 32.73 \text{ kgF/cm}^2$$

Con los promedios X3 y Y3 se calcula el % de error:

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Valor Aproximado} - \text{Valor Real}|}{\text{Valor Real}} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{|32.73 - 32.25|}{32.25} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = 1.47 \%$$

5.2.4 Resultados con tibia de pollos de 21 días de edad – Población 2

En la tabla 25, se muestran los resultados de las 20 pruebas realizadas con tibias de pollo de 21 días de edad, la cual pertenece a la población N° 2.

Tabla 25: Fuerza Aplicada para la ruptura del material

N° de Muestra	FUERZA APLICADA PARA LA RUPTURA DEL MATERIAL (kgF/cm ²)	
	Resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K	Resultados obtenidos por el Prototipo
1	44.35	50.52
2	42.45	31.45
3	50.85	36.65
4	55.50	47.24
5	38.30	54.80
6	27.15	38.15
7	34.70	23.60

8	39.80	55.40
9	42.70	25.15
10	34.35	41.85
11	45.40	29.05
12	34.85	30.10
13	34.30	47.65
14	28.15	40.05
15	26.50	28.60
16	37.25	41.40
17	32.20	30.85
18	24.45	43.20
19	52.45	38.90
20	29.60	27.15

Elaboración: Los autores

Los resultados obtenidos en la tabla 25 se ordenaron de forma ascendente puesto que el orden de estos no altera la media aritmética y el cual nos proporciona una gráfica de tendencia ordenada.

En el siguiente gráfico (ver figura 91), se muestran de los resultados en ambos equipos y la tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material en kgF/cm² para las 20 pruebas en ambos equipos:

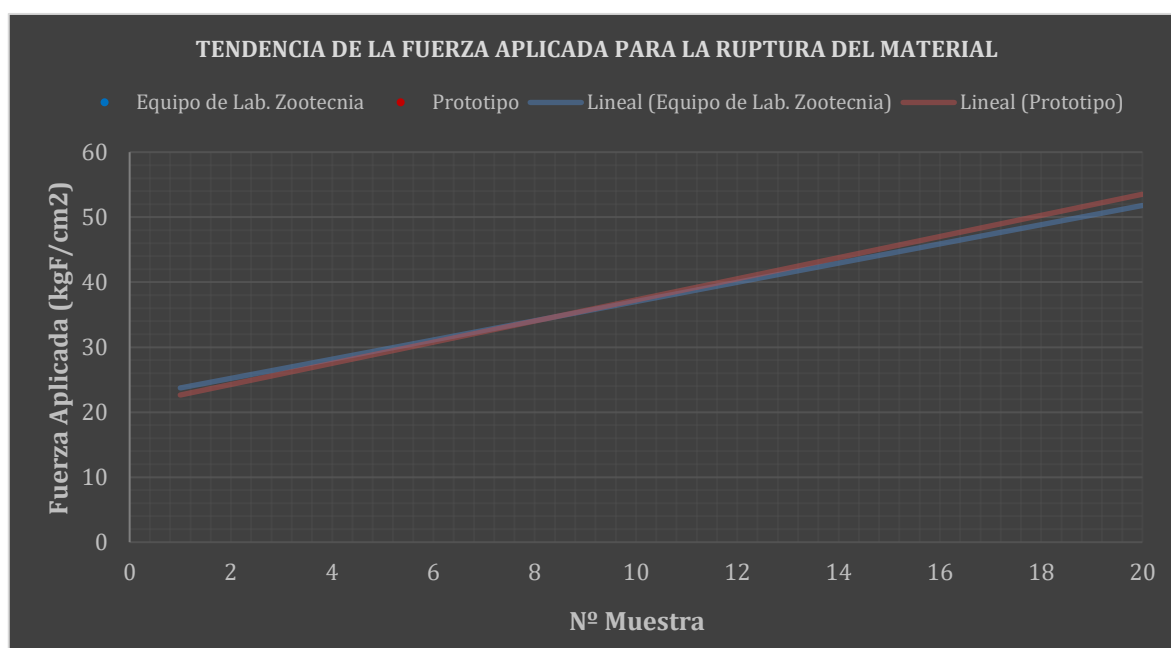


Figura 91: Tendencia de la fuerza aplicada para la ruptura del material
Elaboración: Los autores

Con los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K en la tabla 25, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 26):

Tabla 26: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[20.10 - 25.00]	1
[25.10 - 30.00]	4
[30.10 - 35.00]	5
[35.10 - 40.00]	3
[40.10 - 45.00]	3
[45.10 - 50.00]	1
[50.10 - 55.00]	2
[55.10 - 60.00]	1

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 92).

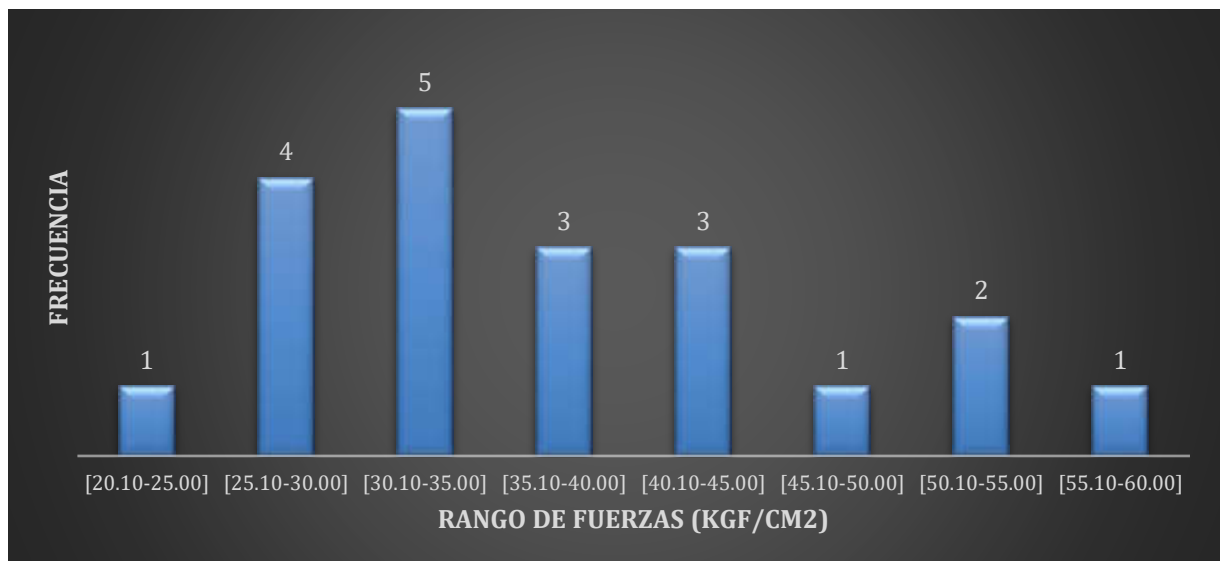


Figura 92: Histograma de los resultados obtenidos por el Digital Force Gauge Modelo FH 1K
Elaboración: Los autores

De igual manera con los resultados obtenidos por el Prototipo en la tabla 25, se realizó una tabla con la distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada para la ruptura del material (ver tabla 27):

Tabla 27: Distribución de frecuencia de los rangos de fuerza aplicada obtenidos por el Prototipo

Rangos de fuerza aplicada (kgF/cm ²)	Frecuencia
[20.10 - 25.00]	1
[25.10 - 30.00]	4
[30.10 - 35.00]	3
[35.10 - 40.00]	3
[40.10 - 45.00]	4
[45.10 - 50.00]	2
[50.10 - 55.00]	2
[55.10 - 60.00]	1

Elaboración: Los autores

A continuación, se muestra un histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo con su distribución de frecuencia para cada rango de fuerza (ver figura 93).

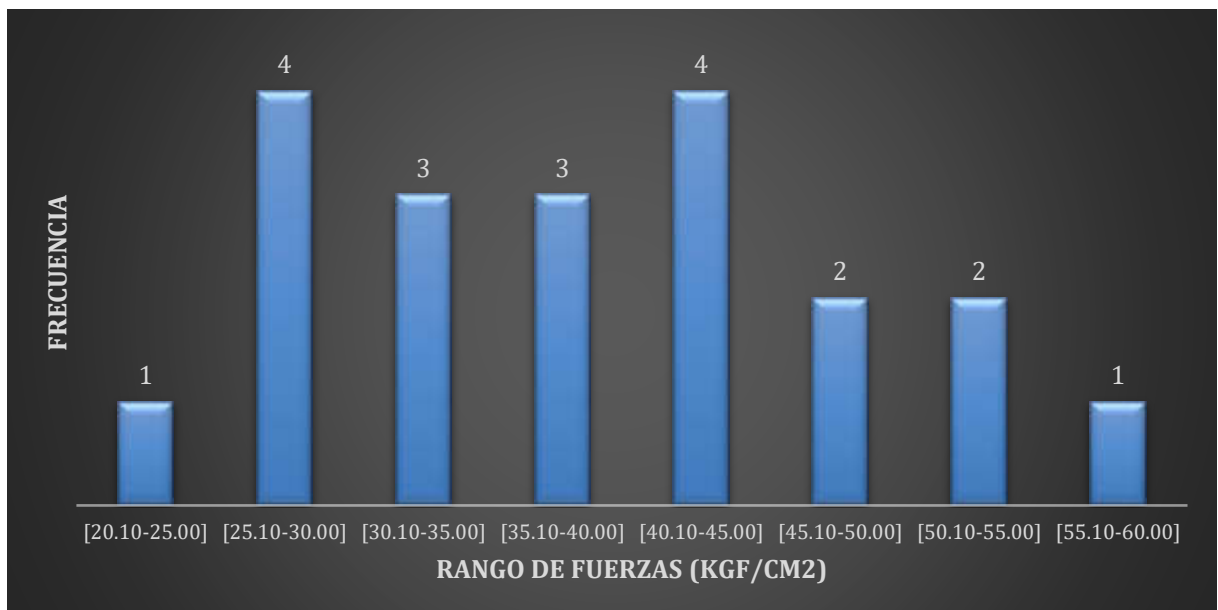


Figura 93: Histograma de los resultados obtenidos por el Prototipo
Elaboración: Los autores

Según los histogramas de la figura 92 y 93, se puede apreciar que la tendencia de los resultados de la fuerza aplicada se encuentra entre los rangos de 25.10 a 45 kgF/cm², teniendo una similitud en los resultados de ambos equipos.

Se puede comprobar al calcular la media aritmética en ambos resultados y su porcentaje de error:

$$\text{Promedio X4} = \frac{\sum \text{de los 20 resultados obtenidos por el DFG - FH1K}}{20}$$

$$\text{Promedio X4} = 37.77 \text{ kgF/cm}^2$$

$$\text{Promedio Y4} = \frac{\sum \text{de los 20 resultados obtenidos por el Prototipo}}{20}$$

$$\text{Promedio Y4} = 38.09 \text{ kgF/cm}^2$$

Con los promedios X4 y Y4 se calcula el % de error:

$$\% \text{ Error} = \frac{|\text{Valor Aproximado} - \text{Valor Real}|}{\text{Valor Real}} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = \frac{|38.09 - 37.77|}{37.77} \times 100$$

$$\% \text{ Error} = 0.86 \%$$

CONCLUSIONES

1. El prototipo cumple con el objetivo de calcular la resistencia ósea de pollo y puede ser adecuado para realizar el mismo proceso con otro tipo de elemento.
2. El tiempo para realizar el proceso para cada prueba es independiente de la capacidad humana puesto que proceso es totalmente automatizado.
3. Otro aspecto importante para que el prototipo sea funcional es la menor interacción con el usuario al momento de realizar las pruebas.
4. La resistencia calculada en las maderas como en los huesos puede variar por su composición física; sin embargo, el promedio de una cierta cantidad de pruebas refleja la tendencia de los resultados.

RECOMENDACIONES

1. Para realizar el proceso de pruebas y validaciones, se recomienda no tomar resultados de forma individual debido a que no se podría apreciar la tendencia de los resultados.
2. Por ser un proyecto que entra al campo de la resistencia de materiales, se recomienda realizar ensayos aplicando técnicas como elementos finitos para convalidar de forma más exacta los resultados obtenidos en los ensayos.
3. Al ser un prototipo que puede adecuarse a realizar el mismo proceso, pero con otros elementos, se recomienda agregar en el interfaz una sección donde se pueda elegir el tipo de material a usar como prueba y en base de eso modificar el PWM para variar la fuerza aplicada del motor actuador.

FUENTES DE INFORMACIÓN

Bibliograficas:

Bolton, W. (2013). *Mecatrónica: Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica un enfoque multidisciplinario*. (5^o ed.) México, D.F.: Alfaomega Grupo Editor

Electrónicas:

Achdjian H. Hasan A. (2015) Effect of bone density on the compressive mechanical properties of bovine trabecular bone. 213 – 216. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7323290/authors#authors>

Avia Semiconductor. 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7323290/authors#authors>

Dan Mihai Ștefănescu (2011). Strain gauges and Wheatstone bridges — Basic instrumentation and new applications for electrical measurement of non-electrical quantities. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5767428>

Duran P. A., Nieto R. L., Correa B. M. & A. S. (2016). *Evaluación mecánica del material de osteosíntesis bioabsorbible para cirugía de mano*. Revista colombiana de cirugía plástica y reconstructiva, 22 (2) Recuperado de: <https://www.ciplastica.com/ojs/index.php/rccp/article/view/23>

Forero, J. A., Henao, F. A. & Moncada, D. M. (2007). *Laboratorio de simulación y ensayos para resistencia de materiales. Avances. Investigación en Ingeniería.* 4 (6), 95-102. Recuperado de: http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-6/r6_art9.pdf

Geekbot Electronics. *Motores DC, Geekbot Electronics.* Recuperado de: <http://www.geekbotelectronics.com/motores-de-dc/>

Guede, D., González, P., & Caeiro, J.R. (2013). Biomecánica y hueso (I): Conceptos básicos y ensayos mecánicos clásicos. *Revista de Osteoporosis y Metabolismo Mineral*, 5 (1), 43-50. Recuperado de: <https://dx.doi.org/10.4321/S1889-836X2013000100008>

Güerri R. C. & Díez P. A. (2011). *La medición directa de la resistencia mecánica ósea.* Reumatología Clínica, ISSN 3 (7), 154 – 155. Recuperado de: <https://www.reumatologiaclinica.org/es-pdf-S1699258X11000416>

Harada A. Sakai R. Miyasaka K. Suzuki H. Ohtsuka T. Yoshikawa Y. Matsuyama J. Ohnishi I. Nakamura K. (2007), 2A-1 A New Method for Measuring Bone Strength using Echo-Tracking. 13 – 16. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4151874/authors#authors>

Havitcioglu A., Cecen B., Baktiroglu C., Eduran D. y Karakasli E. The biomechanical properties of meniscus. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5130364/authors#authors>

León H, C. (2017). *Anuario Estadístico de la Producción Pecuaria y Avícola.* Recuperado de: <http://siea.minagri.gob.pe/siea/?q=publicaciones/boletin-estadistico-mensual-de-la-produccion-y-comercializacion-avicola>

Manarvi Irfan (2016), An investigation of animal and human bones for predicting probable location of fractures. 2194 – 2197. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7591164>

- Mercado, C., Esparza, J. & Romero, V. (2006). *Bascula Electrónica Controlada con PIC 16F873*. (Tesis de grado, Universidad Autónoma de Zacatecas). Recuperado de: <https://studylib.es/doc/7764996/bascula-electr%C3%B3nica-controlada-con-pic16f873---inicio>
- Ministerio de Agricultura. (2019). *Boletín Estadístico Mensual de la Producción y Comercialización Avícola*. Recuperado de <http://siea.minagri.gob.pe/siea/sites/default/files/produccion-comercializacion-avicola-feb19-100419.pdf>
- Monroy J., M., Díaz A, A. & Fabio A., H. (2009). *Instrumentación del equipo de laboratorio de resistencia de materiales para ensayos dinámicos a flexión de probetas ranuradas*. Scientia Et Technica. 15 (41), 352-356. Recuperado de: <http://revistas.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/viewFile/2871/1633>
- Nicholson P. H. F. (2008). IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control 55 (7) Ultrasound and the biomechanical competence of bone. 1539 – 1545. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4559652>
- Pestana, L. M., Calado, M. R. A. & Mariano, S. (Junio, 2016) *Experimental force characterization of linear switched reluctance machine*. Trabajo presentado en 16th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Florence, Italy. Recuperado de: [https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7555849/references#reference](https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7555849/references#references)
s
- Thomas N. (2007), Image-Based Strength Assessment of Bone. 4425 – 4428. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4353320/authors#authors>
- Ulrich N. y Mokwa W. (2008). Strain gauge foil for the measurement of elastic deformations in orthopedic milling tools. 1476 – 1479. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4716724>

Yang G. Y., Garrett J., Tang W. C. & Keyak J. H. (2007). Parylene-Based Strain Sensors for Bone. *IEEE Sensor Journal* 7 (12), 1693 – 1697. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4373310/authors#authors>

Yousif A.E. y Aziz M. Y. (2014). Biomechanical analysis of the human femur bone during going upstairs and sitting down. Recuperado de: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6740472>.

Electrónicas:

Autonics. Cylindrical Type Proximity Sensor Pr Series. Recuperado de: http://www.farnell.com/datasheets/1599273.pdf?_ga=2.255801032.1150480749.1559832564-1123281161.1559832564

Microchip Technology Inc. (2006). PIC18F2455/2550/4455/4550 Data Sheet: 28/40/44-Pin, High-Performance, Enhanced Flash, USB Microcontrollers with nano Watt Technology. Recuperado de: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/39632c.pdf>

Omron Electronics LLC. General Purpose Relay MK. Recuperado de: <http://pdf2.datasheet.su/omron%20electronic%20components/pl08.pdf>

Proytronic. Modulo YC-MD1301 Puente H 10A/5-35VDC. Recuperado de: http://www.proytronic.cl/?page=shop.product_details&product_id=843&flypage=flypage.tpl&pop=0&option=com_virtuemart&Itemid=1

Raspberry. Raspberry Pi3B+. Recuperado de: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

ANEXOS

1. Módulo timer1
2. UART
3. Especificaciones Técnicas de la Galga Extensiométrica
4. Graficas de resultados.

ANEXO 1: MÓDULO TIMER1

T1CON: REGISTRO DE CONTROL DEL TIMER0

RD16	T1RUN	T1CKPS1	T1CKPS0	T1OSCEN	T1SYNC	TMR1CS	TMR1ON
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

Bit7 **RD16:** Bit de Escritura/Lectura en modo 8/16 bits de registro TMR1.
 1= Habilita el registro de Lectura/Escritura del **TIMER1** en **1 operación** de 16 Bits.
 0= Habilita el registro de Lectura/Escritura del **TIMER1** en **2 operaciones** de 8 Bits.

Bit6 **T1RUN:** Bit de **monitoreo** de la Fuente de Reloj principal del Sistema (solo lectura).
 1= Reloj principal deriva del Oscilador TIMER1.
 0= Reloj principal **NO** deriva del Oscilador TIMER1.

Bit5,4 **T1CKPS1:T1CKPS0** Bit de selección de Prescaler del TIMER1.

T1CKPS1	T1CKPS0	Valor del Prescaler
0	0	Divide por 1
0	1	Divide por 1
1	0	Divide por 4
1	1	Divide por 16

Bit3 **T1OSCEN:** Bit de **habilitación** del Oscilador del TIMER1.
 1= **Habilitado**.
 0= **Deshabilitado**.

Bit2 **T1SYNC:** Bit de **sincronización** de la señal de Reloj (solo cuando la fuente de reloj es externa).
 1= **NO sincroniza** la entrada de reloj externo.
 0= **Sincroniza** la entrada de reloj externo.

Bit1 **TMR1CS:** Bit de selección de la Fuente de reloj Interno/Externo.
 1= Fuente de Reloj **externo** por el pin **RC0/T1OSC/T13CKI**.
 0= Fuente de Reloj **interno** FOSC/4.

Bit0 **TMR1ON:** Bit de **puesta en Marcha** el **TIMER1**.
 1= Pone en **marcha** el **TIMER1**.
 0= **Detiene** el **TIMER1**.

INTCON: REGISTRO CONTROL DE INTERRUPCIONES

GIE	PEIE	TMROIE	INTOIE	RBIE	TMROIF	INTOIF	RBIF
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

Bit7 **GIE:** Bit de Permiso GLOBAL del todas la Interrupciones.
 1= Habilitado.
 0= Deshabilitado.

Bit6 **PEIE:** Bit de permiso de Interrupciones Periféricas.
 1= Habilitado.
 0= Deshabilitado.

PIE1: REGISTRO DE PERMISO DE INTERRUPCIONES PERIFERICAS 1

SPPIE	ADIE	RCIE	TXIE	SSPIE	CCP1IE	TMR2IE	TMR1IE
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

Bit0 **TMR1IE:** Bit de permiso de Interrupción por Desbordamiento del **TIMER1**.
 1= Habilitado.
 0= Deshabilitado.

PIR1: REGISTRO DE ESTADO DE INTERRUPCIONES PERIFERICAS 1

SPPIF	ADIF	RCIF	TXIF	SSPIF	CCP1IF	TMR2IF	TMR1IF
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

Bit0 **TMR1IF:** Flag de estado de la Interrupción por Desbordamiento del **TIMER1**.
 1= Se ha producido una Interrupción por Desbordamiento del **TIMER1**.
 0= **NO** se ha producido Interrupción por Desbordamiento.

TMR1H-TMR1L: REGISTRO ENCARGADO DE LLEVAR LA CUENTA DEL TIMER1

NAME	ADDRESS RAM
TMR1L	Registro Contador/Temporizador byte Bajo 0x0FCE
TMR1H	Registro Contador/Temporizador byte Alto 0x0FCF

ANEXO 2: UART

TXSTA: REGISTRO DE CONTROL Y STATUS DEL TRANSMISOR							
CSRC	TX9	TXEN	SYNC	SENDB	BRGH	TRMT	TX9D
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Bit7	CSRC: Selección del modo Maestro/Esclavo (solo para el modo Síncrono). 1= Modo Maestro (Señal de reloj interno). 0= Modo Esclavo (Señal de reloj externo).						
Bit6	TX9: Selección del modo 8/9 bits en la Transmisión. 1= Modo 9 bits en la Transmisión. 0= Modo 8 bits en la Transmisión.						
Bit5	TXEN: Habilitador de Transmisor . 1= Transmisión Habilitado . 0= Transmisión deshabilitado .						
Bit4	SYNC: Selección del modo de Trabajo de USART . 1= Modo Síncrono . 0= Modo Asíncrono .						
Bit3	SENDB: Selección de envío del Carácter Break en modo Asíncrono . 1= Envía carácter break en la próxima Transmisión (borrado por Hardware). 0= Envío del carácter de Transmisión Break completado.						
Bit2	BRGH: Selección del modo de Alto/Baja Velocidad del Baud-Rate . 1= Alta Velocidad . 0= Baja Velocidad .						
Bit1	TRMT: Estado del registro de Transmisión TXREG . 1= Registro TXREG vacío. 0= Registro TXREG ocupado.						

RCSTA: REGISTRO DE CONTROL Y STATUS DEL RECEPTOR							
SPEN	RX9	SREN	CREN	ADDEN	FERR	OERR	RX9D
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
Bit7	SPEN: Habilitador del Puerto Serie. 1= Puerto Serie Activado (se configuran las líneas RC6/TX/CK y RC7/RX/DT como líneas Puerto Serie). 0= Puerto Serie Desactivado .						
Bit6	RX9: Selección de 8/9 bits en la Recepción . 1= Modo 9 bits. 0= Modo 8 bits.						
Bit5	SREN: Habilitación de Recepción Simple (solo en modo Síncrono Maestro). 1= Habilita la Recepción simple. 0= Deshabilita la Recepción simple.						
Bit4	CREN: Habilitación del Receptor . 1= Recepción habilitada . 0= Recepción deshabilitada .						
Bit3	ADDEN: Habilitación de la detección de la dirección (solo en modo Asíncrono de 9 bits). 1= Detección de dirección habilitada . 0= Detección de dirección deshabilitada .						
Bit2	FERR: Bit de Error en el formato del byte Recibido. 1= Se ha producido un error en el formato. 0= NO se ha producido un error.						
Bit1	OERR: Bit de error de sobre escritura . 1= Se ha producido un error de sobre escritura. 0= NO se ha producido un error de sobre escritura.						
Bit0	RX9D: 9vo bit de Datos de Recepción . Es el noveno bit de datos del byte Recibido cuando se operan tramas seriales de 9 bits de datos.						

BAUDCON: REGISTRO DE CONTROL DEL BAUD-RATE

ADBOVF	RCIDL	-	SCKP	BRG16	-	WUE	ABDEN
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

- Bit7 **ADBOVF:** Bit de **desbordamiento de Auto-Detección del Baud-Rate**.
1= Se ha producido un desbordamiento durante el Auto-Detección del Baud-Rate (borrar por software).
0= No se ha producido desbordamiento.
- Bit6 **RCIDL:** **Estado de la operación de Recepción**.
1= No hay operación de recepción en marcha. 0= SI hay operación de recepción en marcha.
- Bit4 **SCKP:** Selección de **polaridad del reloj** (solo en modo **Síncrono**).
1= Flanco de subida. 0= Flanco de bajada.
- Bit3 **BRG16:** Selección de **8/16 bits de Velocidad del Baud-Rate**.
1= Velocidad de 16 bits (SPBRG y SPBRGH).
0= Velocidad de 8 bits (SPBRG).
- Bit1 **WUE:** **Habilitación de Auto-Detección de la Trama** (solo en modo **Asíncrono**).
1= Activado (cuando se detecta un flanco de bajada en el pín RX se pone a "1" en Flag RCIF).
0= Desactivado.
- Bit0 **ABDEN:** **Habilitación de Auto-Detección del Baud-Rate**.
1= Activado en la siguiente Recepción.
0= Desactivado.

TXREG: REGISTRO BUFE DE TRANSMISIÓN

TXREG[7:0]							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

RXREG: REGISTRO BUFE DE RECEPCIÓN

RCREG[7:0]							
Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0

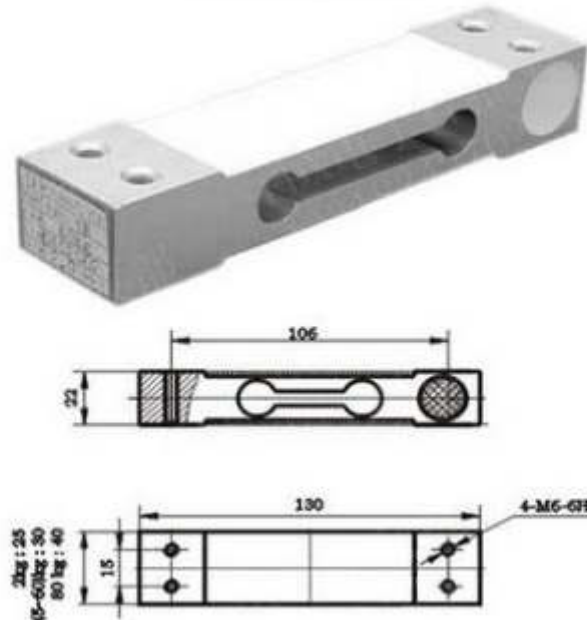
SPBRG-SPBRGH REGISTRO DE BAUD-RATE

SPBRGH[15:8]							SPBRGH
SPBRG[7:0]							SPBRG

ANEXO 3: ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LA GALGA

EXTENSIOMÉTRICA

YZC-1B 型号: YZC-1B



技术指标

应用	Application	计价秤 Price computing scales	
型号	Model	YZC-1B	
量程	Capacity	Kg	2, 3, 5, 6, 8, 10, 30, 35, 40, 50, 60, 80
输出灵敏度	Rated output	MV/V	2.0±0.15
精度等级	Accuracy class		C2
最大设定分度数	Maximum number of divisions	D_{max}	2000 3000
最小设定分度数	Minimum load cell divisions	V_{min}	$E_{Max/5000}$ $E_{Max/500}$
综合误差	Combined error	%RO	≤±0.030 ≤±0.020
蠕变	Creep	%RO/30min	0.03 0.0167
温度灵敏度漂移	Temperature effect on sensitivity	%RO/°C	0.0016
温度零点漂移	Temperature effect on zero	%RO/°C	0.003 0.002
零点平衡	Zero balance	%RO	±1.0
输入阻抗	Input resistance	Ω	402±6 1066±10
输出阻抗	Output resistance	Ω	350±3 1000±10
绝缘电阻	Insulation resistance	M Ω (50V)	5000
推荐激励电压	Recommended excitation voltage	V	10~15
温度补偿范围	Compensated temperature range	°C	-10~+40
工作温度范围	Operating temperature range	°C	-35~+80
安全超载能力	Safe overload	%RO	150
极限超载范围	Ultimate overload	%RO	200
传感器材料	Load cell material		铝合金 Aluminium
推荐台面尺寸	Platform size		350×350
接线电缆	Connecting cable		∅4.2×350mm
接线方式	Method of connecting wire		可输入 (+) 可输入 (-) 接地线 (+) 接地线 (-)

ANEXO 4: GRAFICAS DE RESULTADOS.

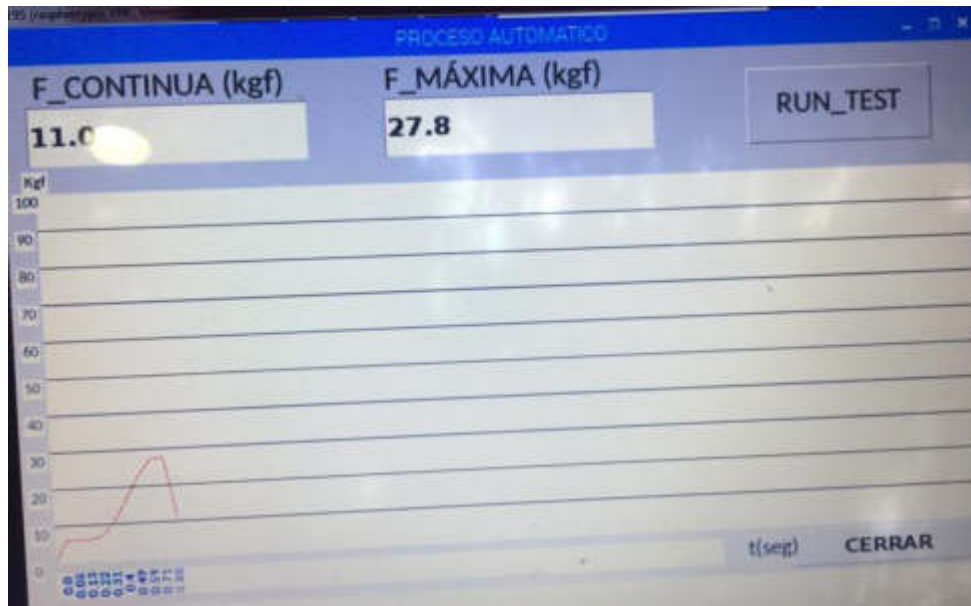


Figura 94: Gráfica de resultados con madera balsa 5 mm
Elaboración: Los autores

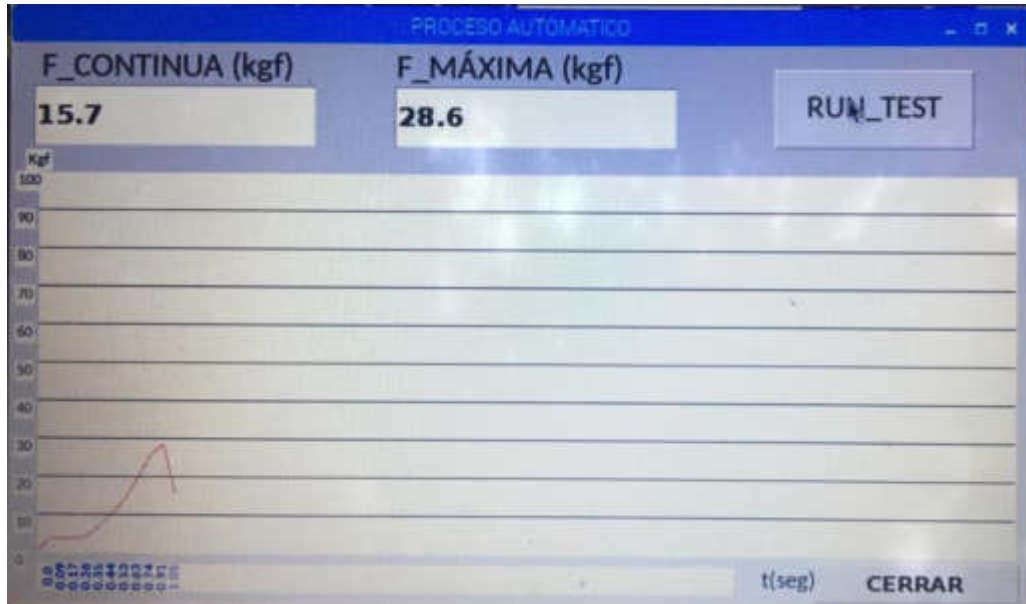


Figura 95: Gráfica de resultados con madera balsa 6 mm
Elaboración: Los autores

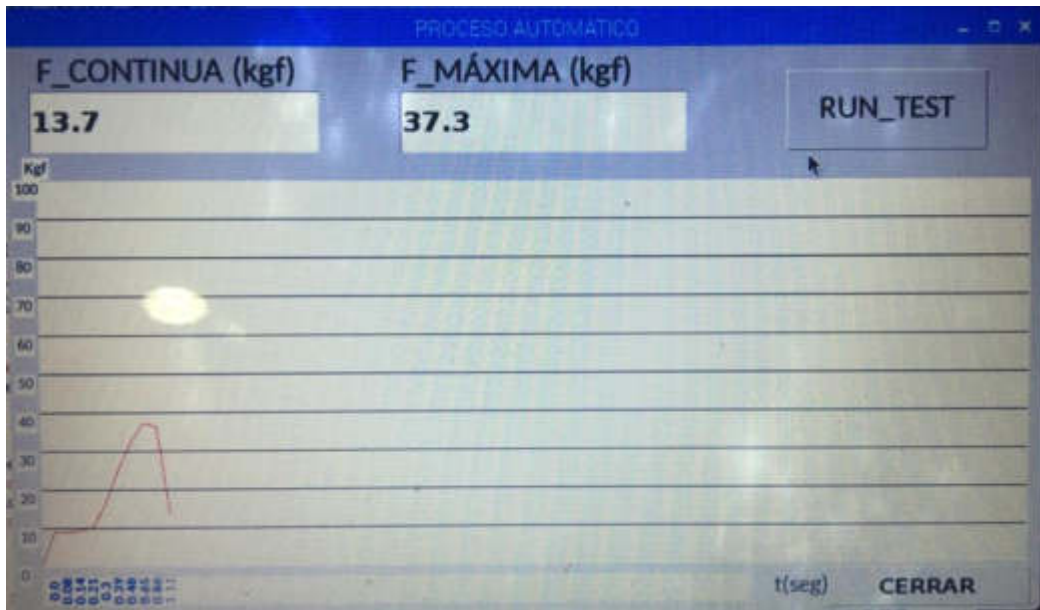


Figura 96: Gráfica de resultados con huesos
Elaboración: Los autores