

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL DE FUERZAS PARA UN
PROTOTIPO DE TERMINAL DE AGARRE**

Tesis para optar el Título de Ingeniero Electrónico

**Presentado por:
RAÚL CAMACHO GÓMEZ**

**Lima - Perú
2007**

RESUMEN

El presente tema de tesis tiene como objetivo central, llevar a cabo un control sobre la variable física de fuerza. Para esto se implementará un sistema electromecánico (prototipo de terminal de agarre manipulador) el cual servirá como plataforma de prueba para realizar dicho control. Este prototipo contará con las características básicas que lo define como terminal de agarre. Es decir, apertura y cierre de placas paralelas (a modo de pinzas).

El sistema de control se encargará de regular la fuerza de agarre del terminal, a un valor determinado previamente. Este valor de fuerza ya determinado, será el necesario y suficiente para evitar que el material que se vaya a coger se quiebre o resbale. Para validar el correcto funcionamiento del sistema de control se harán pruebas con distintos materiales.

Para determinar el valor de fuerza que está ejerciendo en cada instante, el terminal de agarre contará con un sensor de fuerza. Este periódicamente irá tomando datos de los valores de fuerza presentes en todo momento.

La distribución del presente documento cuenta con 5 capítulos:

En los capítulos 1 y 2 nos centraremos en la parte teórica que brinda sustento a la elección del tema de tesis. Tal como, las características importantes que encierra el tema de control de fuerza en nuestro entorno de desarrollo tecnológico, así como también las ventajas que puede brindar el control de fuerza aplicado a varios campos de trabajo. Además, nos centraremos en definir la problemática que encierra la elección del tema de estudio.

En los capítulos 3 y 4 nos centraremos en definir la metodología de solución a la problemática planteada, así como la puesta en marcha del sistema de control propuesto. Finalmente, una vez que tengamos todo el sistema que encierra al control de fuerza, nos dedicaremos a hacer pruebas para validar el camino de solución elegido.

En el último capítulo presentaremos las conclusiones, observaciones y recomendaciones de la tesis. De este capítulo extraemos como conclusión principal. El que la metodología elegida para solucionar la problemática del tema de tesis, tuvo los resultados esperados. Finalmente se pudo controlar la fuerza de agarre de los materiales seleccionados dentro de un rango de error pequeño.



*A mis padres:
Por creer siempre en mí.*

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN

I

CAPÍTULO 1: DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE AGARRE Y LA PROBLEMÁTICA QUE SE PRESENTA SOBRE EL CONTROL DE FUERZAS EN SUS TERMINALES

1.1. Marco externo e interno relacionado a los dispositivos de agarre	1
1.1.1. Incremento del campo de aplicación para los dispositivos de agarre	1
1.1.2. Potencialidades que brinda el país para la inserción de control de fuerza en los dispositivos manipuladores destinados a tareas de agarre	1
1.1.3. Crecimiento del Mercado Mundial	2
1.1.4. Ausencia de política para el desarrollo tecnológico nacional	2
1.1.5. Tendencia de crecimiento al consumo de manipuladores de agarre	4
1.1.6. Nivel de competencia de acuerdo a la proyección que se le da a los dispositivos de agarre manipulador	5
1.1.7. Recursos tecnológicos con los que cuentan los dispositivos de agarre-manipulador	7
1.1.8. Metodología para el control de los manipuladores destinados a tareas de agarre	7
1.1.9. Modo de manejo de los manipuladores	8
1.1.10. Procesos a los que se destinan los manipuladores de agarre	8
1.2. Deficiencias al funcionamiento de los dispositivos de agarre-manipulador tipo ON/OFF	8
1.2.1. Necesidad de personal calificado	8
1.2.2. Posibilidad de ruptura del objeto a coger	9
1.2.3. Presencia de perturbación externa	9
1.2.4. Falta de flexibilidad	9
1.3. Marco Problemático	9

CAPÍTULO 2: CONTROL DE FUERZA EN UN DISPOSITIVO DE AGARRE MANIPULADOR

2.1.	Estado del arte	10
2.1.1.	Presentación del asunto de estudio	10
2.1.2.	Estado de la Investigación	11
2.1.3.	Síntesis sobre el asunto de estudio	12
2.2.	Manipuladores	13
2.2.1.	Definición de manipulador	13
2.2.2.	Partes de un manipulador	13
2.2.3.	Características de los manipuladores	14
2.2.4.	Aplicaciones de los manipuladores	17
2.3.	Sistemas de control	17
2.4.	Sistemas de control de fuerza para terminales de manipuladores	18
2.5.	Modelo Teórico	19
2.5.1.	Descripción del modelo teórico	19
2.5.2.	Definiciones operativas	21

CAPITULO 3: DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE FUERZA

3.1.	Hipótesis	23
3.1.1.	Hipótesis principal	23
3.1.2.	Hipótesis secundarias	23
3.2.	Objetivos	24
3.2.1.	Objetivo general	24
3.2.2.	Objetivo específico	24
3.3.	Metodología	24
3.3.1.	Hardware	28
3.3.2.	Software	38
3.3.3.	Diagramas de flujo	40

CAPITULO 4: PRUEBAS, ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1.	Etapa de adquisición de datos	45
4.2.	Etapa de determinación de la fuerza umbral	48
4.3.	Resultados	49

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

5.1.	Conclusiones	64
5.2.	Observaciones	64
5.3.	Recomendaciones	65

<u>FUENTES</u>	66
-----------------------	----



INTRODUCCIÓN

Hoy en día, a nivel mundial, la utilidad de los dispositivos de agarre sigue en aumento. Si bien la función principal de estos dispositivos es la de coger objetos de manera eficiente, muchos de estos son solo del tipo apertura-cierre (ON/OFF) los cuales resultan ineficientes para tareas de alta complejidad. Este tipo de dispositivos (ON/OFF) no controlan la fuerza que ejercen para coger los objetos; esto debido a que la rapidez del cierre de sus terminales de agarre siempre es la misma, indistintamente de si el objeto a coger es blando o rígido.

La implementación de un sistema que permita medir y controlar la fuerza que ejercen estos dispositivos al momento de coger los objetos permitiría darles a estos dispositivos una mayor flexibilidad y precisión, incrementando así su utilidad para tareas mas complejas. Para esto es necesario primero conocer la fuerza necesaria (umbral) para coger un objeto a fin de evitar que este se quiebre o deslice.

El objetivo del presente tema de tesis es el de controlar la variable física de fuerza en un prototipo de dispositivo de agarre. Para esto se implementara un sistema electromecánico (prototipo de terminal de agarre) el cual servirá como plataforma de prueba para realizar dicho control de fuerza. Esto permitirá coger objetos específicos (previamente establecidos) con la fuerza suficiente, de manera tal que no sean dañados.

La metodología empleada se basa primordialmente en ecuaciones físicas relacionadas a las fuerzas de fricción y a la primera ley de Newton. Estas definirán la manera en que nuestro sistema de control (Hardware y Software) interactuará, a fin de llevar cabo el control sobre la variable física de fuerza.

El desarrollo de la tesis consta de 5 capítulos. En el primer capítulo se describe el marco externo e interno que rodea a los dispositivos de agarre – manipulador; así como también, las deficiencias referente a su funcionamiento (problemática), presentes en una parte de estos (dispositivos de agarre).

En el segundo capítulo presentaremos el asunto de estudio y nos centraremos en definir ciertos conceptos teóricos relacionados al tema de tesis. Finalmente definiremos el modelo teórico del tema de estudio.

El tercer capítulo define la problemática de estudio y muestra todo el procedimiento a seguir para dar solución a esta.

En el cuarto capítulo se pone en marcha la metodología de solución propuesta. A partir de estas se harán las pruebas requeridas y se tomarán datos de resultados. Estos luego serán mostrados en gráficas que demuestren la eficacia del camino de solución seguido.

En el último capítulo presentaremos las conclusiones, observaciones y recomendaciones generales de la tesis en base a los resultados obtenidos en el capítulo anterior.

Para finalizar, quiero agradecer a mi familia por todo el apoyo emocional que me brindaron durante estos cinco años de estudio; al profesor Gustavo Kato, por su paciencia y colaboración para que esta tesis llegue a culminarse; a Yolanda Camacho y Percy Mosquera, familiares que estuvieron apoyándome en todo momento para que esta tesis se haga realidad.

CAPÍTULO 1:
DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO DE UN DISPOSITIVO DE AGARRE Y LA
PROBLEMÁTICA QUE SE PRESENTA SOBRE EL CONTROL DE FUERZAS EN
SUS TERMINALES

1.1. Marco externo e interno relacionado a los dispositivos de agarre.

1.1.1. Incremento del campo de aplicación para los dispositivos de agarre.

Actualmente una gran cantidad de dispositivos de agarre se encuentran acoplados como terminales en los dispositivos manipuladores. Estos si bien, durante mucho tiempo vienen siendo utilizados por industrias automotrices; hoy en día han ampliado su rango de aplicaciones a tal punto de ser empleadas en áreas como la industria médica, electrónica, textil, de alimentos, etc. Si bien todo esto hace más eficientes los procesos para los que son destinados; a dichos manipuladores se les exige un poco mas de flexibilidad y precisión para determinadas tareas. Es así, que muchas veces se necesita que se controle la fuerza de aprehensión en sus terminales haciendo así a estos más útiles para otras áreas de aplicación. Entre algunas de las tareas a las que se vienen destinando dichos manipuladores con control de fuerza figuran :

Seguridad nuclear, asistencia médica para paráliticos, discapacitados, exploración del océano, manipulación y perforación, agricultura y forestación, cosecha de frutos, limpieza de maizales, talado, construcción, ensamble y reforzamiento de barras, pintado de puentes, acabado en construcciones elevadas, minas de metales y carbón, transporte, etc.

1.1.2. Potencialidades que brinda el país para la inserción de control de fuerza en los dispositivos manipuladores destinados a tareas de agarre.

En la actualidad el país no cuenta con empresas nacionales que se dediquen a la producción de dispositivos manipuladores; esto debido primordialmente a que :

- Desde el punto de vista de la producción, el proceso de fabricación resulta muy costoso. Además, el país no cuenta con los suficientes recursos tecnológicos como para llevar a cabo este proceso de fabricación.
- Desde el punto de vista del consumo, el país hasta hace poco y en general gran parte de Sudamérica no contaban con una política de desarrollo tecnológico en casi todas sus áreas de trabajo.

Es así que, con la casi nula demanda de manipuladores sumado al pobre desarrollo tecnológico que presentaba el país hicieron imposible la creación de empresas nacionales dedicadas al rubro de la producción de dispositivos manipuladores.

Si bien el Perú hoy en día aún no se encuentra en la capacidad de ser un fabricante de dispositivos manipuladores, se va convirtiendo poco a poco en consumidor de estos; en especial, de los destinados a tareas de agarre fijo; es decir, sus terminales de agarre no controlan la fuerza con que cogen los objetos.

Todo esto hace pensar en el Perú como un país con condiciones óptimas para fomentar el diseño de sistemas de control de fuerzas; los cuales, luego puedan ser acoplados a dispositivos manipuladores comunes.

1.1.3. Crecimiento del Mercado Mundial.

En estos últimos años, a nivel mundial y en especial en los países desarrollados, la demanda por dispositivos manipuladores de agarre en general viene creciendo cada vez más. Si comparamos esto con el desarrollo de cada área de aplicación de éstos, nos daremos cuenta que una mayor flexibilidad en el uso de los manipuladores de agarre comunes daría como resultado una mayor demanda de éstos. Entonces, uno de los aspectos que brinda mayor versatilidad a dichos manipuladores, es el hecho de proveer de sensibilidad a sus terminales. En la Fig.1.2 se puede apreciar el crecimiento continuo en las instalaciones de los dispositivos de agarre comunes destinados a tareas industriales entre los años 2002-2006 y los pronósticos para el año 2007.

1.1.4. Ausencia de política para el desarrollo tecnológico nacional.

Actualmente el país no cuenta con una cultura política orientada al desarrollo tecnológico.

El limitado desarrollo, de manera articulada, de las actividades científicas y tecnológicas en el Perú, y por consiguiente su escaso poder e influencia como catalizador del desarrollo, es causado fundamentalmente por el distanciamiento que continuamente se ha presentado entre la voluntad política y la capacidad de gestión. Según el informe de CONCYTEC acerca del “estudio sistemático de la realidad nacional en ciencia y tecnología” : “La voluntad política y la capacidad de gestión son dos factores críticos que deben concurrir simultáneamente y en acción sinérgica para impulsar el desarrollo tecnológico; y que por el contrario han venido influenciándose negativamente, unas veces por la ausencia de voluntad política que respalde y financie la gestión y otras por incapacidad de gestión para articular a los elementos del sistema y formular las recomendaciones necesarias para la obtención de la definición política”.

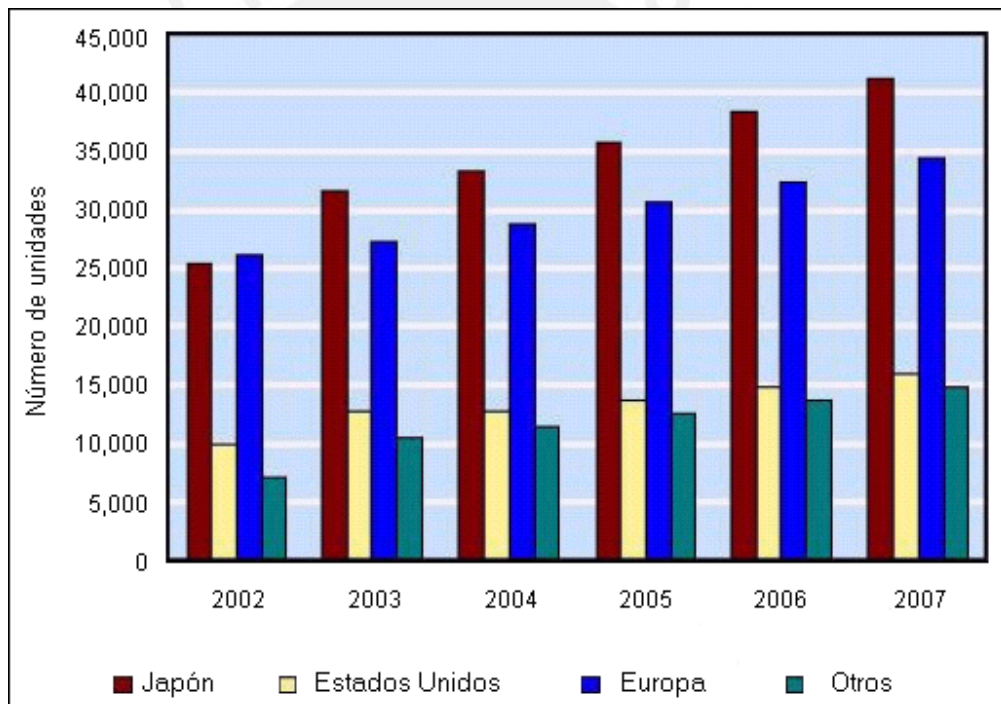


Fig. 1.2 Instalaciones de dispositivos de agarre comunes destinados a tareas industriales*

En este informe además se comenta que : “El escaso desarrollo colectivo en Ciencia y Tecnología, sin pretender desmerecer los esfuerzos que aisladamente se verifican en algunas organizaciones tanto públicas como privadas, toma forma expresa en”:[1]

* Fuente : United Nations Economics Commission for Europe.

- La formación de Recursos Humanos no acorde a las necesidades del país, tanto para la investigación y el desarrollo tecnológico como para la producción.
- La incomunicación entre las instituciones vinculadas a la investigación y al desarrollo tecnológico y de ellas con la demanda nacional de tecnología.
- El aislamiento de las instituciones nacionales con respecto a las fuentes de información del avance científico y tecnológico en el ámbito mundial.
- Los escasos recursos asignados tanto por el Estado, como por el sector privado.



Fig. 1.1 Robot industrial RM-10*

1.1.5. Tendencia de crecimiento al consumo de manipuladores de agarre.

Desde hace algunos años, la necesidad de emplear dispositivos manipuladores en tareas para múltiples áreas de desarrollo vienen aumento, aún mas si se trata de los manipuladores destinados a tareas de agarre. Esto debido al desarrollo científico y al gran progreso que han experimentado los manipuladores en cuanto a los beneficios y ventajas que implica su uso. Su mayor campo de acción es en la industria automotriz

* Fuente : Libro del curso de Robótica Industrial - CETAM

aunque hoy en día extiende esta a muchas otras áreas que antes era difícil de imaginárselas que operarían.

Todo esto trae como consecuencia, que cada año se venga elevando la producción y consumo de estos manipuladores en los principales países desarrollados siendo Japón el principal consumidor de dispositivos manipuladores; más que todo, debido al progreso industrial que experimenta en todas sus áreas de producción. La Fig.1.3 se puede observar el número de manipuladores de agarre que posee cada país para cada año de estudio.

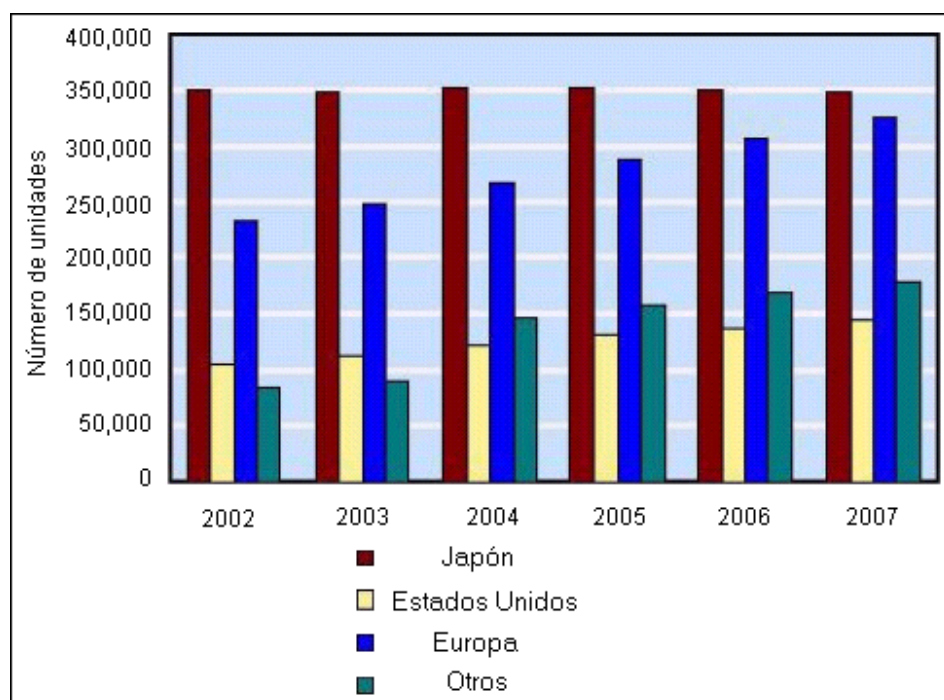


Fig. 1.3 Adquisición de manipuladores para múltiples tareas*

1.1.6. Nivel de competencia de acuerdo a la proyección que se le da a los dispositivos de agarre manipulador.

En la actualidad para cada tarea de agarre en la que se necesite hacer uso de manipuladores, existen una gran variedad de modelos que desempeñan una misma función; diferenciándose solo en las formas con que actúan: geometría (cilíndricos, polares, cartesianos, etc.), eficiencia, precisión, tipos de terminales de agarre que poseen, poder de flexibilidad y muchos otros factores. Todo esto hace más variada y compleja la decisión a la hora de elegir determinado manipulador que cumpla con los

* Fuente : United Nations Economics Commission for Europe.

requerimientos de operación necesarios. A continuación se muestran las fotos de dos manipuladores destinados a tareas industriales.



Fig. 1.4 SCORA-ER 14*



Fig. 1.5 UNIMATE 2000 (PUMA)*

* Fuente : CD del curso de Robótica Industrial - CETAM

1.1.7. Recursos tecnológicos con los que cuentan los dispositivos de agarre-manipulador.

Los dispositivos de agarre-manipulador desarrollados hoy en día cuentan con una gran variedad de componentes que entrelazados unos a otros proveen de características especiales a cada uno.

Los recursos tecnológicos con los que cuentan la gran mayoría de manipuladores de agarre tienen similitud diferenciándose mayormente en las características que posean sus terminales de agarre. Todos los manipuladores en general cuentan con actuadores, sensores y software de programación :

- Los **actuadores** son elementos motrices que generan el movimiento de las articulaciones y pueden ser, según la energía que consuman, de tipo neumático o eléctrico. De estos, los más utilizados vienen siendo los motores eléctricos debido a su gran precisión en el control de su movimiento y las ventajas inherentes a la energía eléctrica que consumen.
- Los **sensores** con los que cuentan los manipuladores se dividen en dos grandes grupos: Los internos, aportan información acerca del estado interno del robot (posición, velocidad, ángulo de giro) y los externos, aportan información acerca del entorno (distancias, luz, humedad, presión, etc.).
- La **programación** puede ser de diferentes tipos entre los cuales tenemos : Programación mecánica, programación gestual y programación textual. De éstas, la programación mecánica es la mas utilizada.

1.1.8. Metodología para el control de los manipuladores destinados a tareas de agarre.

Hoy en día los manipuladores más comunes vienen siendo manejados de tres formas :

- **Manual**, en el cual mediante una palanca (*Joystick*) se graban las coordenadas de las posiciones a las que se desea mover el manipulador de acuerdo a las tareas que se quiera que realice. Para luego, una vez grabadas las tareas, proceder a ejecutarlas de manera secuencial.
- **Guiado (Teleoperación)**, en el cual a través de un robot maestro ubicado en el punto de trabajo del operador se puede gobernar un robot esclavo ubicado en una zona remota. Este sistema se compone entonces de un robot maestro que

es gobernado por un operador y un robot esclavo o remoto cuyo cometido es el de interactuar con su entorno de trabajo.

- **Programación fuera de línea**, la programación se realiza en el terminal de una computadora y posteriormente se almacena en la memoria del controlador del robot para su uso durante el ciclo de trabajo. No se desperdicia tiempo mientras se enseña al robot una nueva tarea, resultando en una mayor utilización del robot.

1.1.9. Modo de manejo de los manipuladores.

Todos los manipuladores sin restricción alguna, siempre necesitan de personal calificado para llevar a cabo su manejo, ya sea indirectamente (mediante palancas o programación fuera de línea) o directamente (guiado); por lo que, estos aún presentan cierta dependencia humana para llevar a cabo las tareas que se les asigne.

1.1.10. Procesos a los que se destinan los manipuladores de agarre.

La gran mayoría de manipuladores de agarre que se encuentran hoy en día en el mercado son los convencionales (terminal on/off); estos se caracterizan por la carencia de sistemas de control de fuerza en sus terminales de agarre por lo que mayormente van destinados a tareas de agarre ya definidas e inmodificables, repetitivas y sobre todo continuas, ya que estos terminales no pueden adaptarse a los cambios que presenta el ambiente de trabajo de dichos manipuladores. Esto hace que estos tipos de manipuladores muchas veces sean ineficientes para tareas que exijan precisión; sin embargo, no dejan de ser eficientes para otros casos.

1.2. Deficiencias al funcionamiento de los dispositivos de agarre-manipulador tipo ON/OFF.

1.2.1. Necesidad de personal calificado.

Para mover un objeto se necesita colocar al manipulador sobre éste. Esto se realiza asignando manualmente mediante una palanca las coordenadas de la posición en la que se encuentra el objeto, y al cual debe dirigirse el terminal del manipulador. Para esto, se requiere de una persona capacitada para manejar la palanca cada vez que sea necesario.

1.2.2. Posibilidad de ruptura del objeto a coger.

Al momento de coger un objeto puede que este se dañe debido a que el terminal de un manipulador solo reconoce dos estados: apertura y cierre; en ese sentido, resulta indiferente el tipo de objeto que se vaya a coger. Por lo tanto, se debe de tener mucho cuidado con la elección del objeto que se desee coger ya que; este podría quebrarse debido a la excesiva fuerza con la que es cogido por parte del terminal de agarre.

1.2.3. Presencia de perturbación externa.

Muchas veces durante el proceso de agarre los manipuladores son víctimas de agentes externos (golpes sobre el objeto a coger, agregar peso adicional al objeto inicialmente cogido, etc.), los cuales introducen errores cuantitativos que se ven reflejados al momento de sostener un objeto. Para esto el sistema en su conjunto debe responder de manera satisfactoria a estas perturbaciones.

1.2.4. Falta de flexibilidad.

Cuando se coge un objeto no se regula la fuerza con la que se debe de coger; es decir, la rapidez del cierre de los terminales de agarre siempre es la misma; indistintamente de si el objeto a coger es blando o rígido. Por esto, el agarre de un objeto se vuelve un proceso fijo (establecido) y repetitivo.

1.3. Declaración del Marco Problemático.

Si bien la fuerza es una variable que tiene gran importancia para el desarrollo tecnológico (en especial el control sobre esta); es en los manipuladores, específicamente en los terminales de estos, en donde se le presta mayor interés a su estudio ya que son estos lo que se encuentran en pleno contacto con el entorno.

La mayor cantidad de manipuladores que se encuentran en el mercado carecen de un control de la fuerza que ejercen sobre su entorno; más bien, se tratan de mecanismos que en sus partes terminales presentan dispositivos a modo de pinzas con dos únicas funciones: apertura y cierre, cuyo propósito es el de coger objetos, dándole así múltiples aplicaciones al manipulador. Esto es, de acuerdo al objeto que se coja y la función que cumpla éste. Es así que estos están destinados a coger solo objetos rígidos ya que si no fuera ese el caso, el objeto resultaría dañado debido a la excesiva presión que se ejerce sobre este por parte de las terminales del manipulador.

CAPÍTULO 2:

CONTROL DE FUERZA EN UN DISPOSITIVO DE AGARRE MANIPULADOR

2.1. Estado del arte.

2.1.1. Presentación del asunto de estudio.

Coger, levantar, sostener o manipular objetos, ya sean blandos o rígidos, son acciones que se llevan a cabo en el día a día de todo individuo; sin embargo, si bien estas acciones no llevan ninguna complejidad de ser realizadas por un individuo, que tan fácil podría resultarle al terminal de agarre de un manipulador llevar a cabo este tipo de acciones.

Si nos percatamos bien de todas las acciones enumeradas anteriormente nos podemos dar cuenta de que estas están íntimamente ligadas con el uso de la fuerza y por sobre todo con el control de ésta.

El control sobre la fuerza es un tema que viene siendo estudiado y analizado desde tiempo atrás hasta nuestros días. Este es un tema con un gran aporte para el progreso de la tecnología que extiende su utilidad a distintas áreas de desarrollo. Abarca áreas como : la medicina, robótica, agricultura, industria automotriz y la industria propiamente dicha, etc.

Hoy en día podemos observar muchos procesos que llevan dentro de sí un manejo de fuerzas y un control, caso saltantes son por ejemplo, el empleo de estas en los manipuladores destinados a funciones de agarre (sus terminales) para sala de operaciones capaces de llevar a cabo estas (operaciones) con mucha exactitud y precisión, las industrias de producción también hacen uso de la fuerza, la industria automotriz donde su empleo a sido mayor, especialmente para aplicaciones de soldadura, pintado, manipulación de partes de carrocería, etc.

Todo lo expuesto anteriormente hace de la medición de fuerza y en especial de su control un tema con la necesidad de ser profundizado.

2.1.2. Estado de la Investigación

Para controlar fuerzas lo primordial es poder medirlas primero. Si bien existen varios tipos de sensores de fuerza para tal fin (dispositivos táctiles capaces de medir estas), solo cuatro son los más comunes : Galgas extensométricas, piezoeléctricos, células de carga y los FSRs (sensores de fuerza resistivos); de estos es el FSR el que viene siendo más utilizado debido a su posibilidad de formar con estos una gran matriz de pequeños sensores y por ende una mejor detección cuantitativa de fuerzas aplicadas; sin embargo, su alto costo y su software complementario en contraposición con el uso limitado que se le pensaba dar, hizo que no se invirtiera en la compra de este producto. A continuación detallaremos algunos sensores de fuerza que se encuentran disponibles en el mercado, destacando sus principales características a través de un cuadro comparativo.[2]

Fabricante	TEKSCAN	TME	Interlik Electronic	Honeywell	Phidgets
Modelo	A201	CMC 301	402	FSL05N2C	1106
Tipo	FSR	Galgas activas	FSR	Piezoresistencia	Piezoresistencia
Sensibilidad	_____	2mV/g	_____	0.10mV/gr a 0.14mV/gr	5mV/gr
Rango de fuerza	0 - 440N	5 – 100N	1 – 100N	0 –500g	1.5Kgf–4Kgf
Temperatura de trabajo	-9°C a 60°C	-20°C a 80°C	-30°C a 70°C	-40°C a 85°C	10°C a 40°C
Tensión de alimentación	_____	5 a 10V	_____	5 a 12V	3 a 6V

Fig. 1.6 Cuadro comparativo de algunos sensores de fuerza comerciales.

De todos estos sensores de fuerza, son las piezoresistencias las que mejor se pueden adaptar al sistema que se piensa desarrollar. Esto debido a que llevan un arreglo interno de manera tal que permiten obtener datos más exactos de los valores de fuerzas que se miden en cada instante de tiempo (poseen linealidad para ciertos valores de fuerza). Además, proveen sensibilidad dentro de un rango adecuado y sobre

todo que se pueden adaptar fácilmente al mecanismo de pinzas que se piensa desarrollar así como su bajo costo (no incluye software complementario).

Una de las pautas a seguir para determinar la fuerza con la que se presiona un objeto, es la detección del umbral de fuerza necesario, esta es la fuerza con la cual se consigue agarrar un objeto sin que este resbale. Dicho valor puede ser calculado hoy en día a través de sistemas de realimentación (lazo cerrado).

2.1.3. Síntesis sobre el asunto de estudio

El control sobre la fuerza de agarre para determinado objeto es un tema que se debe tener en cuenta hoy en día, ya que estas funciones son utilizadas por la gran mayoría de dispositivos manipuladores destinados a funciones de agarre; por ejemplo, los que se desempeñan en distintas áreas de producción.

Para llevar a cabo un buen control sobre las funciones de agarre en dichos manipuladores, estos deben de llevar consigo un correcto sistema de sensado; en especial, sobre el de fuerza.

Debido a las características de coste/unidad y de diseño a medida, los sensores de fuerza resistivos se utilizan en un elevado número de aplicaciones que requieren un control de fuerza.[3]

Una de las ventajas de los sensores resistivos es su facilidad de configurarse en arreglo de celdas simples uniformemente distribuidas.[4]

La facilidad de adquisición de los arreglos resistivos FSR permiten, si el número de sensores es elevado, procesar la información mediante algoritmos de procesamiento de imagen.[4]

Es difícil encontrar actualmente, estudios que implementen sensores resistivos en aplicaciones relacionadas a la manipulación de objetos; los cuales, procesen la información táctil en tiempo real y que establezcan una realimentación del sistema en función de la posición del objeto, las zonas de contacto, los umbrales de fuerza y sus características geométricas.[5]

La implementación de sensores resistivos en los sistemas manipuladores de agarre empezaron a utilizarse a finales de los años 80. En 1988, T.H. Speeter, presentó

resultados de distribuciones de fuerza obtenidas por sensores resistivos FSR implementados en los cuatro dedos de la mano robot Utah/MIT.[6] En este artículo se muestran las características positivas de este tipo de sensores, tal y como se describió anteriormente.

No obstante, se observó un efecto negativo de bastante importancia en tareas de agarre de precisión, la ausencia de “conformidad”; esto debido a que el sensor no era plano y mucho menos la gran mayoría de objetos a coger.[4]

2.2. Manipuladores.

2.2.1. Definición de manipulador.

Mecanismo formado por elementos en serie, articulados entre sí (permiten el movimiento entre cada uno de los elementos articulados consecutivamente), los cuales permiten generar el movimiento de su elemento terminal. Sus terminales pueden tener diferentes tipos de dispositivos de acoplo (pinzas o herramientas).[7]

El movimiento de los manipuladores puede ser lineal, rotacional o una mezcla de ambos. El número de articulaciones en un manipulador determina su número de grados de libertad. Además, los manipuladores son multifuncionales y pueden ser gobernados directamente por un operador humano o mediante dispositivo lógico.

2.2.2. Partes de un manipulador.

La estructura mecánica del manipulador puede ser tan variada como los fabricantes que las hacen. Pero generalmente se pueden distinguir entre otros, los nombres de: cuerpo, brazo, muñeca y actuador final (o elemento terminal). A este último se le conoce habitualmente como aprehensor, garra, pinza o *gripper*. [8]

Todas estas partes están interrelacionadas para permitir los movimientos del elemento terminal del manipulador. Consta de una base para sujetarse a una plataforma rígida (como el suelo), un cuerpo donde se suele integrar la mayor parte del hardware interno que lo hará funcionar (circuitaría, placas impresas, etc.), un brazo para permitir un gran movimiento en 3 dimensiones, una muñeca para hacer también movimientos en 3 dimensiones de mucha precisión y un actuador final el cual se une a la muñeca del brazo del manipulador con la finalidad de activarlo para la realización de una tarea específica.

La razón por la cual existen distintos tipos de elementos terminales es, precisamente, por las funciones que realizan. Los diversos tipos de terminales podemos dividirlos en dos grandes categorías: pinzas y herramientas.

Las articulaciones entre las distintas partes rígidas de los manipuladores pueden ser giratorias (como las del brazo humano) o deslizantes (si hay traslación de las partes). El número de elementos del manipulador y sus articulaciones determinan una característica propia de cada manipulador.[9]

Existen dos tipos de articulación utilizados en las juntas del manipulador :

- Prismática /Lineal, junta en la que el eslabón se apoya en un deslizador lineal.
- Rotacional, junta giratoria a menudo manejada por los motores eléctricos y las transmisiones.

2.2.3. Características de los manipuladores.

A continuación se describen las características más relevantes propias de los manipuladores, extraídas de la investigación de Borhorquez, William Alberto y Góngora, Viviana Carolina [9].

Grados de libertad : cada uno de los movimientos independientes (giros y desplazamientos) que puede realizar cada articulación con respecto a la anterior. Son los parámetros que se precisan para determinar la posición y la orientación del elemento terminal del manipulador. El número de grados de libertad (GDL) del manipulador viene dado por la suma de los GDL de las articulaciones que lo componen. Puesto que las articulaciones empleadas suelen ser únicamente de rotación y prismáticas, con un solo grado de libertad cada una, el número de GDL del robot suele coincidir con el número de articulaciones que lo componen.

Puesto que para posicionar y orientar un cuerpo de cualquier manera en el espacio son necesarios seis parámetros, tres para definir la posición y tres para la orientación, si se pretende que un manipulador posicione y oriente su extremo (y con él la pieza o herramienta manipulada) de cualquier modo en el espacio, se precisará al menos seis grados de libertad.

Un mayor número de grados de libertad conlleva un aumento de la flexibilidad en el posicionamiento del elemento terminal. Aunque la mayoría de las aplicaciones industriales requieren 6 GDL, como las de la soldadura, mecanizado y paletización, otras más complejas requieren un número mayor, tal es el caso en las labores de montaje. Si se trabaja en un entorno con obstáculos, el dotar al manipulador de grados de libertad adicionales le permitirá acceder a posiciones y orientaciones de su extremo a las que, como consecuencia de los obstáculos, no hubieran llegado con seis grados de libertad.

Otra situación frecuente es dotar al manipulador de un grado de libertad adicional que le permita desplazarse a lo largo de un carril aumentando así el volumen del espacio al que puede acceder. Tareas más sencillas y con movimientos más limitados, como las de la pintura y paletización, suelen exigir 4 o 5 GDL.

Cuando el número de grados de libertad del robot es mayor que los necesarios para realizar una determinada tarea se dice que el manipulador es redundante.

Espacio de trabajo : las dimensiones de los elementos del manipulador, junto a los grados de libertad, definen la zona de trabajo de este. La zona de trabajo se subdivide en áreas diferenciadas entre sí, por la accesibilidad específica del elemento terminal (aprehensor o herramienta), es diferente a la que permite orientarlo verticalmente o con el determinado ángulo de inclinación. También queda restringida la zona de trabajo por los límites de giro y desplazamiento que existen en las articulaciones.

El volumen de trabajo de un manipulador se refiere únicamente al espacio dentro del cual puede desplazarse el extremo de su muñeca. Para determinar el volumen de trabajo no se toma en cuenta el actuador final. La razón de ello es que a la muñeca del robot se le pueden adaptar grippers de distintos tamaños.

Para ilustrar lo que se conoce como volumen de trabajo regular y volumen de trabajo irregular, tomaremos como modelos varios robots.

El robot cartesiano y el robot cilíndrico presentan volúmenes de trabajo regulares : El robot cartesiano genera una figura cúbica mientras que el robot de configuración cilíndrica presenta un volumen de trabajo parecido a un cilindro (normalmente este robot no tiene una rotación de 360°).

Por su parte, los robots que poseen una configuración polar, los de brazo articulado y los modelos SCARA presentan un volumen de trabajo irregular.

Precisión de los movimientos : la precisión de movimiento en un robot industrial depende de tres factores :

- **La resolución espacial** : se define como el incremento más pequeño de movimiento en que el manipulador puede dividir su volumen de trabajo.
- **La exactitud** : se refiere a la capacidad de un manipulador para situar el extremo de su muñeca en un punto señalado dentro del volumen de trabajo. Mide la distancia entre la posición especificada y la posición real del actuador terminal del robot. Mantiene una relación directa con la resolución espacial.
- **La repetibilidad** : se refiere a la capacidad del manipulador de regresar al punto programado las veces que sean necesarias. Esta magnitud establece el grado de exactitud en la repetición de los movimientos de un manipulador.

Capacidad de carga : el peso que puede transportar la garra del manipulador recibe el nombre de capacidad de carga. A veces, este dato lo proporcionan los fabricantes, incluyendo el peso de la propia garra.

En modelos de manipuladores industriales, la capacidad de carga de la garra puede oscilar de entre 0.9kg. y 205kg. La capacidad de carga es una de las características que más se tienen en cuenta en la selección de un manipulador, según la tarea a la que se destine. En soldadura y mecanizado es común precisar capacidades de carga superiores a los 50kg.

Velocidad : se refiere a la velocidad máxima alcanzable por las articulaciones. En muchas ocasiones, una velocidad de trabajo elevada, aumenta extraordinariamente el rendimiento del manipulador, por lo que esta magnitud se valora considerablemente en la elección del mismo.

En tareas de soldadura y manipulación de piezas es muy aconsejable que la velocidad de trabajo sea alta. En pintura, mecanizado y ensamblaje, la velocidad debe ser media e incluso baja.

Tipo de actuadores : los elementos motrices que generan el movimiento de las articulaciones pueden ser, según la energía que consuman, de tipo neumático o eléctrico.

La energía neumática dota a sus actuadores de una gran velocidad de respuesta junto a un bajo coste, pero su empleo está siendo sustituido por elementos eléctricos.

Los motores eléctricos, que cubren la gama de media y baja potencia, acaparan el campo de la Robótica, por su gran precisión en el control de su movimiento y las ventajas inherentes a la energía eléctrica que consumen.

Programabilidad : la inclusión del controlador de tipo microelectrónico en los manipuladores industriales permite la programación de este de muy diversas formas. En general, los modernos sistemas de manipuladores admiten la programación manual, mediante un modulo de programación.

Las programaciones gestual y textual, controlan diversos aspectos del funcionamiento del manipulador :

- Control de la velocidad y la aceleración.
- Saltos de programa condicionales.
- Temporizaciones y pausas.
- Edición, modificación, depuración y ampliación de programas.
- Funciones de seguridad.
- Funciones de sincronización con otras máquinas.

2.2.4. Aplicaciones de los manipuladores.

El uso de robots manipuladores se ha generalizado, va desde su uso en el ensamblaje de circuitos impresos hasta en cirugías de operaciones. Sin embargo es en la industria automotriz donde su empleo ha sido mayor, en aplicaciones como soldadura de puntos, pintado, manipulación de partes de carrocería, chasis y motor.

2.3. Sistemas de control.

Conjunto de dispositivos que interactúan juntos con la finalidad de lograr un objetivo de control; estos se clasifican en dos grandes grupos, sistemas de control de lazo abierto y de lazo cerrado.

Sistema de control de lazo abierto : son aquellos en los que la variable de salida no tiene efecto sobre la acción de control.

El control en lazo abierto suele aparecer en dispositivos con control secuencial, en el que no hay una regulación de variables sino que se realizan una serie de operaciones de una manera determinada. Las características principales que presenta son las siguientes :

- No se compara la salida del sistema con el valor deseado de la salida del sistema (referencia).
- Para cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fijada.
- La exactitud de la salida del sistema depende de la calibración del controlador.
- En presencia de perturbaciones estos sistemas de control no cumplen su función adecuadamente.

Sistema de control de lazo cerrado : son aquellos en los que la señal de salida del sistema tiene efecto directo sobre la acción de control. La presencia de perturbaciones tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia.

2.4. Sistemas de control de fuerza para terminales de manipuladores.

En la actualidad, a la hora de hablar de estrategias de control de fuerza se pueden encontrar distintas clasificaciones. A continuación mencionamos algunas :

Según la forma de obtener la fuerza ejercida :

Control implícito : aquí no existe una realimentación real de la fuerza, sino que el control de esta se realiza mediante el ajuste de la ganancia del bucle de posición (no existen sensores de esfuerzo y la fuerza se calcula en base a otros parámetros y no directamente).

Control explícito : aquí si se realiza un bucle de control de fuerza por lo que se precisa de un sensor de fuerza (existe un sensor de esfuerzos que proporciona un valor de la fuerza ejercida en el entorno).

Otras clasificaciones a tener en cuenta son las siguientes :

Control de rigidez : controla la rigidez del efector final del robot manipulador mediante un control en posición: la fuerza ejercida depende, de forma implícita, de una referencia de posición definida en el interior del entorno. Para determinar con precisión la fuerza aplicada, es imprescindible el conocimiento del modelo del entorno.

Control híbrido : con este esquema se consigue aplicar una fuerza en una dirección mientras se mueve el efector final en otras. Esto se consigue gracias a dos controladores (de fuerza y de posición) que actúan simultáneamente en direcciones espaciales complementarias, de forma que en unas direcciones se realiza control de fuerza y en el resto control de posición, de acuerdo con una matriz de selección. Este método exige un conocimiento preciso de la geometría del entorno y una estrategia adecuada para planificar las tareas de control.

Control de impedancia : este tipo de métodos tienen como finalidad controlar la relación entre el movimiento del manipulador y la fuerza que ejerce sobre el entorno, lo que se conoce como impedancia mecánica. Dependiendo del objetivo de control el esquema debe incluir una realimentación de fuerza o de posición, denominándose control de admitancia o de impedancia según sea el caso.

2.5. Modelo Teórico

2.5.1. Descripción del modelo teórico

El desarrollo de este prototipo requiere del conocimiento de algunas herramientas de programación, de temas relacionados con motores eléctricos, técnicas de control, sistemas sensoriales y algunos temas de física clásica.

El prototipo a construir para controlar fuerzas será similar al de un agarre de brazo robot con dos grados de libertad; el cual, se encargará de coger un objeto con la fuerza suficiente (la cual será controlada por realimentación) tal que al levantarlo, este no deslice o caiga y mucho menos se quiebre debido a la fuerza aplicada. El valor de la fuerza con que se ha de coger un objeto será calculada antes de llevar a cabo dicha experiencia.

Una vez que hallamos levantado el objeto evitando el deslizamiento, se procederá a detectar la fuerza que se tiene ejerciendo sobre dicho objeto por parte de la pinza de

agarre. Para la detección de la fuerza de agarre mínima se hará uso de un sensor de fuerza de alta sensibilidad; el cual permitirá detectar fácilmente las variaciones en el valor de la fuerza que se viene ejerciendo en cada instante de tiempo.

Para llevar a cabo todo el proceso de sensado de fuerzas, se deberá tener en cuenta algunas restricciones que tendrá el prototipo a implementar. Algunas de ellas son :

- La fuerza umbral necesaria deberá ser calculada antes de coger un objeto.
- Los objetos a coger deberán de tener una misma geometría y serán seleccionados previamente.
- Los objetos con los que se trabajen tendrán que ser simétricos y rígidos.

A continuación pasaremos a definir los puntos a tener en cuenta para el desarrollo que se piensa implementar :

Flexibilidad. El sistema debe adaptarse fácilmente a los cambios que se puedan producir en su entorno de trabajo; es decir, por cambio de objetos que se vayan a coger.

Posibilidad de proyección. El sistema debe ser capaz de poder adaptarse a mejoras o incremento de prestaciones que se les desee implementar; siempre, sin alterar su base de funcionamiento.

Precisión y repetibilidad. El mecanismo de control de fuerza debe de operar con precisión en las tareas a las que vaya destinado, en especial si son repetitivas; ya que, debe de operar durante todo el ciclo repetitivo con la misma eficiencia.

Manejo de programación. Para llevar a cabo el control de fuerza sobre el prototipo de manipulador que se piensa implementar, se debe de hacer uso de algunos software de programación, microcontroladores y algunos programas que permitan desarrollar entornos gráficos.

Velocidad de respuesta. El sistema para controlar fuerzas debe de tener una alta velocidad de respuesta, ya que debe de ir sensando en todo momento el valor de la fuerza con que se presionan a los objetos que se desean coger; además, debemos de

tener en cuenta que también deben de ser capaces de controlar los sobrepicos de fuerza que se pueden generar en el momento que se coje un objeto.

2.5.2. Definiciones operativas

a) Indicadores Cualitativos

Permiten conocer la calidad, los grados de mejora de ciertas características claves en el prototipo para el control de fuerzas.

- **Control de fuerza en tiempo real.** Se realiza una correspondencia en tiempo real entre la fuerza que ejerce la pinza de agarre y las posiciones actuales de las articulaciones de estas (en el prototipo); esto permitirá controlar diferentes umbrales de fuerza que se producen en el movimiento controlado de agarre.

- **Incremento de los grados de libertad.** El aumento en los grados de libertad permite un mejor direccionamiento de las pinzas (mayor cantidad de ejes para desplazar esta) incrementando así la estabilidad de agarre en nuestro prototipo, lo cual permitirá un mejor sentido de fuerzas.

- **Control de deslizamientos.** Evitando el uso innecesario de exceso de fuerza e incluso la falta de ésta al momento de coger determinado objeto. Esto permite un mejor sentido de fuerzas obteniendo de esta manera solo los valores umbrales o críticos.

- **Corrección de perturbaciones.** Control realimentado al sistema que sensa las fuerzas; evitando así cualquier variación en ésta debido a perturbaciones externas, y permitiendo además llegar a los valores de fuerza umbrales establecidos.

b) Indicadores Cuantitativos

Indica numéricamente los logros o degradaciones de ciertas características en el prototipo para el control de fuerzas.

- **Umbrales de fuerza.** Detección de los umbrales de fuerza; los cuales muchas veces son necesarios para múltiples propósitos como son la minería, el campo automotriz, industrial y en especial la robótica.

- **Mejora en la calidad y cantidad de producción.** Este indicador va relacionado con los procesos de producción, en los cuales se tiene en cuenta el sentido de fuerza para el control y automatización de las maquinarias empleadas, aumentando así su eficiencia.



CAPÍTULO 3:

DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL DE FUERZA

3.1. Hipótesis

3.1.1. Hipótesis Principal

Dado que en el país, el uso de manipuladores destinados a tareas de agarre no es muy difundido; y de estos, la mayor parte llevan incorporados terminales de agarre del tipo ON/OFF (su terminal de contacto, abre y cierra completamente en un solo movimiento), esto conlleva en líneas generales a una limitada utilidad de este en múltiples actividades de acuerdo al área que sea destinado, debido más que todo a la poca flexibilidad de operación y a la falta de precisión que ofrece su terminal al momento de entrar en funcionamiento. Entonces, un sistema de control de fuerza implementado en los terminales de dicho manipulador basado en el sensado continuo de la fuerza de contacto podría mejorar el desempeño de los manipuladores ON/OFF, ampliando así su rango de operación. De este modo logramos una mejora y un desarrollo sobre la actividad a la que sea destinado dicho manipulador.

3.1.2. Hipótesis Secundarias

- 1) En gran parte de los manipuladores destinados a funciones de agarre, los terminales de contacto de éstos con el medio ambiente son pinzas que manipulan los objetos con una misma velocidad de apertura - cierre (pinzas del tipo ON/OFF), independientemente de las características físicas que tengan dichos objetos.
- 2) La implementación de un sistema de control de fuerza en los terminales de agarre de los manipuladores permite que se controle la fuerza que éstos ejercen sobre un objeto dado; de tal manera que se alcance el valor necesario y suficiente para sostener y no dañar a dicho objeto.

- 3) Los manipuladores de agarre comunes operan ante situaciones establecidas (misma tarea y mismo objeto a coger).
- 4) El implementar un sistema de control de fuerza en terminales de agarre comunes permitiría darle a éstos un mayor grado de sensibilidad ante entornos cambiantes (cambio del objeto a coger).
- 5) El uso de controladores con funciones comparativas para tal motivo, serviría como punto de base para controlar la fuerza, teniendo la posibilidad de encontrar mejores opciones en el transcurso.
- 6) Cada vez que se trabaja con controladores, existen dificultades con los parámetros de respuesta que se obtienen de éstos.
- 7) El uso de una interfaz amigable permitirá una fácil manipulación del conjunto manipulador-objeto por parte del usuario, el cual será ajeno a conocimientos de programación y/o electrónica.

3.2. Objetivos

3.2.1. Objetivo General

Desarrollar un sistema de control de fuerzas para un prototipo de terminal manipulador que, permitirá controlar la fuerza de agarre de objetos previamente establecidos.

3.2.2. Objetivos específicos

- 1) Adaptar el sistema a entornos cambiantes (cambio de objeto a coger).
- 2) Analizar la posibilidad de incluir movimiento rotacional a nuestro sistema manipulador.
- 3) Determinar valores de fuerza umbrales (límite) para procesos de agarre o presión.

3.3. Metodología

Primero describiremos a modo genérico los procesos que se llevarán a cabo :

Se seleccionará el material que se desea coger. De acuerdo a los parámetros físicos de este (masa), se procederá a calcular el valor de la fuerza umbral (valor deseado) para coger dicho material. El proceso de agarre será llevado a cabo por el prototipo de terminal de agarre manipulador. Este irá cerrándose progresivamente hasta que se detecte por medio de un sensor de fuerza (acoplado al terminal de agarre) que se está ejerciendo la fuerza necesaria para coger dicho material. En ese momento, se

procederá a parar el cierre del terminal de agarre. El control de fuerza de agarre se hará con un microcontrolador; el cual, llevará a cabo un control comparativo de fuerza entre un valor deseado y el medido por el sensor.

A continuación describiremos con mayor detalle los procesos y recursos involucrados en nuestro desarrollo.

- Determinación de los coeficientes de fricción estático (μ_s) entre los materiales empleados para nuestras pruebas y la superficie de agarre del manipulador :

Se realizarán pruebas experimentales de fricción; esto es, entre cada material y la superficie de contacto (plancha de aluminio) la cual, será unida luego al terminal de agarre. De esta manera, obtendremos los valores de los coeficientes de fricción estáticos (μ_s) para cada material.

Estas pruebas experimentales consisten en colocar pequeñas muestras de cada material (una por vez), con las que se piensa trabajar, sobre el extremo de una superficie plana inclinable (aluminio). Luego se procede a levantar dicho extremo, manteniendo el otro fijo, hasta que se detecte el instante en que la muestra de prueba empieza a caer deslizándose sobre la superficie plana. En ese momento se detiene el levantamiento del extremo donde se encontraba la muestra y se calcula el ángulo (θ) que forma la inclinación de la superficie plana con respecto a un plano vertical. (ver Fig.3.1)

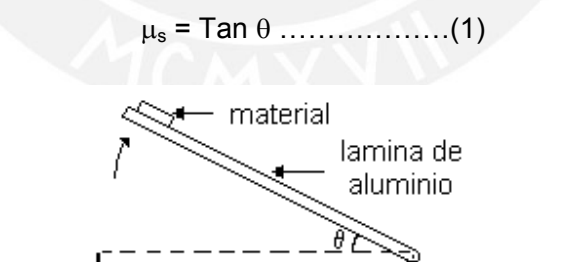
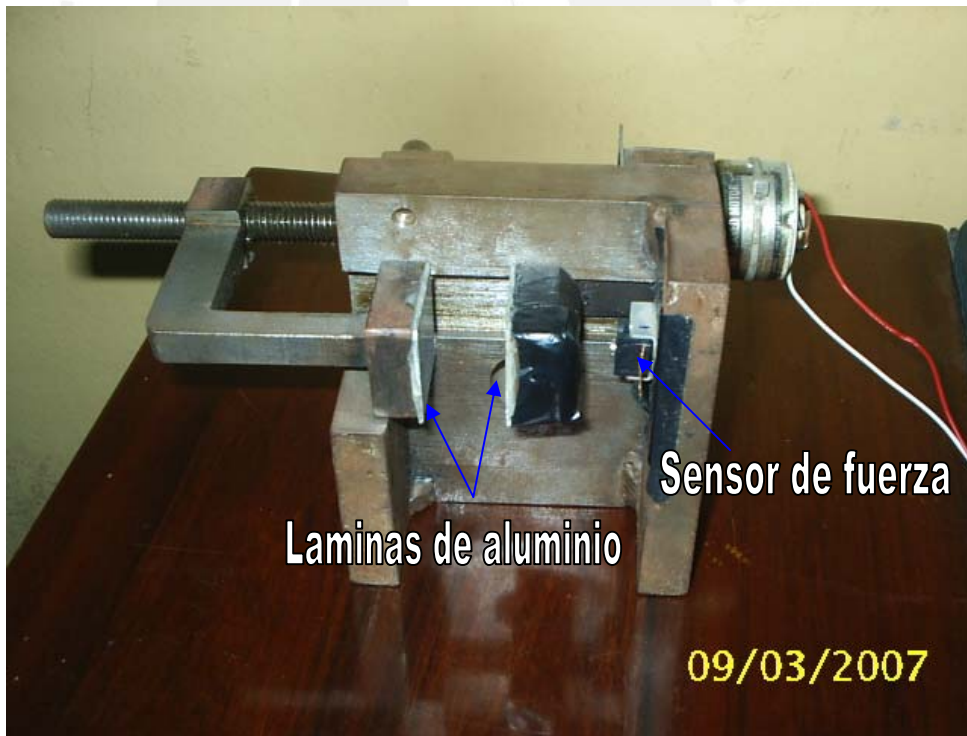


Fig. 3.1 Esquema del método para la obtención del coeficiente de fricción estático.



a)



b)

Fig. 3.2 Prototipo del terminal de agarre.

a) Vista frontal del prototipo de terminal de agarre.

b) Vista de base del prototipo de terminal de agarre.

- Determinación de la fuerza umbral de agarre (F_d) :

Para obtener el valor de la fuerza necesaria para coger los materiales; se hará uso de ecuaciones físicas relacionadas a la estática de cuerpos rígidos. De acuerdo a estas y al diagrama de cuerpo libre del mecanismo de agarre (ver Fig.3.2), se obtiene la siguiente fórmula para la obtención de la fuerza umbral de agarre : (ver Fig.3.3)

$$m_{\text{material}} * g = 2 * f \quad \dots\dots\dots(2)$$

$$m_{\text{material}} * g = 2 * \mu_s * N \quad \dots\dots\dots(3)$$

Esta primera parte será trabajada sobre Labview por lo que la operación será automatizada. Los valores de μ_s . serán almacenados previamente en el entorno gráfico de Labview; para luego ser operados con el valor de la masa, la cual será ingresada vía teclado por el usuario. De esta operación interna obtendremos el valor de la fuerza umbral necesaria para coger la muestra que se presenta.

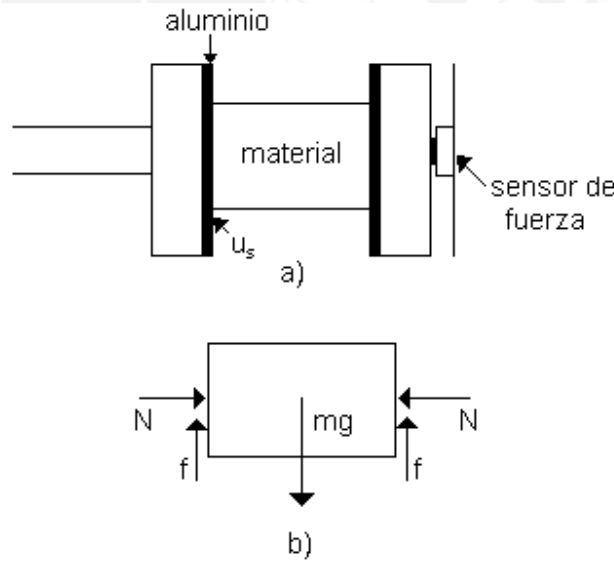


Fig. 3.3 a)Mecanismo para el agarre de materiales. b)Diagrama de cuerpo libre de los materiales.

- Control de fuerza :

El control de fuerza se hará a través de un microcontrolador utilizando un control de seguimiento comparativo. Este tendrá almacenado el valor de la fuerza umbral deseada, la cual se le es entregado desde el Labview vía comunicación serial. Luego

de tener almacenado el valor de la fuerza umbral, el motor se encenderá haciendo cerrar el terminal de agarre manipulador de nuestro prototipo. Al mismo tiempo que el terminal de agarre comienza a cerrarse el microcontrolador empezará a comparar el valor de fuerza umbral deseado con el valor medido desde el sensor fuerza. Una vez que ambos valores coincidan, el microcontrolador estará enviando una señal de parada al motor haciendo que éste detenga el cierre del terminal de agarre. Luego de apagado el motor se procede a leer la fuerza sensada hasta detectar el momento en que su valor se estabiliza. En ese momento se procede a enviar el valor de fuerza estabilizada al entorno Labview para que sea mostrada. El diagrama de control se muestra a continuación.

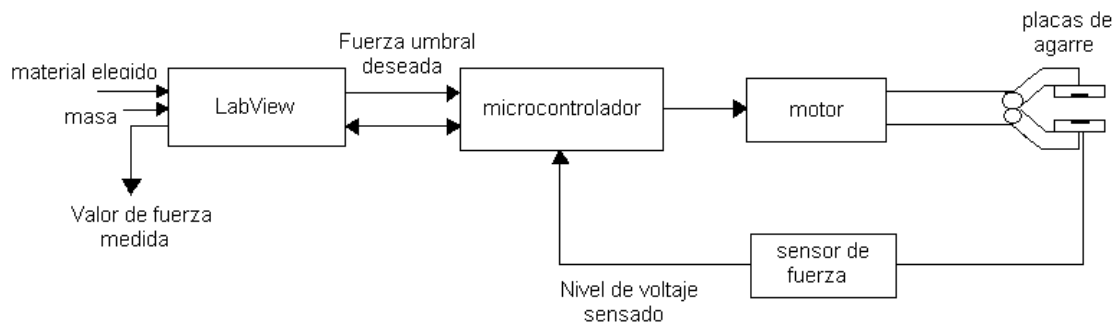


Fig. 3.4 Diagrama del sistema de control de fuerza

El sistema para control de fuerzas en su conjunto está compuesto de 2 partes : Hardware y Software.

3.3.1 Hardware :

- **Circuito para tratamiento de señales :**

Este circuito se encarga de adquirir y acondicionar las variables físicas de fuerza provenientes del entorno de trabajo. Es decir, tiene como propósito convertir las variables físicas de fuerza en señales eléctricas; a fin de que, puedan ser luego fácilmente manejadas por cualquier dispositivo electrónico (en nuestro caso un microcontrolador). Los procesos de adquisición y acondicionamiento de señales se detallan a continuación:

- **Adquisición de señales :** Para la adquisición de señales se hará uso del sensor de fuerza **FSG-15N1A** de la compañía **Honeywell**. Este se encargará

de transformar las variables físicas de fuerza en señales eléctricas (voltaje). Las características más saltantes que presenta dicho sensor son las siguientes:

- Resolución de 1gr fuerza, lo cual permitirá trabajar con materiales pequeños (poca masa) ya que no se perderán muchos datos al momento de realizar la medición de fuerza, haciendo mas precisa esta (amplio rango de medición).
- Rápida respuesta en el tiempo (1ms max.), lo cual permite rapidez en la toma de datos acorde con la velocidad de funcionamiento del microcontrolador.
- Bajo consumo de potencia.
- Ideal para aplicación en terminales de robots.
- Conserva las características eléctricas en cualquier disposición que se la desee utilizar, lo cual permite acoplarla verticalmente.
- Puede soportar hasta 5.5Kgf, con lo cual permite trabajar con materiales mas pesados.
- Alta sensibilidad (aprox. 0.24 mV/grf).

Todas las características eléctricas fueron tomadas en base a pruebas tomando como punto de referencia el peso muerto (sin peso).

- o **Acondicionamiento de señal** : En esta etapa las señales provenientes del sensor de fuerza son primero amplificadas y luego si fuera necesario son filtradas.

Para amplificar las señales se hará uso del amplificador de instrumentación **INA 121** de la compañía **Burr Brown**. Este se encargará de acondicionar el nivel de voltaje que viene del sensor. Normalmente las señales eléctricas proveniente de los sensores se encuentran en el rango de los milivoltios; por lo que, muchas veces es necesario amplificarlas a nivel de voltios. Todo esto, con la finalidad de que luego puedan ser manejadas con comodidad por los distintos circuitos electrónicos.

Algunas de las características más saltantes del INA 121 son las siguientes:

- Ideal para sistemas de adquisición de datos e instrumentación médica.
- Bajo error de no linealidad para ganancias ($\pm 0.001\%$ max.), lo cual hace mas confiable la amplificación y digitalización de los valores medidos.
- Soporta altas temperaturas (-55 a 125 °C)

- Soporta un amplio rango de voltaje de entrada sin que afecte el valor de la ganancia ($\pm 2.25V$ a $\pm 18V$), lo cual permite trabajar con pilas comunes.
- Mantiene niveles de ganancia estables para un amplio rango de frecuencias según la ganancia requerida, siendo en el peor de los casos el valor de la ganancia estable hasta frecuencias del valor de 5KHz.
- Provoca bajo ruido a la entrada (del orden de la decenas de $nV/(Hz)^{1/2}$), lo cual impide que se confundan con los bajos niveles de entrada que se desea amplificar.
- Brinda la posibilidad de graduar la ganancia fácilmente a través de una resistencia variable la cual se le puede acoplar fácilmente.

- **Circuito para programación del microcontrolador (Circuito de control) :**

Este circuito tiene como función primordial la programación del microcontrolador (Atmega8). Además, permite el fácil manejo de gran parte de los puertos de entrada/salida del microcontrolador haciendo posible la unión de este con cualquier otro circuito periférico. Finalmente, brinda la posibilidad de comunicación con una PC vía el puerto serial haciendo de esta manera aún mas completo el circuito.

Se eligió trabajar con el microcontrolador Atmega8 debido al conocimiento que se tiene sobre este y por el fácil manejo en su programación. A continuación se muestran algunas de las características más relevantes de este microcontrolador :

- Tiene 32 registros de 8 bits de propósito general
- Memorias : Memoria flash de 8 Kbytes, EEPROM de 512 bytes y SRAM de 1Kbytes
- Características de los periféricos internos:
 - 2 temporizador / contador de 8 bits con pre-escalador y comparador
 - 1 temporizador / contador de 16 bits con pre-escalador, comparador y capturador
 - 6 canales de entrada para cada convertidor A/D (4 canales de 10bits y 2 de 8 bits)
 - 1 Usart (modulo programable para comunicación serial)
 - 1 modulo SPI, para interface serial.
 - 1 comparador analógico
 - Puertos programables de entrada / salida

- Puerto B, con 8 líneas
- Puerto C, con 7 líneas
- Puerto D, con 8 líneas
- o Velocidad de operación : 0 – 8 MHz
- o Voltaje de alimentación : 2.7 a 5.5 voltios
- o Fuentes de interrupción internas y externas
- o Oscilador interno de 1, 2, 4 y 8 MHz

De todas estas características solo haremos uso de :

- o Memorias flash y SRAM.
 - o Registros de propósito general.
 - o 1 temporizador / contador de 16 bits.
 - o 1 temporizador / contador de 8 bits.
 - o 1 canal de entrada para convertidor A/D de 8 bits.
 - o 1 USART para la comunicación serial con la PC
 - o 2 puertos de entrada / salida.
- **Circuito de potencia :**

Este circuito se encarga de alimentar al motor DC; además, debido a que se trabajará con un motor DC que girará en ambos sentidos (el giro del motor será definido por señales que provienen del microcontrolador), el circuito esta diseñado para soportar la inversión de polaridad en las bobinas del motor.

El circuito de potencia además se encontrará separado físicamente de la etapa de control, a fin de que los niveles de corriente altos que fluyen por el circuito de potencia no dañe al circuito de control. Algunos de los componentes mas relevantes del circuito de potencia son los siguientes :
- o Puente H (L298) : Permite invertir fácilmente la polaridad de las bobinas.
 - o Diodos (1N4004) : Protegen al puente H de los picos de arranque y parada del motor debido a la corriente inversa inducida en estos.
 - o Optoacopladores : Permiten separar físicamente la etapa de control con la de potencia.

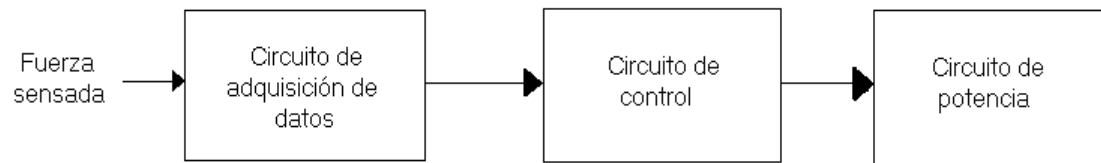


Fig. 3.5 Esquema del hardware para el sistema de control de fuerza



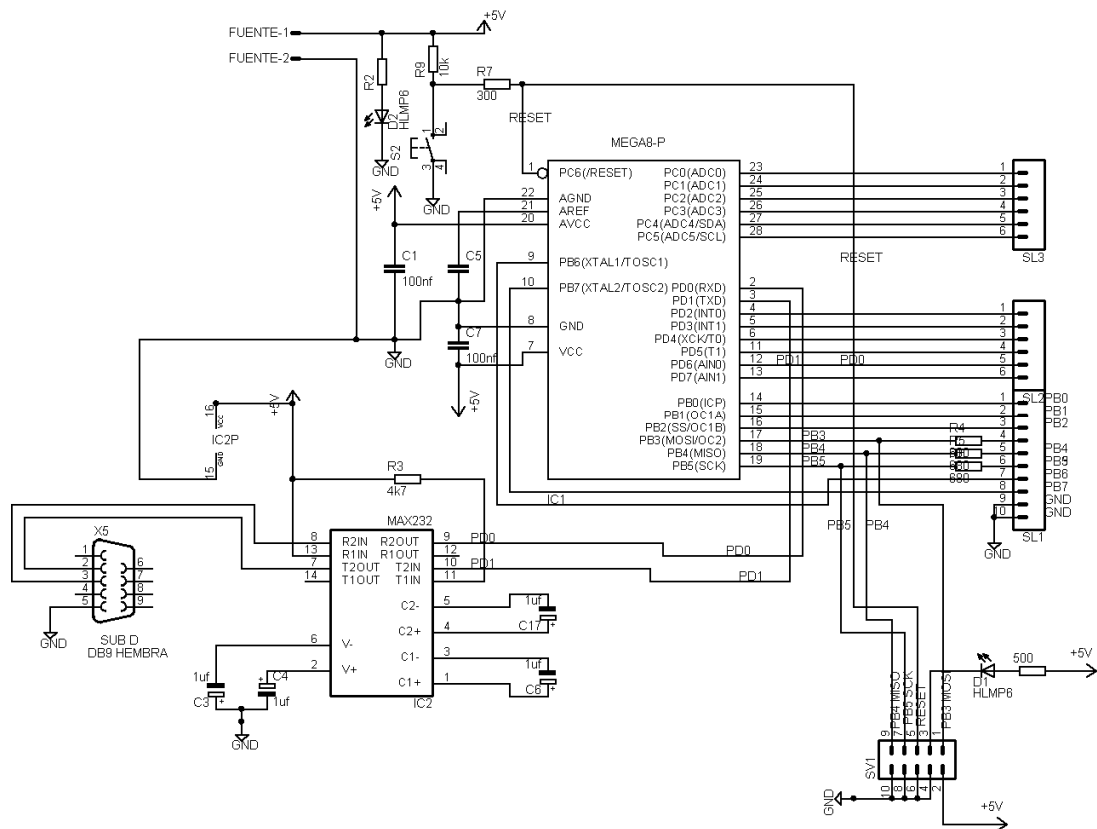


Fig. 3.6 Diagrama esquemático del circuito de control*

* Fuente : Manual de Laboratorio de Sistemas Digitales - PUCP

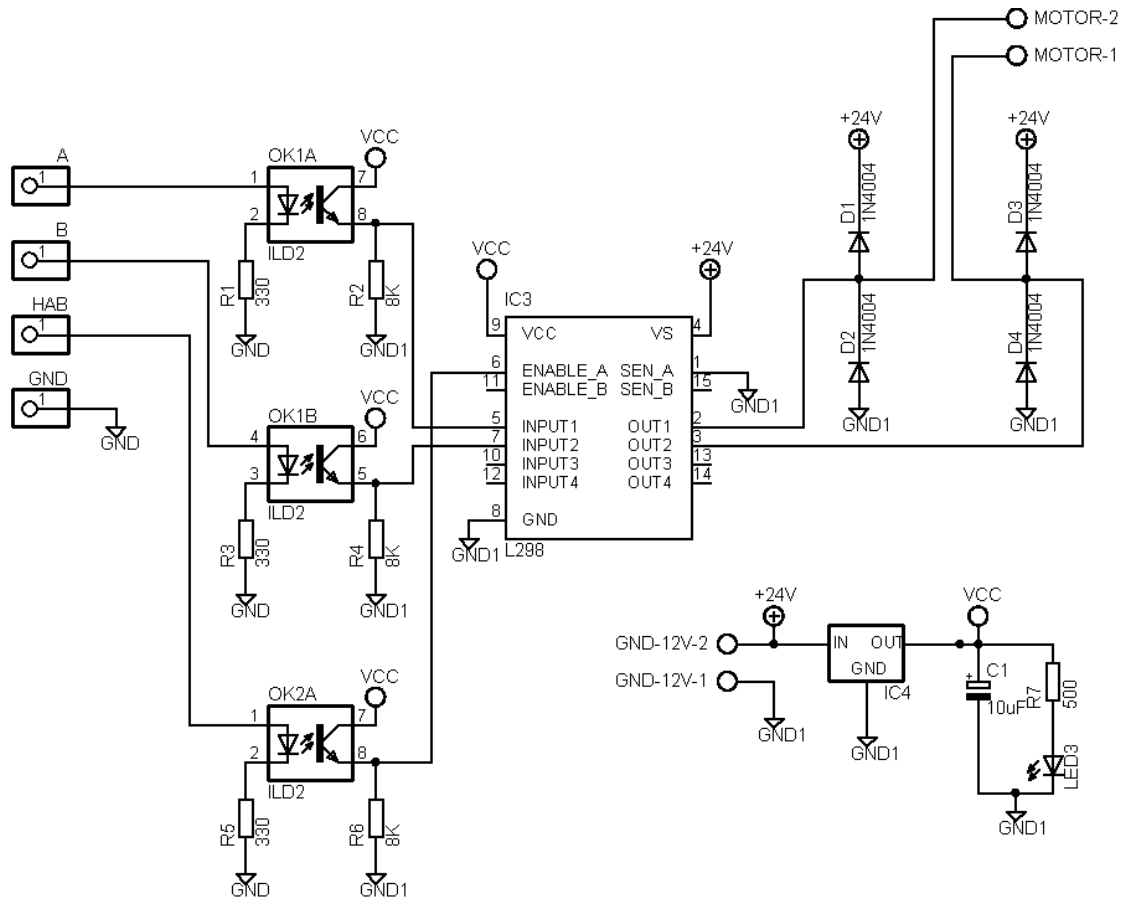
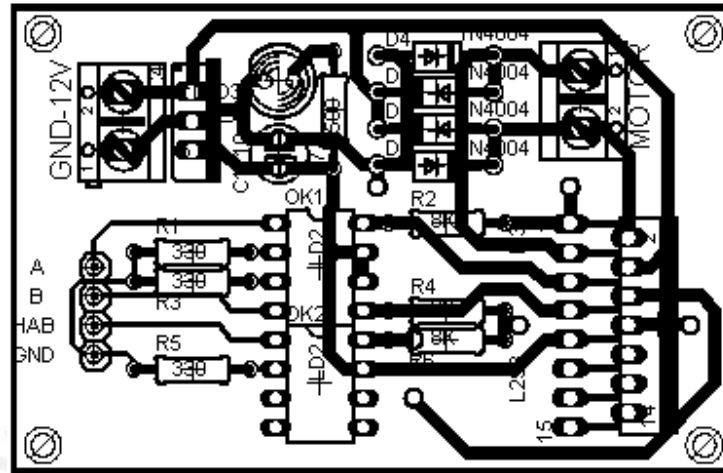
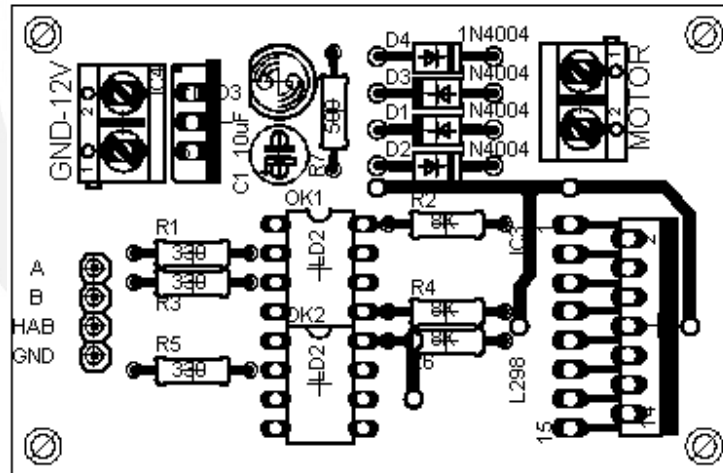


Fig. 3.8 Diagrama esquemático del circuito de potencia*

* Fuente : Hoja de datos del L298 (Aplicaciones) – www.alldatasheet.com



a)



b)

Fig. 3.9 Tarjeta del circuito de potencia. a)Cara de componentes. b)Cara de soldadura.

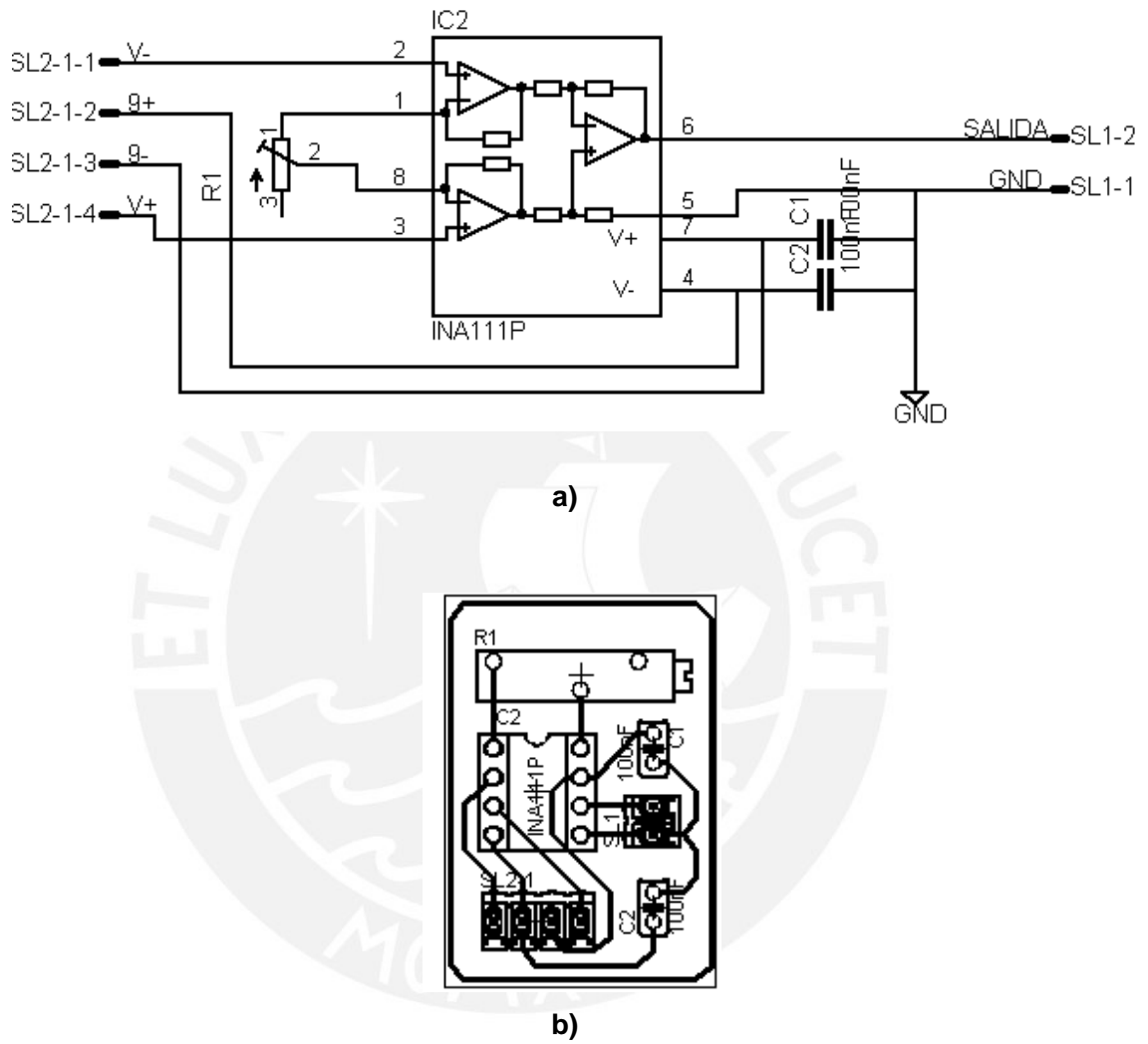


Fig. 3.10

a) Diagrama esquemático del circuito de adquisición de datos*.

b) Cara de soldadura de la tarjeta de adquisición de datos.

* Fuente : Hoja de datos del INA121 – www.alldatasheet.com

3.3.2. Software :

- **Microcontrolador Atmega8 :**

Se hará uso de un microcontrolador (Atmega8) para realizar la conversión A/D de la señal proveniente del sensor de fuerza así como también, para llevar a cabo la comunicación con la PC (transferencia de datos). Finalmente y como punto más importante esta su uso para programar el control necesario de nuestro sistema.

- **Digitalización de la señal (Atmega8) :** Se encarga de digitalizar la señal analógica proveniente de la etapa de adquisición de datos para instantes discretos de tiempo. Para esto se hará uso del conversor A/D del microcontrolador el cual nos proporciona una resolución de hasta 10 bits. Para nuestro caso, dado que trabajaremos con materiales de bajo peso, será suficiente trabajar con un canal conversor de 8 bits.

- **Comunicación con la PC :** Proceso que se encarga de llevar a cabo la transferencia de datos, de forma serial, entre una PC y el microcontrolador.

- **Programa de control :** Programa que se encarga de relacionar la salida/entrada del microcontrolador con lo periféricos unidos a éste, a fin de llevar acabo la tarea de control que se le asigne por programación.

- **Entorno gráfico Labview :**

La automatización del proceso para la selección de materiales de trabajo se llevará a cabo, vía un entorno amigable en el cual estarán incluidos todos los coeficientes de fricción de los materiales y las formulas antes vistas. De esta manera, introduciendo por teclado los parámetros del material con el cual se eligió trabajar, podremos obtener fácilmente el valor de fuerza umbral deseada.

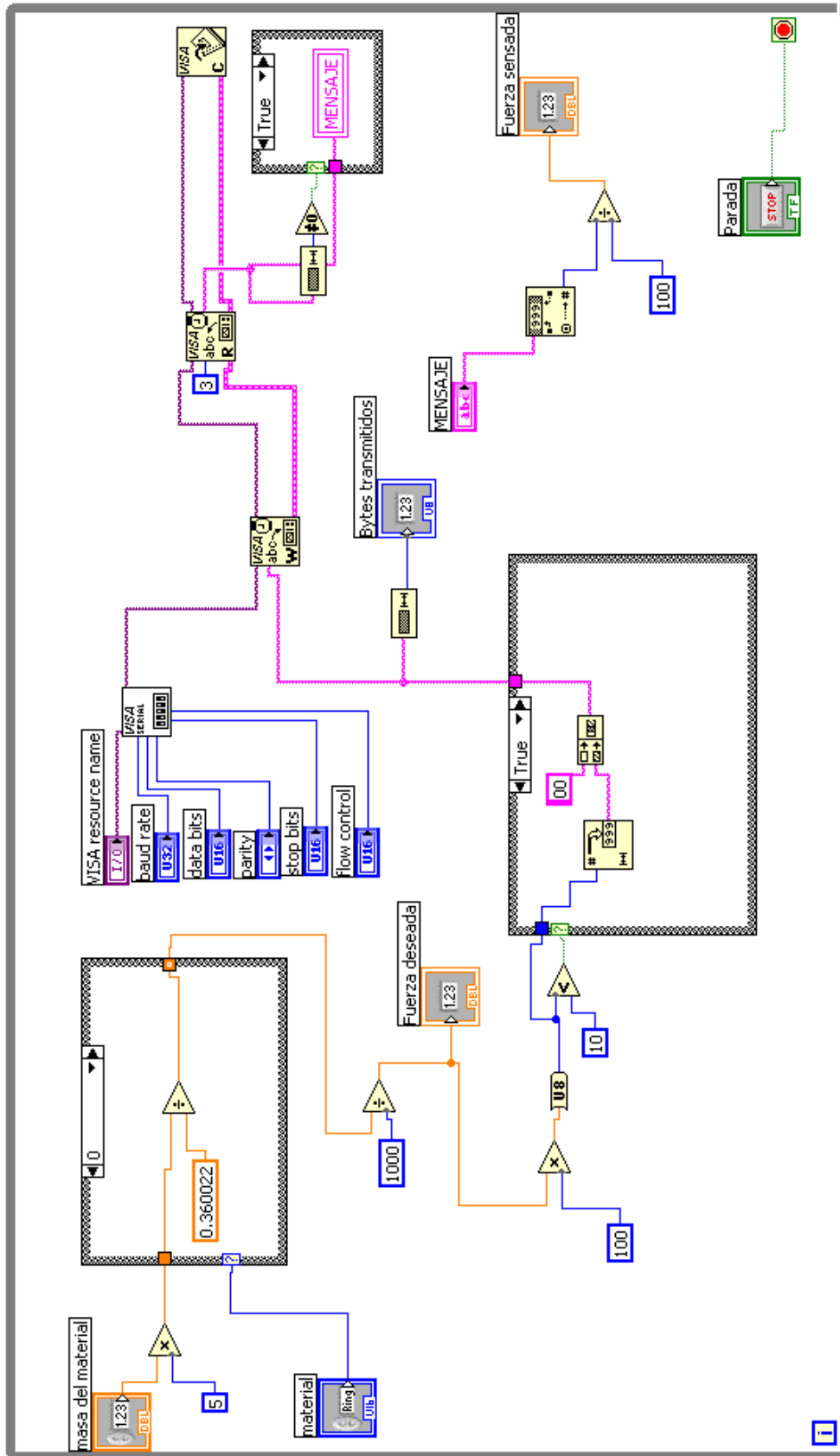


Fig 3.1.1 . Diagrama de bloques del entorno de operación del usuario - Labview

3.3.3. Diagramas de Flujo :

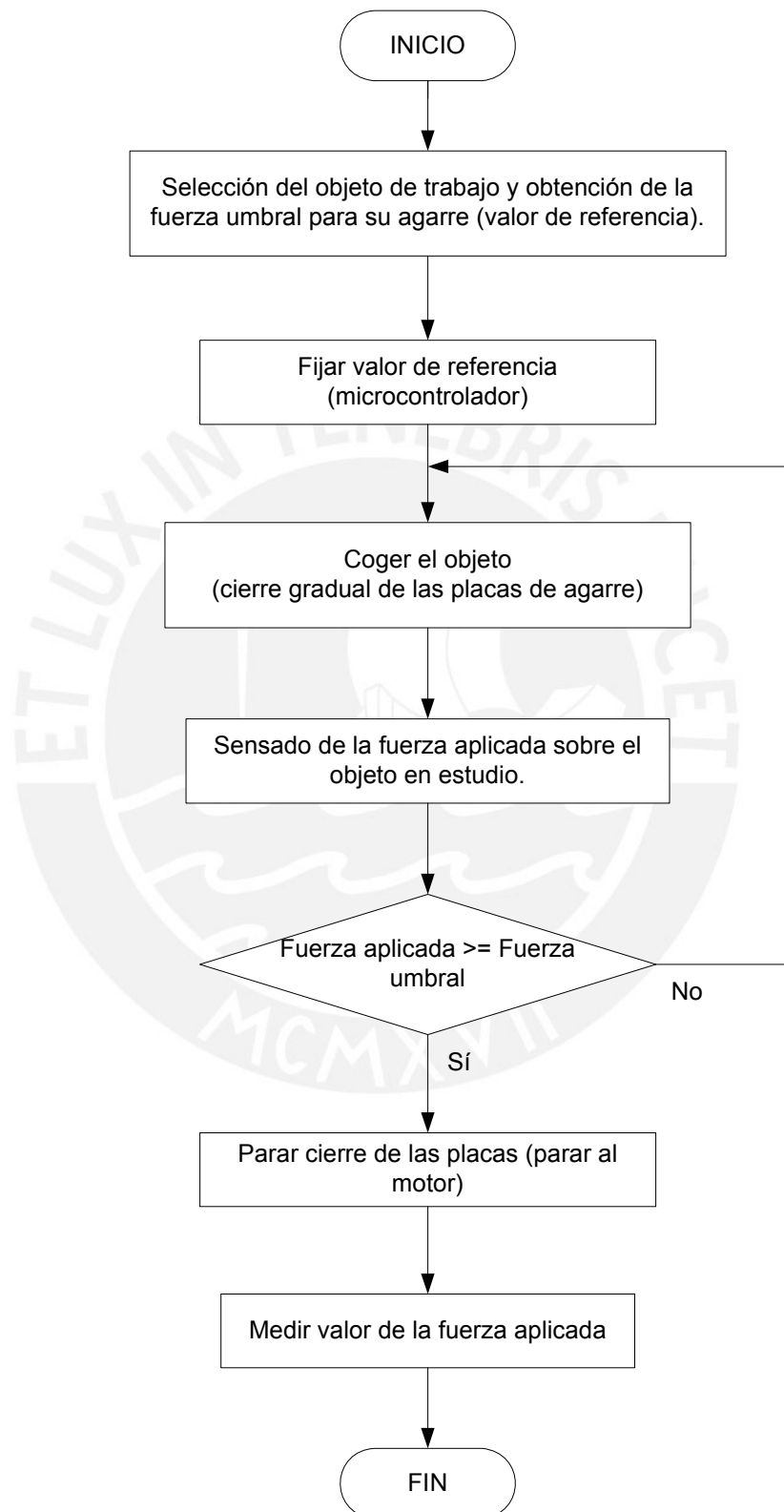


Fig. 3.12 Diagrama de flujo del sistema de control de fuerza

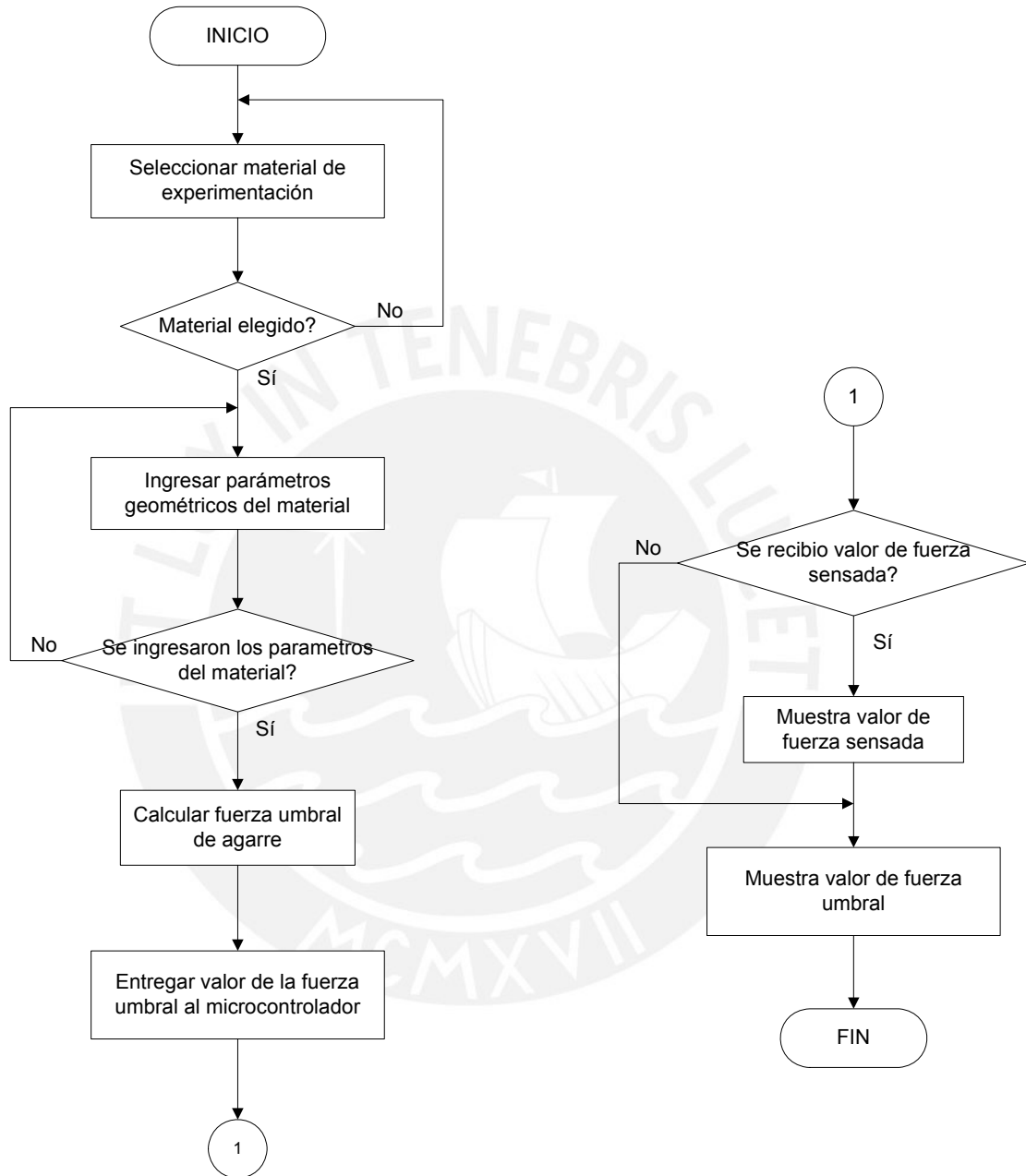


Fig. 3.13 Diagrama de flujo de la operación del entorno Labview

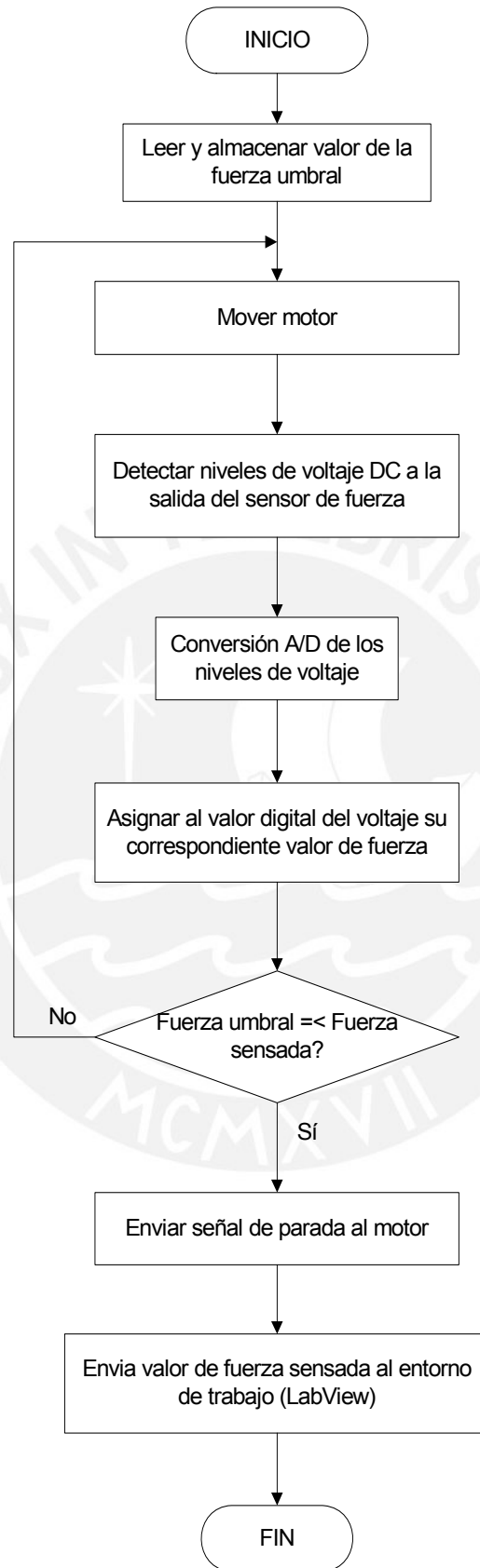


Fig. 3.14 Diagrama de flujo de la operación del microcontrolador

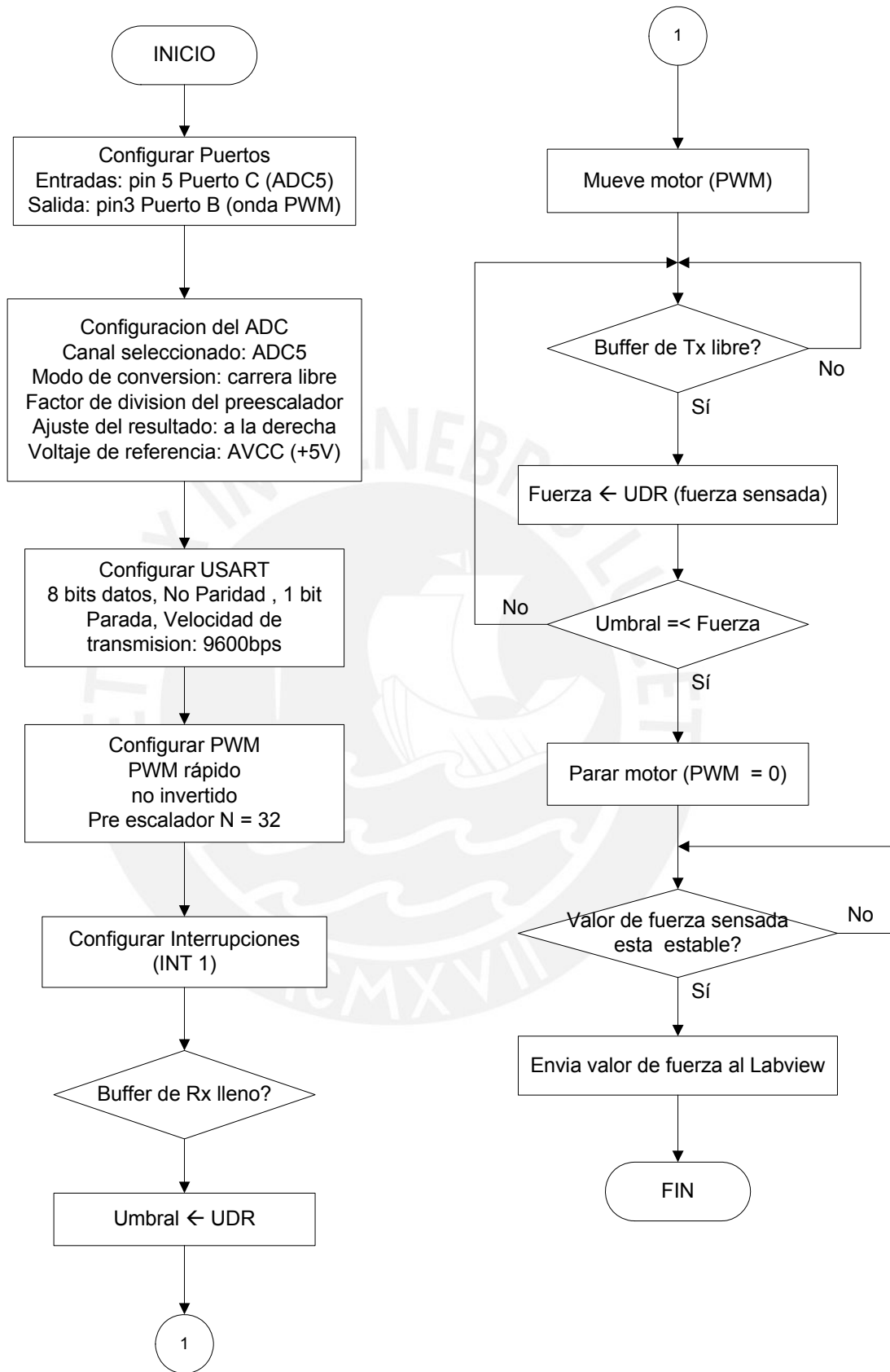


Fig. 3.15 Diagrama de flujo del programa principal de control

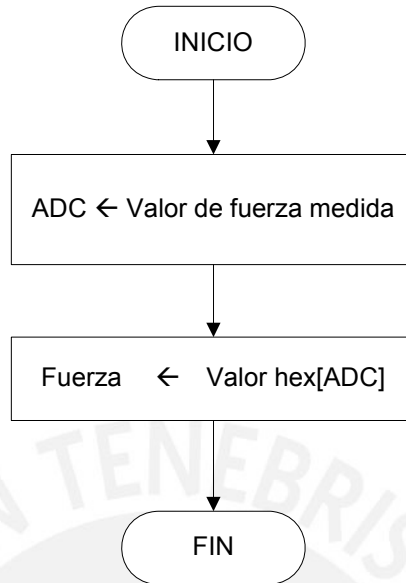


Fig. 3.16 Diagrama de flujo de la rutina de servicio de interrupción

CAPÍTULO 4:
PRUEBA, ANÁLISIS Y RESULTADOS

4.1. Etapa de adquisición de datos :

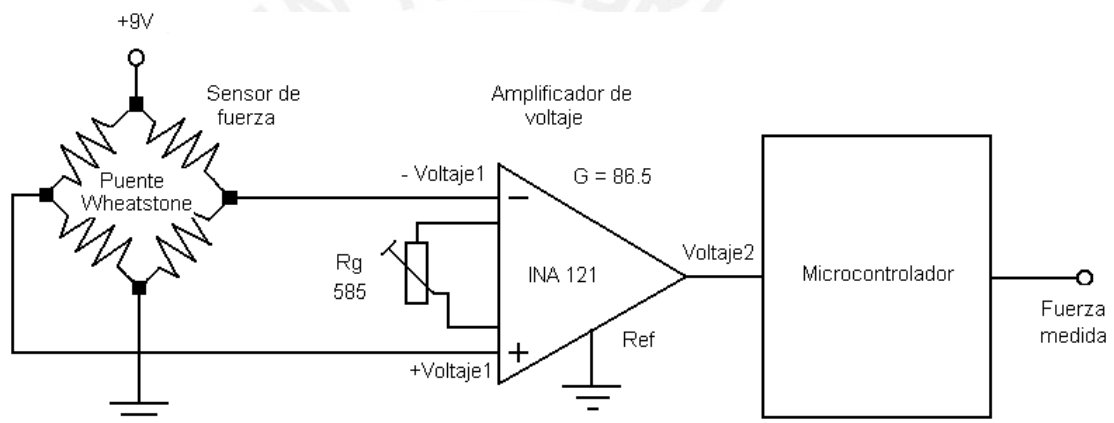


Fig. 4.1 Etapa de adquisición de datos*

Tabla 1 : Prueba de linealidad de respuesta para el sensor de fuerza

Masa (gr)	Voltaje1(mV)	Voltaje2(mV)
0	0.01	13.8
5	1.1	108.8
10	2.3	210.8
20	4.6	407
30	6.7	601
50	11.3	992
60	13.6	1193
70	15.8	1388

En las figuras 4.2 y 4.3 se pueden observar las curvas de respuesta del sensor de fuerza y del amplificador de voltaje respectivamente; los datos se extraen de la tabla 1.

* Fuente : Hoja de datos del INA121 (Aplicaciones) – www.alldatasheet.com

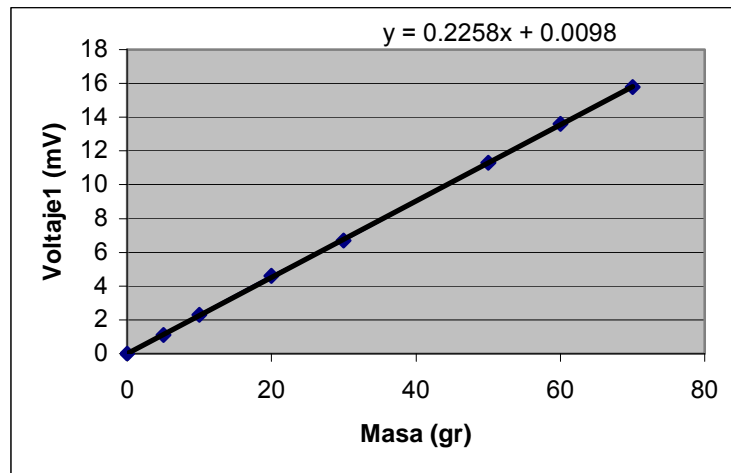


Fig. 4.2 Curva de respuesta del sensor de fuerza FSG-15N1A

De la curva de respuesta del sensor de fuerza mostrada, se obtiene :

Ecuación de respuesta del sensor : $y = 0.2258 \cdot x + 0.0098$

De esto se puede deducir que la respuesta masa vs. voltaje de salida del sensor es prácticamente lineal con cruce aproximado por el eje de coordenadas.

Ecuación de respuesta aproximada : $y = 0.2258 \cdot x$

Donde : resolución del sensor : 0.2258 mV/gr.

Definiremos nuestro rango de trabajo para medir valores de fuerza : 1...2,56N

Entonces : Rango de medición para masas : 1...256 gr.

Con todas las consideraciones antes definidas pasaremos a calcular los parámetros de la etapa de adquisición.

Calculo de la ganancia y del Rg para el INA 121 :

$$\begin{array}{l} 0.23 \text{ mV} \text{ ----- } 1\text{gr} \\ x \text{ ----- } 256\text{gr} \end{array} \rightarrow x = 57.8048 \text{ mV}$$

Ganancia :

$$5 \text{ V} / 57.8048 \text{ mv} = 86.5$$

Rg :

$$G = 1 + (50\text{K} / \text{Rg}) \rightarrow \text{Rg} = 584.8 \text{ ohm} \rightarrow \text{elegimos : } 585 \text{ ohm.}$$

De esto datos obtendremos que la mínima unidad de fuerza medida será de : 0.01N

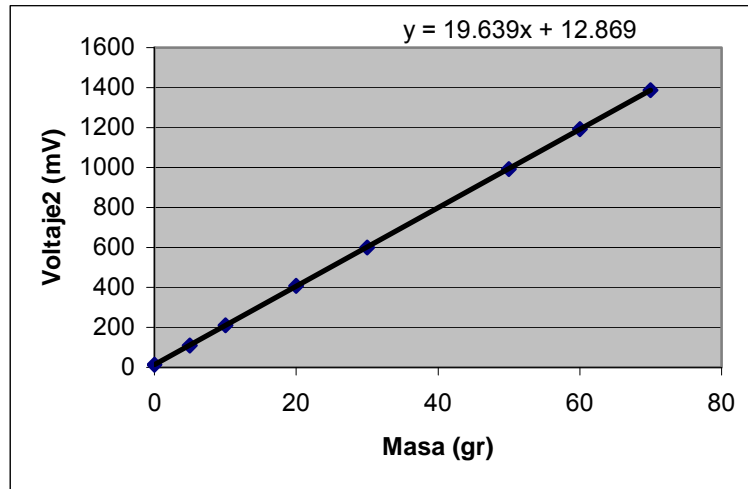


Fig. 4.3 Curva de respuesta a la salida del amplificador ($G = 86.5$)



a)

Fig. 4.4
a) Vista frontal de los materiales de prueba.



b)

Fig. 4.4 (continuación)

b) Vista superficial de los materiales de prueba.

4.2. Etapa de determinación de la fuerza umbral :

Se colocarán pequeñas muestras de cada material (una por vez), con las que se piensa trabajar, sobre el extremo de una superficie plana inclinable (aluminio). Luego se procede a levantar dicho extremo, manteniendo el otro fijo, hasta que se detecte el instante en que la muestra de prueba empieza a caer deslizando sobre la superficie plana. En ese momento se detiene el levantamiento del extremo donde se encontraba la muestra y se calcula el ángulo (θ) que forma la inclinación de la superficie plana con respecto a un plano vertical.

Tabla 2 : Coeficientes estáticos de los materiales

Material	Cobre	Bronce	Aluminio	Acero	Nylon	Jebe	Baquelita
θ_1	20°	21°	28°	20.5°	21°	43°	24°
θ_2	21.5°	19°	29°	20.5°	21°	42°	24°
θ_3	21.5°	20°	29°	19°	20°	42°	26°
θ_4	21°	20°	28°	21°	20°	40°	25°
θ_5	21°	19°	28°	20°	21°	40°	25°
θ promedio	21°	19.8°	28.4°	20.2°	20.6°	41.4°	24.8°
u_s	0.383864	0.360022	0.540698	0.367928	0.375875	0.881619	0.462065

Las masas de los materiales con los que trabajaremos para hacer nuestras pruebas serán las siguientes :

Tabla 3 : Masas de prueba para cada material

Material	Cobre	Bronce	Aluminio	Acero	Nylon	Jebe	Baquelita
M₁ (gr)	25.3	25.2	7.6	23.5	6.8	15.7	9.2
M₂ (gr)	51	50	16	47.1	13.5	30	18.5
M₃ (gr)	102.1	100.1	32.4	94.2	27.1	60	37

Cabe resaltar que para este caso a excepción de la baquelita, con distinta geometría (paralelepípedo), todos los demás materiales tendrán aproximadamente las mismas dimensiones y geometría (cilíndrica).

De los datos de la tabla 2 y 3 reemplazados en la ec. (4) anteriormente deducida, se obtiene los valores de fuerza de agarre umbral (F_d) : (g = 9.8 m/s²)

$$M_{\text{material}} * g = 2 * \mu_s * F_d \dots \dots \dots (4)$$

Tabla 4 : Valores de fuerza de agarre umbral

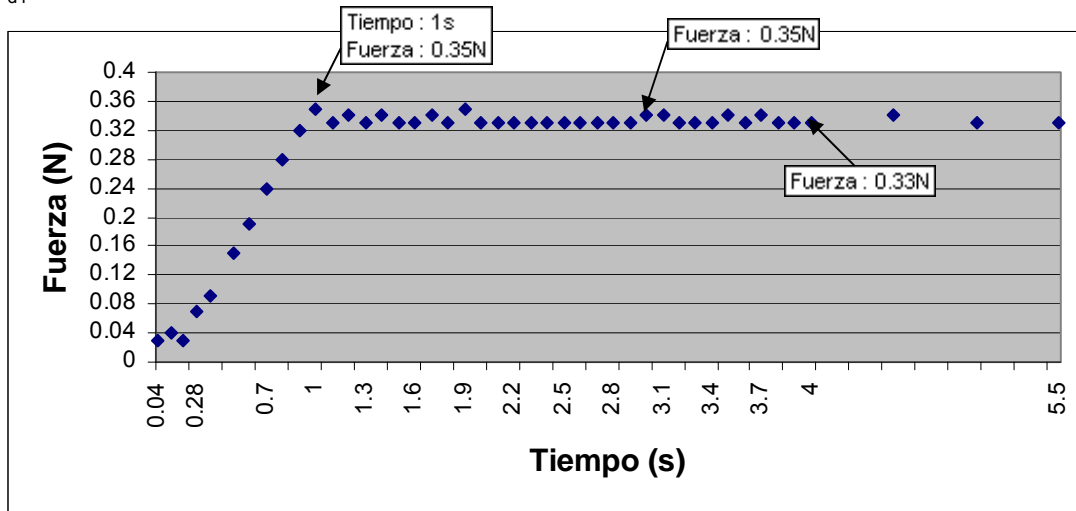
Material	Cobre	Bronce	Aluminio	Acero	Nylon	Jebe	Baquelita
F_{d1} (N)	0.33	0.35	0.07	0.32	0.09	0.09	0.1
F_{d2} (N)	0.66	0.7	0.15	0.64	0.18	0.17	0.2
F_{d3} (N)	1.33	1.39	0.3	1.28	0.36	0.34	0.4

4.3. RESULTADOS :

Las gráficas que se muestran a continuación son dadas para cada material. Dentro de estas se pueden apreciar las respuestas de nuestro sistema en el tiempo. En la parte final se muestra el entorno gráfico del manejo automatizado del proceso de agarre.

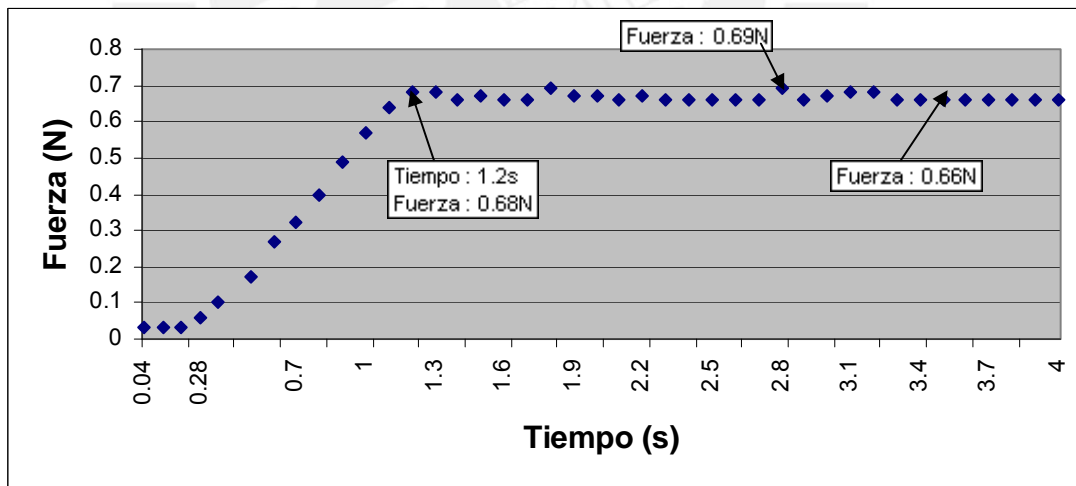
COBRE :

$F_{d1} = 0.33N$



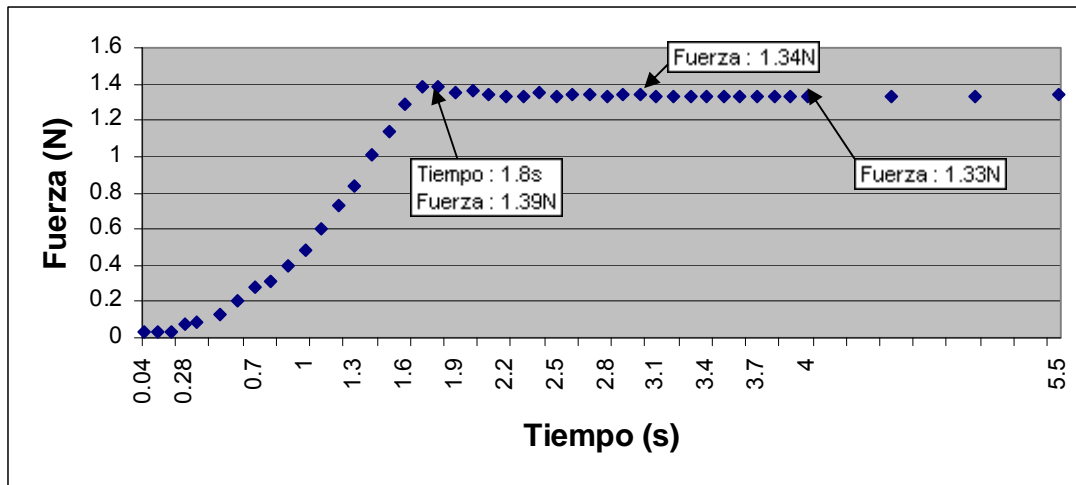
a)

$F_{d2} = 0.66N$

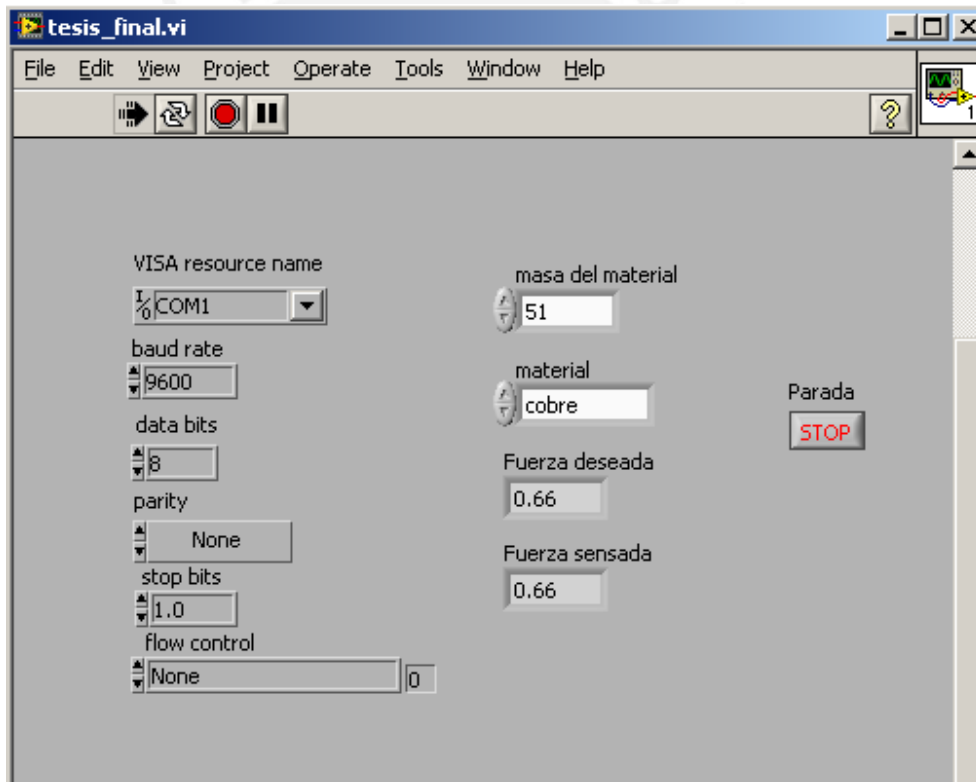


b)

$F_{d3} = 1.33N$



c)



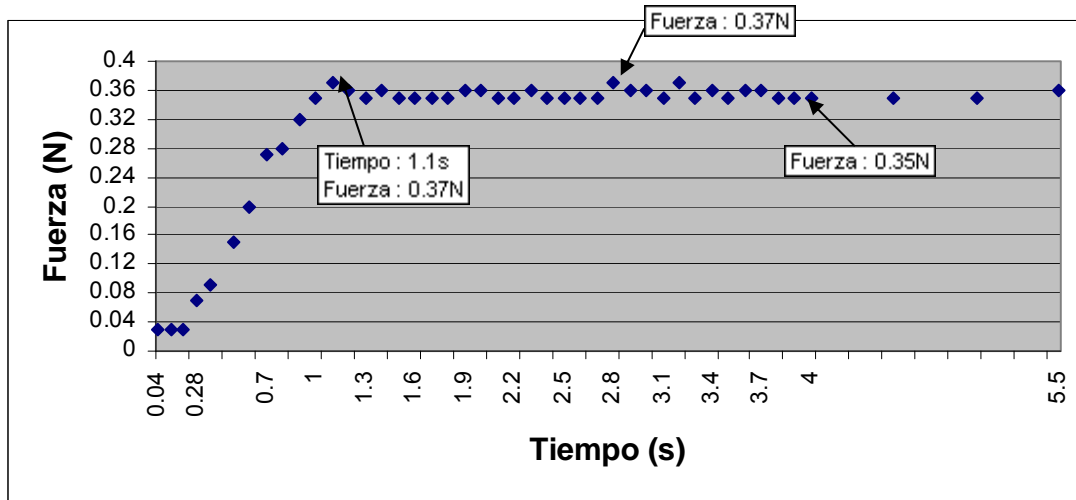
d)

Fig. 4.5. Pruebas de agarre para el cobre.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.33N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.66N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 1.33N.
- d) Interfaz grafica de usuario para el control de agarre del cobre.

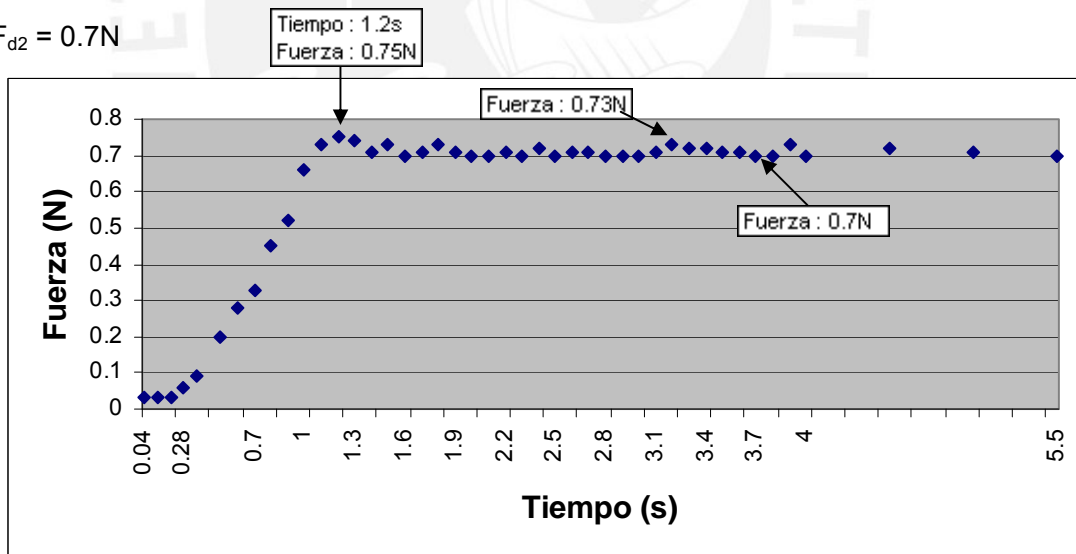
BRONCE :

$F_{d1} = 0.35N$



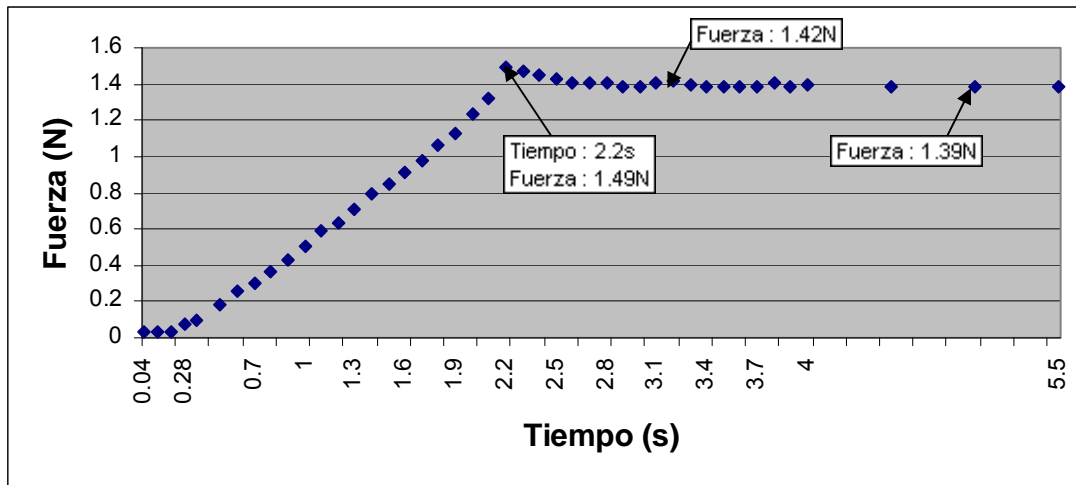
a)

$F_{d2} = 0.7N$

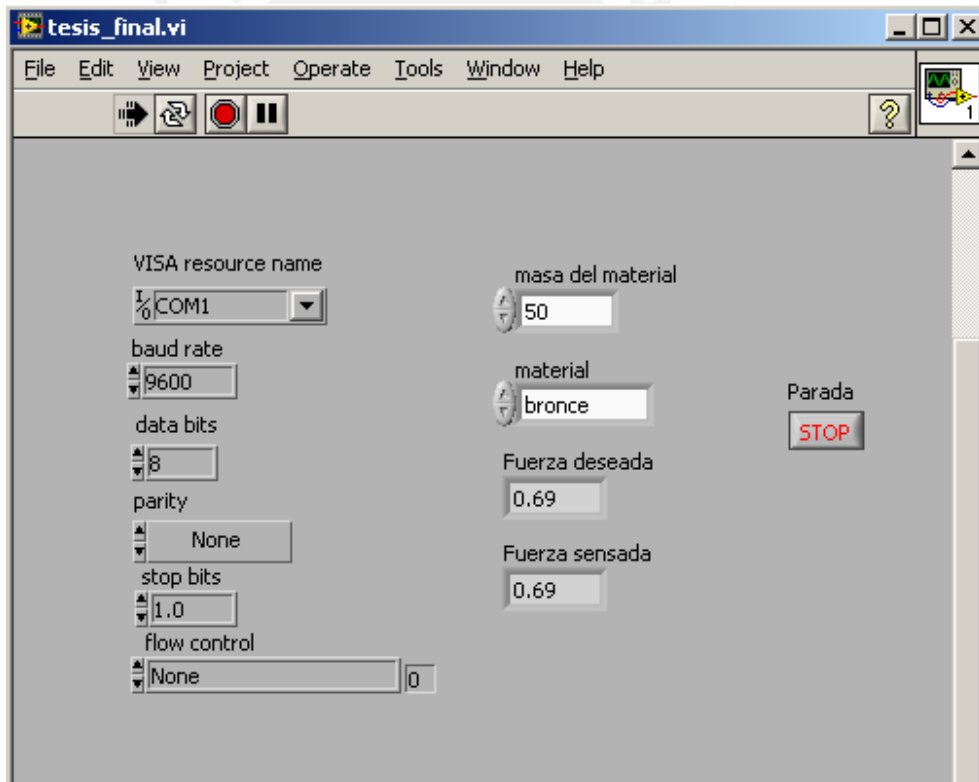


b)

$F_{d3} = 1.39N$



c)



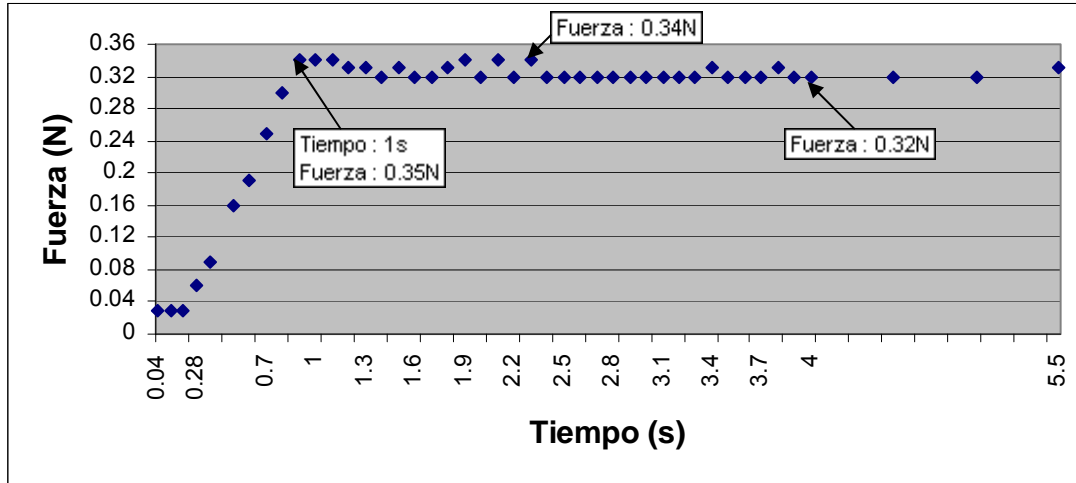
d)

Fig. 4.6. Pruebas de agarre para el bronce.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.35N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.7N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 1.39N.
- d) Interfaz grafica de usuario para el control de agarre del bronce.

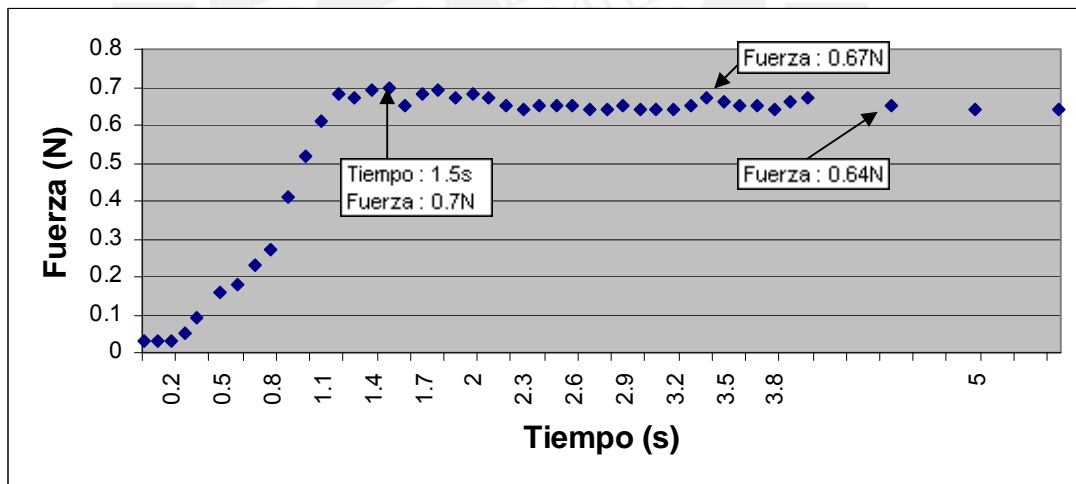
ACERO :

$F_{d1} = 0.32N$



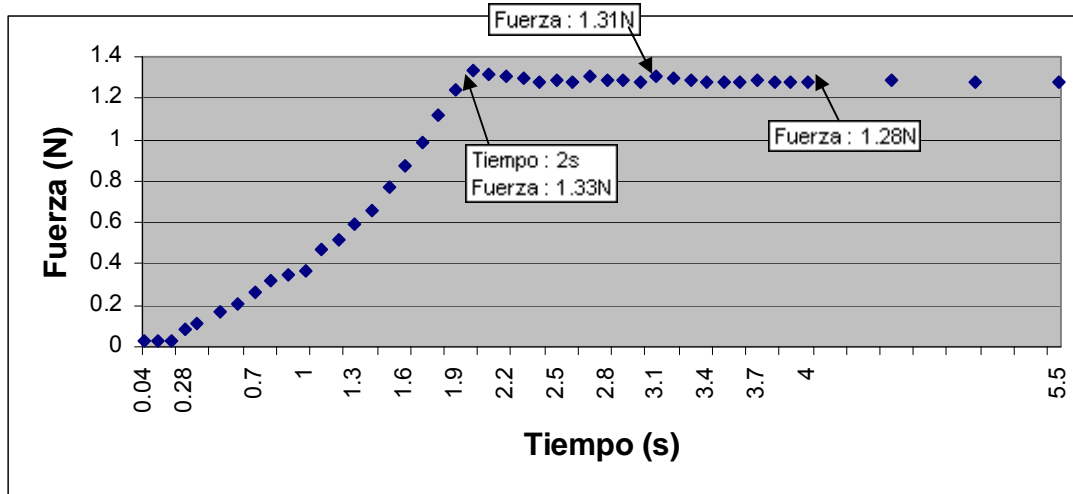
a)

$F_{d2} = 0.64N$

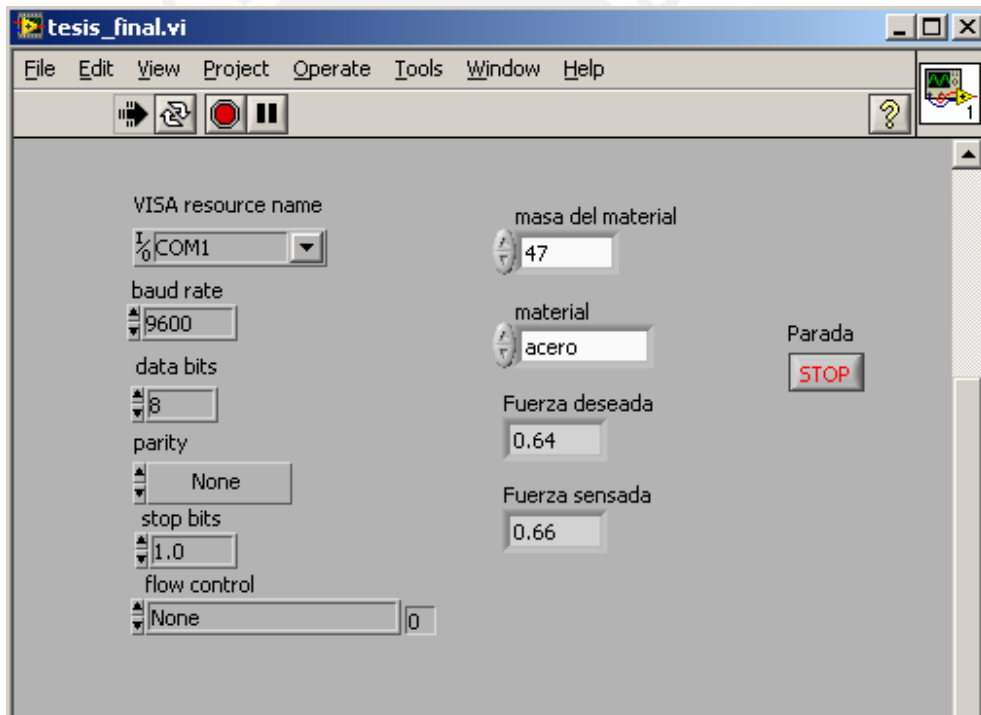


b)

$F_{d3} = 1.28N$



c)



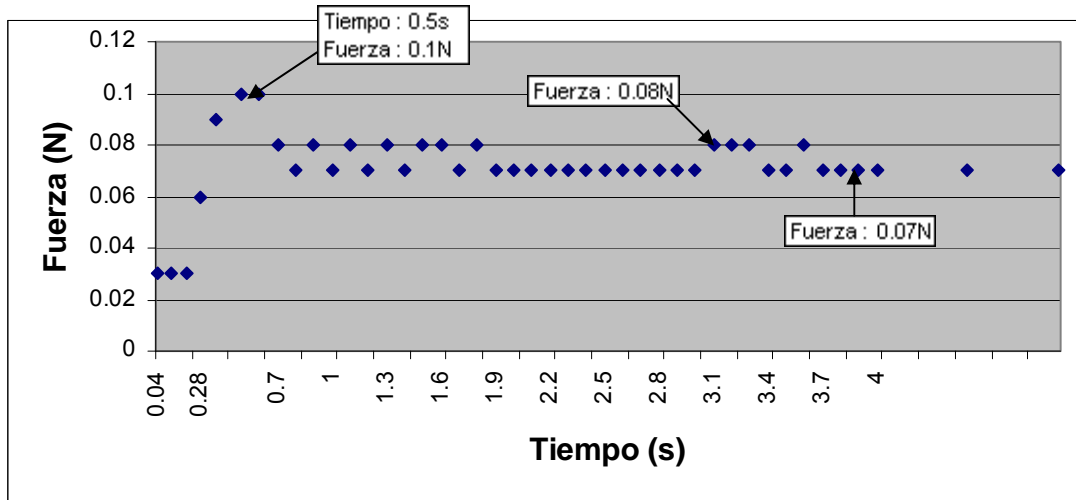
d)

Fig. 4.7. Pruebas de agarre para el acero.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.32N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.64N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 1.28N.
- d) Interfaz grafica de usuario para el control de agarre del acero.

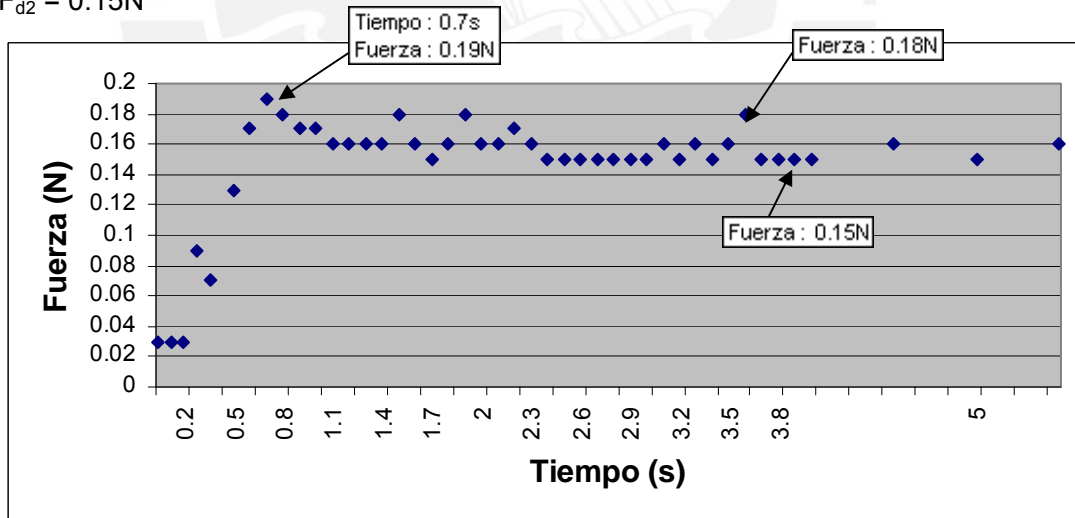
ALUMINIO :

$F_{d1} = 0.07N$



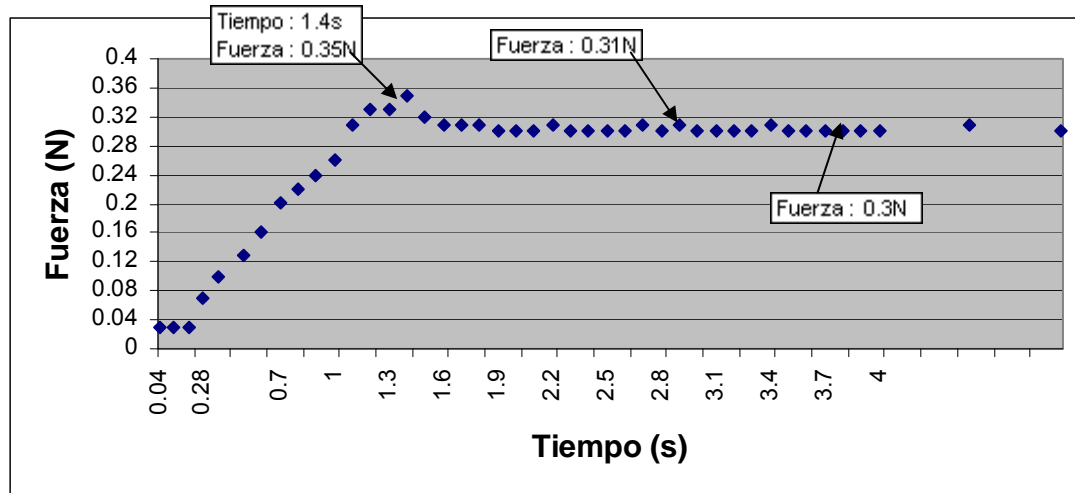
a)

$F_{d2} = 0.15N$

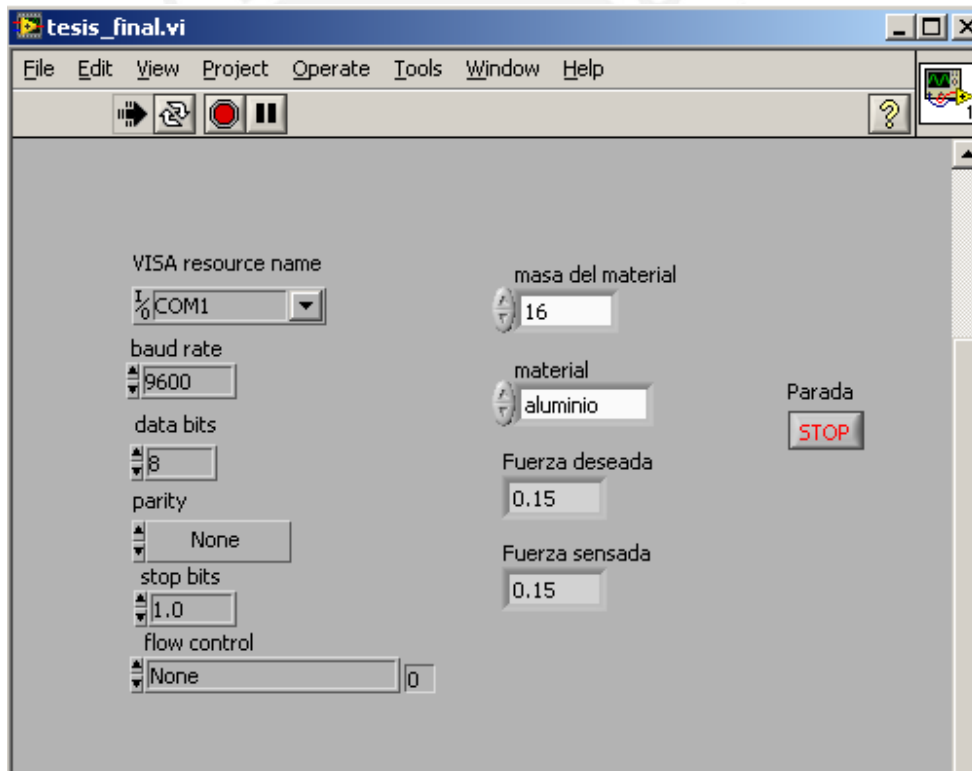


b)

$F_{d3} = 0.3N$



c)



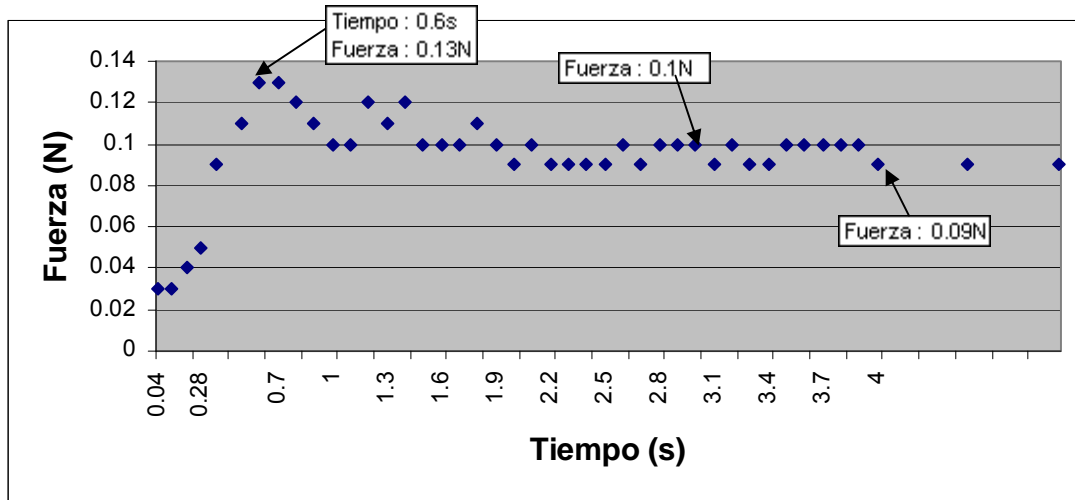
d)

Fig. 4.8. Pruebas de agarre para el aluminio.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.07N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.15N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.3N.
- d) Interfaz grafica de usuario para el control de agarre del aluminio.

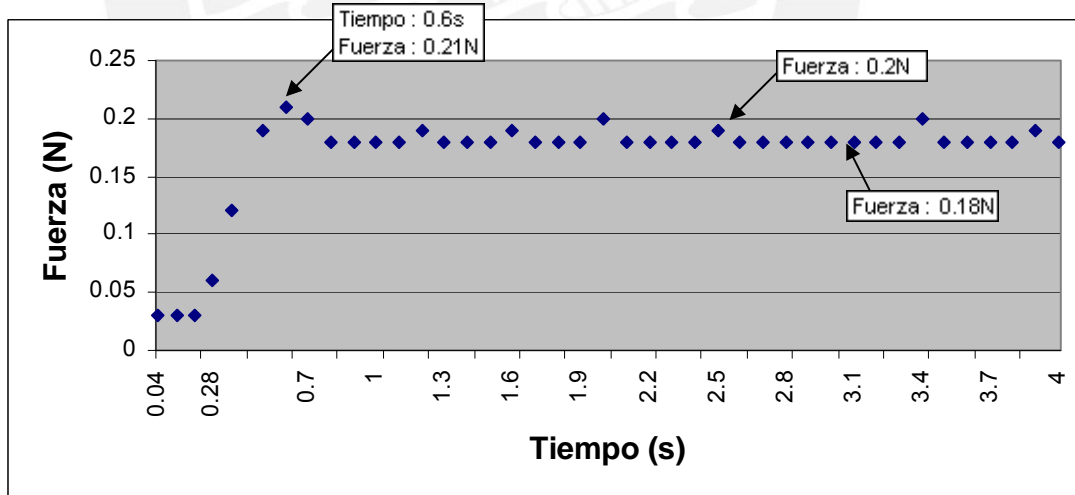
NYLON :

$F_{d1} = 0.09N$



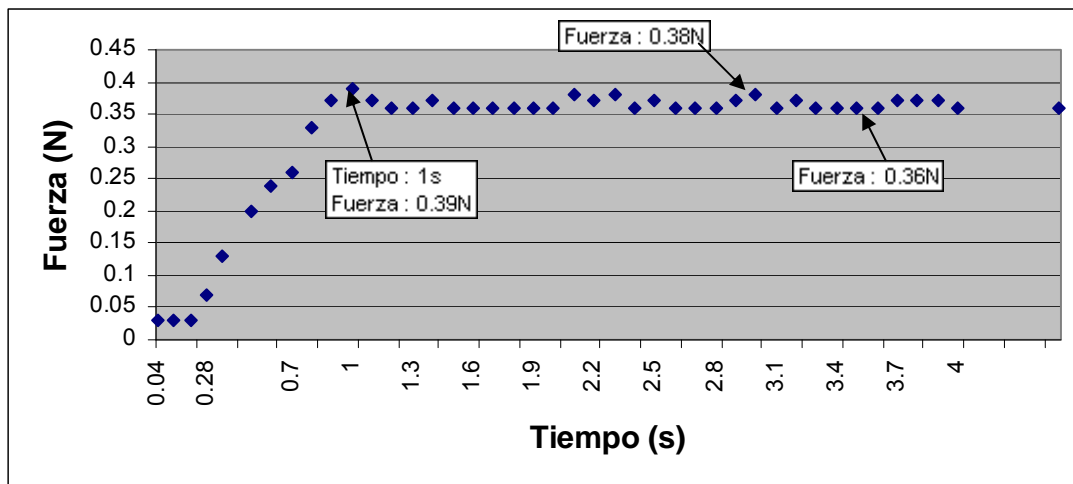
a)

$F_{d2} = 0.18N$

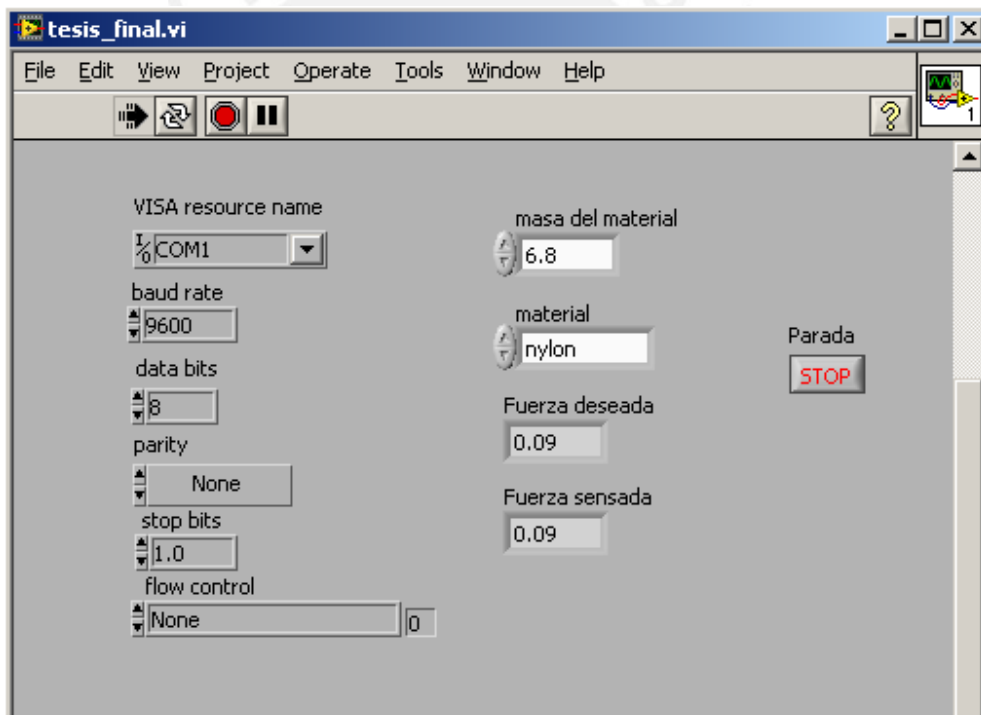


b)

$$F_{d3} = 0.36N$$



c)



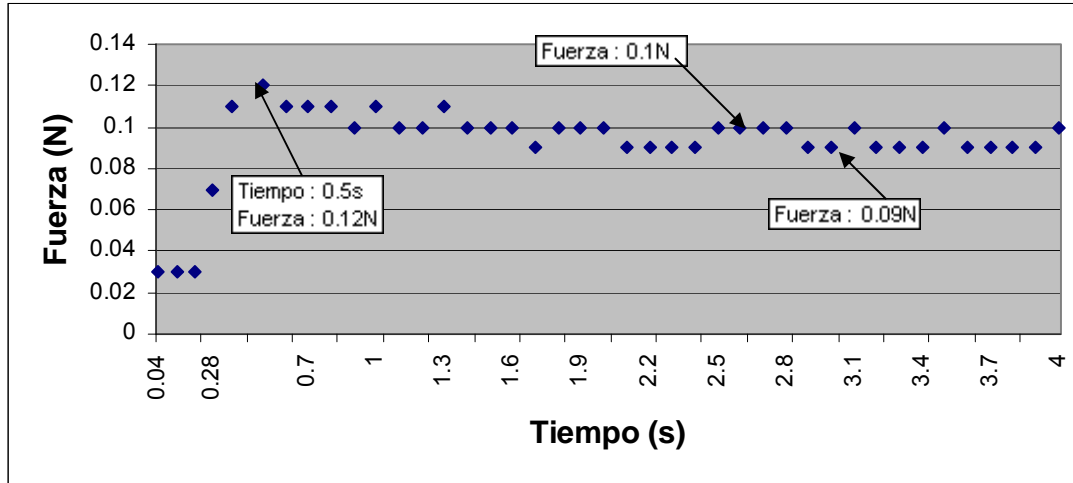
d)

Fig. 4.9. Pruebas de agarre para el nylon.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.09N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.18N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.36N.
- d) Interfaz grafica de usuario para el control de agarre del nylon.

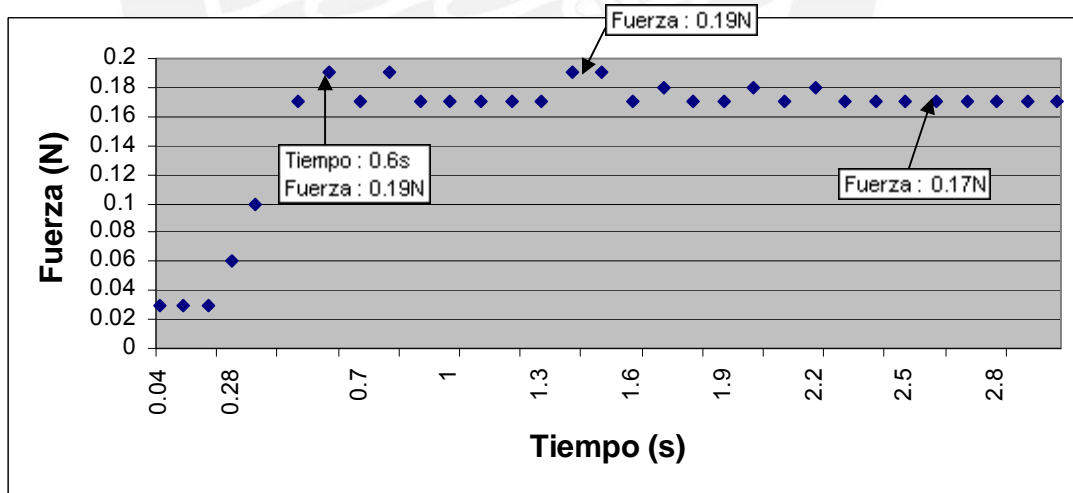
JEBE :

$$F_{d1} = 0.09N$$



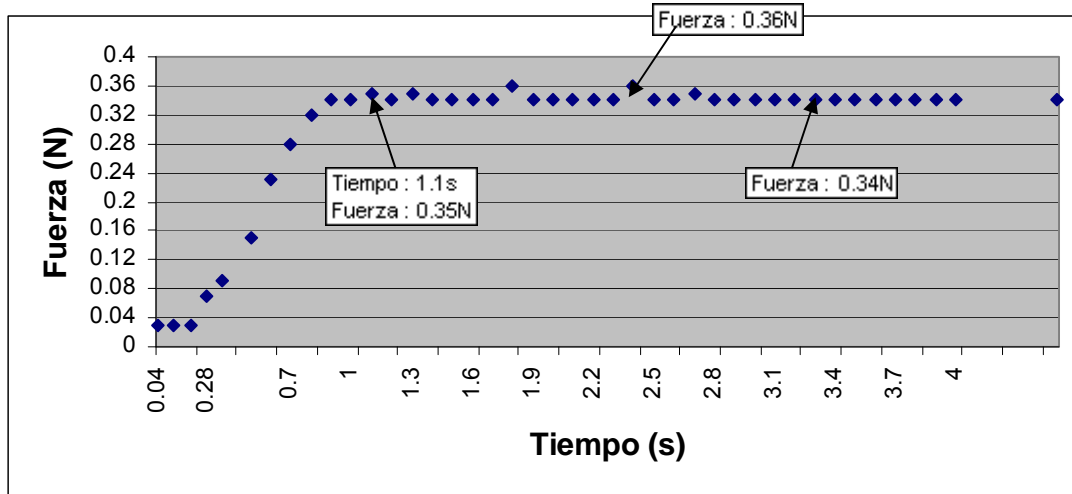
a)

$$F_{d2} = 0.17N$$

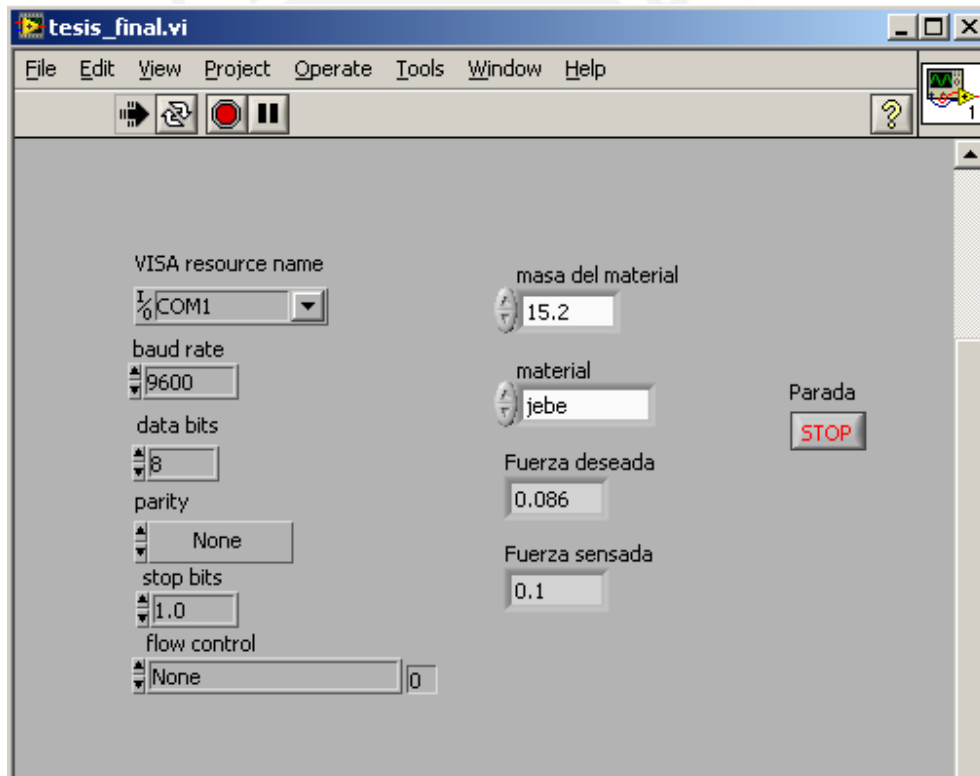


b)

$F_{d3} = 0.34N$



c)



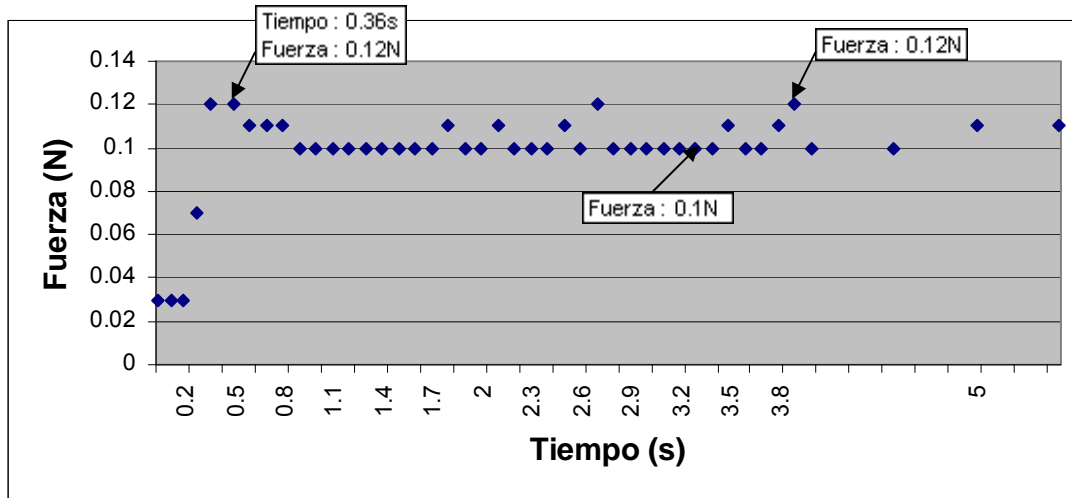
d)

Fig. 4.10. Pruebas de agarre para el jebe.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.09N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.17N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.34N.
- d) Interfaz gráfica de usuario para el control de agarre del jebe.

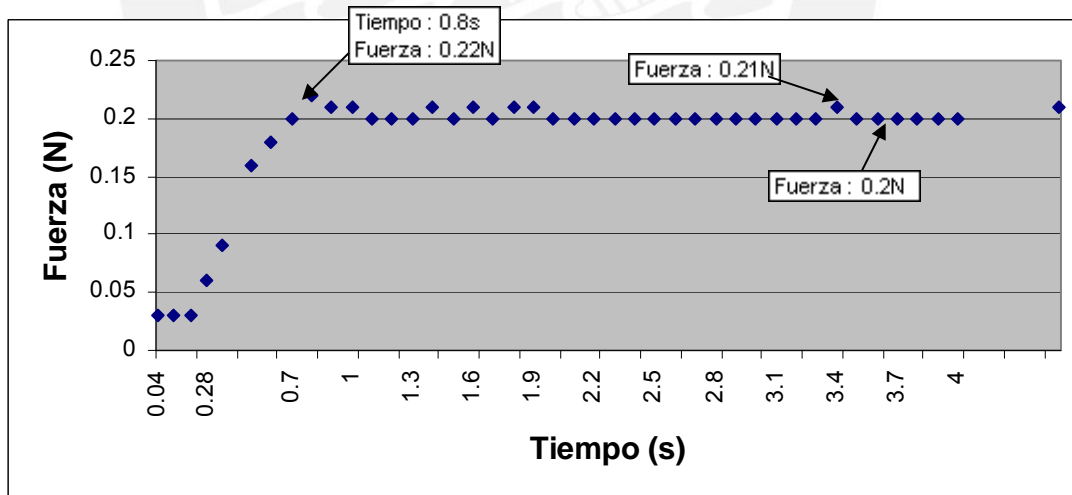
BAQUELITA :

$F_{d1} = 0.1N$



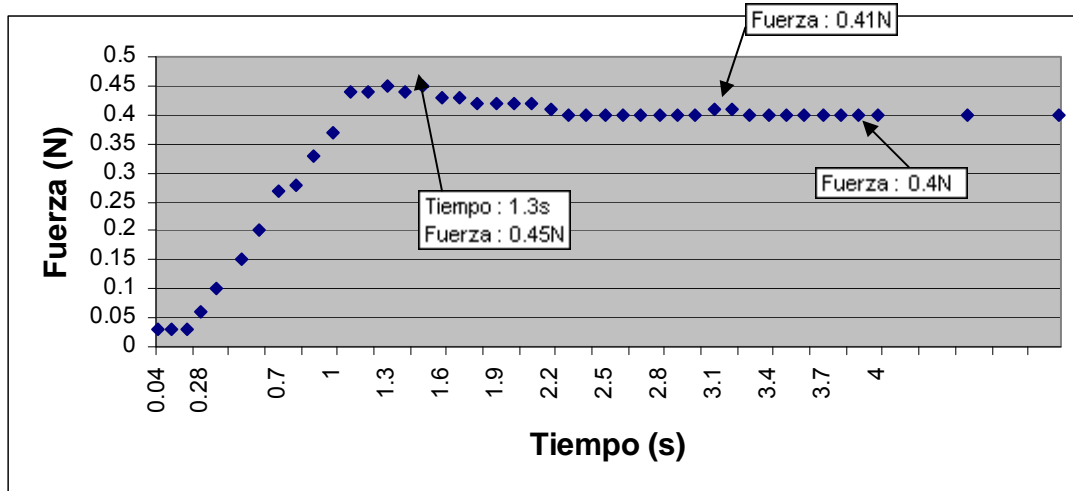
a)

$F_{d2} = 0.2N$

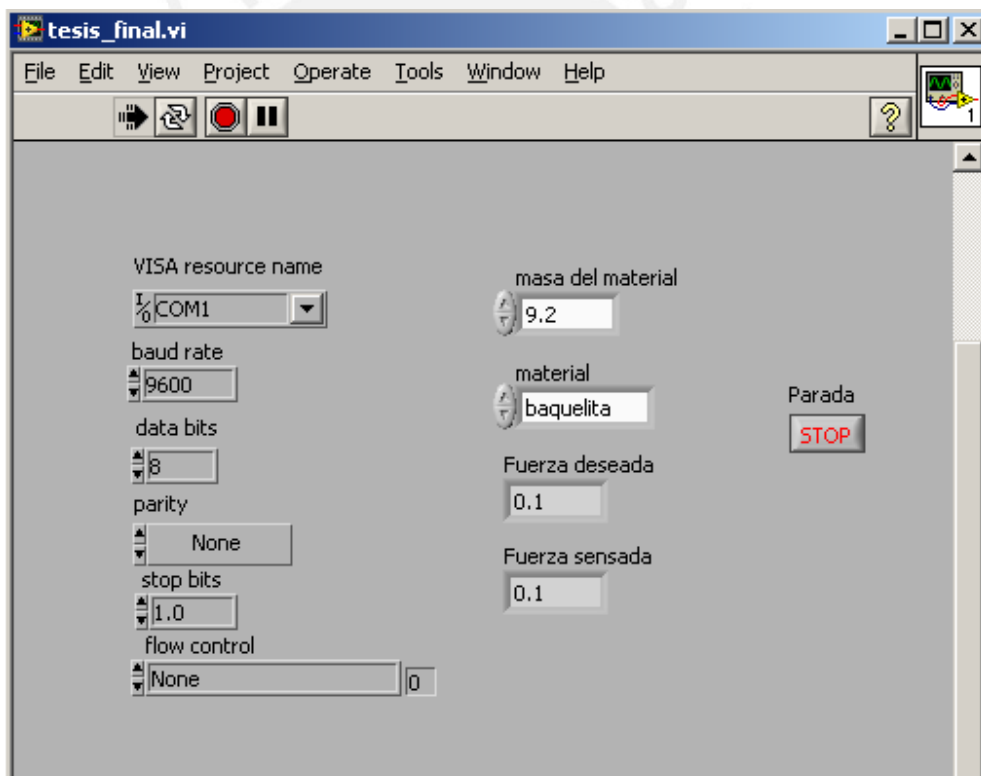


b)

$F_{d3} = 0.4N$



c)



d)

Fig. 4.11. Pruebas de agarre para el baquelita.

- a) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.1N.
- b) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.2N.
- c) Respuesta del sistema de agarre en el tiempo para una fuerza de agarre umbral de 0.4N.
- d) Interfaz grafica de usuario para el control de agarre del baquelita.

CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES, OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. Conclusiones :

- No solo se hacían pruebas con masas distintas de cada material sino que dichas masas correspondían a geometrías distintas o a geometrías idénticas pero de distintas longitudes. Con esto pudimos demostrar que la fuerza de agarre necesaria no dependía de la geometría del material sino mas bien de su densidad volumétrica.
- El planteamiento de solución a la problemática del tema de tesis abordado tuvo los resultados esperados. Finalmente se pudo controlar la fuerza de agarre de los materiales seleccionados.

5.2. Observaciones :

- La formula empleada en el cálculo de la fuerza umbral para cada material dió los efectos deseados. Con dichos valores de fuerza los materiales fueron cogidos satisfactoriamente, incluso se levantó levemente el prototipo en conjunto y los materiales permanecían sostenidos.
- De las gráficas de respuesta podemos apreciar que el valor de la fuerza medida nunca resultó menor al de la fuerza umbral deseada. En el peor de los casos siempre se tuvo un error máximo de +0.03N por encima del valor de la fuerza umbral deseada.
- En las gráficas de respuesta se puede observar también que en la gran mayoría de casos no existe un sobreimpulso máximo considerable con respecto al valor de la fuerza umbral deseada.

- El sistema de cierre mecánico no es totalmente firme; esto provoca que el contacto (cierre de *gripper*) con el sensor de fuerza muchas veces tome valores de fuerza erróneos.
- Se pudo demostrar además que el valor de la fuerza umbral deseada estaba en relación directa con el incremento en la masa del material de prueba. Cuando duplicábamos la masa, el valor de la fuerza también se duplicaba. Lo mismo pasaba cuando cuadruplicábamos el valor de la masa.
- Para ver el efecto que tenía el coeficiente de fricción sobre el valor de la fuerza umbral, se tomó la menor fuerza umbral correspondiente a la menor masa según sea el material. Luego con dichos valores de fuerza se probó el agarre para las masas restantes de cada material respectivamente y se observó lo siguiente :
 - En el caso del cobre, bronce y acero : cuando las placas de agarre ejercían la menor fuerza umbral según sea el material, estas no tenían la suficiente magnitud como para poder sostener el material de masa duplicada. (el u_s de estos materiales es pequeño).
 - El caso del aluminio era ambiguo, en oportunidades las placas de agarre lograban sostener con dificultad la masa duplicada de este material, pero en otras no.
 - En el caso del jebe, nylon y baquelita, las placas de agarre si lograban sostener el doble de la masa de estos materiales con tan solo ejercer la menor fuerza umbral. (el u_s de estos materiales con las placas de agarre generaban una fuerte oposición al deslizamiento).

5.3. Recomendaciones :

- Es conveniente utilizar un motor de buen torque ya que el proceso de agarre implica que las placas que sostienen a los materiales deben tener la fuerza suficiente para presionar a estos, más aún sabiendo que estamos trabajando con materiales rígidos e incompresibles.
- Resultaría conveniente mejorar la parte mecánica que concierne al cierre de las placas paralelas, ya que estas muchas veces se traban provocando que el sensor de fuerza lleve a cabo mediciones erróneas.

FUENTES

- [1] CONCYTEC
“Estudio Sistemático de la realidad nacional en ciencia y tecnología”
<http://www.concytec.gob.pe/resumen/recomendaciones.htm>
- [2] Data Sheet de sensores de fuerza y componentes.
- <http://www.steadlands.com/interlink/interlinkpdfs/fsrdatasheet.pdf>
 - <http://www.tmefrance.com/index.php?module=categorie&cat=2&op=detail&prod=48>
 - <http://www.steadlands.com/interlink/interlink.htm>
 - <http://catalog.sensing.honeywell.com/compare.asp?FAM=force&ITEMLIST=528303,528304,528305>
 - <http://catalog.sensing.honeywell.com/printfriendly.asp?FAM=force&PN=FSL05N2C>
 - <http://www.phidgets.com/documentation/DataSheets/DataSheet1106.pdf>
 - <http://www.alldatasheet.com>
- [3] Red Científica
2006 “sistema sensorial del robot”
<http://www.redcientifica.com/doc/doc199903310008.html>
- [4] Estudio de los sensores táctiles artificiales aplicados a la robótica de agarre.
http://www.cea-ifac.es/actividades/jornadas/XXI/documentos/ja00_003/ja00_003.pdf
- [5] Sistema Sensorial
http://cfievalladolid2.net/tecno/cyr_01/robotica/sistema/sensores.htm
- [6] Castro D., Marques, Nunes y Almeida.
“Tactile Force Control Feedback in a Parallel Jaw Gripper”.
IEEE International Symposium on Industrial Electronics.
- [7] Mikell P. Groover y otros.
2003 “Robótica Industrial: tecnología, programación y aplicaciones.”
Editorial McGraw-Hill

- [8] Fernando Torres and Jorge Pomares.
2002 “Robots y Sistemas sensoriales” Prentice may

- [9] Bohorquez, William Alberto y Góngora, Viviana Carolina.
Sep. 2005 “Brazo Robotico” Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.

