

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Ciencias e Ingeniería



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

DISEÑO DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA ESTUDIAR LA INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS INSERTOS ENTRE IMPACTOS SUCESIVOS EN TALADROS PERCUSIVOS.

Tesis para optar el Título de Ingeniero Mecatrónico,
que presenta el bachiller:

GIANLUCA ARFINENGO RODA

ASESOR: Dr. Dante Elías Giordano

Lima, Abril del 2016

RESUMEN DE TESIS

La perforación de roca es un proceso que se encuentra presente en la minería, la construcción y la extracción de hidrocarburos. Normalmente, para la perforación de roca, se utilizan taladros percusivos. Los taladros percusivos tienen dos componentes importantes: el elemento que genera el impacto, llamado martillo o pistón de impacto y el elemento que se encuentra en contacto con la roca, llamado indentador o bit que aloja el elemento perforante llamado inserto.

Se presenta el diseño de un equipo de laboratorio que permite al investigador estudiar el daño en una muestra de roca utilizando distintos tipos de insertos (ya sea cónicos o balísticos de distintos diámetros), distintas configuraciones geométricas de los insertos en un taladro percusivo, así como distintos ángulos de barrido.

El equipo de laboratorio consiste en un cilindro neumático cuyo pistón (martillo) se acelera hasta una velocidad de 5 m/s. Dicho pistón impacta contra el indentador, transfiriendo su energía a través del indentador hasta una muestra de roca. En el extremo del indentador se encuentran los insertos de carburo de tungsteno, quienes se encargan de perforar la roca. El peso combinado del equipo es aproximadamente 50 kg. El equipo fue diseñado de tal manera que sea posible controlar el ángulo de barrido por medio de un sistema de giro que utiliza un motor DC con escobillas con un torque nominal de 1,6 Nm y que consume una potencia de 0,48 W.

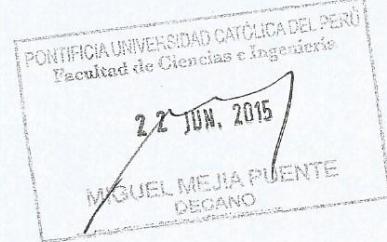
El equipo, además, cuenta con distintos tipos de sensores para registrar datos relevantes a la investigación. La velocidad del pistón de impacto se mide por medio de dos sensores inductivos separados por una distancia conocida de 24 mm. El indentador cuenta con sensores extensiométricos que miden la deformación del elemento. La roca cuenta con un acelerómetro para registrar la energía recibida.

El ensayo se encuentra semi-automatizado, el control está a cargo de un PLC en comunicación con una PC, donde se registra la velocidad de impacto, las deformaciones del indentador y la roca. El PLC gobierna el funcionamiento secuencial del ensayo, activando y desactivando las electroválvulas correspondientes.

El costo aproximado (sin considerar los costos de anclaje) es de S./ 25000. Los dos conceptos de mayor costo son la fabricación de los elementos y los sensores utilizados.

TRABAJO DE FIN DE CARRERA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECATRÓNICO

Título : DISEÑO DE UN EQUIPO DE LABORATORIO PARA ESTUDIAR LA INFLUENCIA DE LA DISPOSICIÓN DE LOS INSERTOS ENTRE IMPACTOS SUCESIVOS EN TALADROS PERCUSIVOS.
Asesor : Dr. Dante Angel Elías Giordano
Alumno : Gianluca Arfinengo Roda
Código : 20102075
Tema N° : 84
Fecha : 15/06/15



Descripción y objetivos

La perforación de roca es una de las operaciones más importantes en tres rubros económicos que son fundamentales en el Perú: la minería, la extracción de hidrocarburos y la construcción. Existe, pues, una importante necesidad de estudiar el proceso de perforación en un nivel de laboratorio para desarrollar soluciones técnicas en el diseño de perforadoras.

La perforación de roca se realiza, normalmente, por medios mecánicos y específicamente utilizando el concepto de percusión (impacto). Actualmente la maquinaria utilizada para la perforación de roca es importada y no se encuentra especializada en el tipo de roca que se encuentra en el país.

Por lo tanto en el presente trabajo se propone diseñar un equipo de laboratorio que genere impactos sucesivos para estudiar lo siguiente:

- La zona de mayor influencia (daño) que genera un tipo de inserto para un tipo de roca específico.
- La separación interna que debe tener un par de insertos para generar una superposición de daños.
- La separación entre impactos para máximo daño y mayor área posible.

Dado el grado de complejidad del dispositivo requerido, el trabajo se centrará en definir un diseño mecánico que simule la perforación percusiva de rocas usando insertos. Este trabajo comprenderá la revisión del estado del arte, la definición de las condiciones dinámicas y geométricas que el equipo debe satisfacer, los cálculos de diseño en los componentes de mayor relevancia, la selección de los componentes motrices y estandarizados, la elaboración de los planos para la fabricación, y la estimación del costo de diseño y fabricación. Asimismo se elaborará una propuesta del sistema de control e instrumentación del mismo. El diseño pretende entregar la mayor versatilidad posible, de manera que el investigador tenga la capacidad de modificar distintos parámetros, además de las antes mencionadas, la velocidad de impacto y la fuerza de contacto entre la probeta y el equipo.

Máximo : 100 páginas



DEDICATORIA



Este es el fruto del gran esfuerzo
de mis padres. A quienes dedico este trabajo,
sin ellos no lo hubiera logrado. La dedicatoria se extiende
también a mi hermano, cuyo apoyo incondicional fue vital.



AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi asesor el Dr. Dante Elías por su valiosa guía y atenta disposición. Agradezco a José Noriega y Milán Pejnovic por su tiempo y por toda la ayuda que me brindaron para completar este trabajo. Agradezco de manera especial a mi novia Diana por todo su apoyo.

Gianluca Arfinengo Roda

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
Introducción.....	1
1. Antecedentes y Estado del Arte	2
1.1. Contexto económico.....	2
1.2. Sistemas de penetración de roca	4
1.2.1. Clasificación de sistemas de perforación.....	5
1.2.2. Sistemas de perforación mecánica	6
1.2.3. Métodos de perforación percusiva	8
1.3. Ensayos sobre propagación de ondas elásticas	10
1.4. Patentes.....	15
2. Diseño Conceptual	20
2.1. Problemática	20
2.2. Lista de Requerimientos.....	22
2.3. Estructura de Funciones.....	26
2.4. Diagrama de Funciones	27
2.5. Concepto de Solución.....	29
2.6. Descripción de componentes del equipo	30
2.6.1. Testigo y cañón de disparo	30
2.6.2. Indentador	32
2.6.3. Sistema de precarga.....	37
2.6.4. Bridas.....	38
2.6.5. Sellos y Cojinetes.....	39
2.6.6. Sistema de Giro	41
2.7. Sistema Neumático.....	44
2.8. Anclaje.....	46
3. Instrumentación y Control	50
3.1. Descripción del sistema de control.....	51
3.2. Selección de componentes de control	54
3.2.1. PLC seleccionado	55
3.2.2. Tarjeta de adquisición de datos (DAQ).....	56
3.2.3. Computadora PC	58
3.2.4. Sensores	59
3.2.4.1. Sensor de velocidad del martillo.....	60
3.2.4.2. Sensor de presencia (retorno del martillo).....	63
3.2.4.3. Sensor de deformación	64
3.2.4.4. Sensor de posición.....	66
3.2.4.5. Acelerómetro	66
3.2.5. Elementos Neumáticos.....	67
3.2.5.1. Electroválvula de disparo	68
3.2.5.2. Cilindro neumático.....	68

3.3. Sistema Eléctrico/Electrónico	69
3.3.1. Motor del sistema de giro	74
3.3.2. Lógica de Control.....	74
4. Planos y Costos de diseño y fabricación	76
4.1. Costos de Material y Fabricación de los elementos mecánicos.....	78
4.2. Costos Sellos Neumáticos.....	79
4.3. Costos Sistema de Control.....	80
4.4. Costos Sensores.....	81
4.5. Costos Actuadores.....	82
Observaciones y Recomendaciones	84
Conclusiones.....	86
Bibliografía.....	89
Anexos	
A.1 Matriz Morfológica	A1
A.1.2 Conceptos de Solución	A6
A.2 Evaluación de Soluciones	A11
B.1 Método para la colocación de inserto	A14
B.2 Solución Ing. Geu.....	A17
C.1 Cálculo para espaciamento lineal.....	A19
C.2 Cálculo de Fuerza de Impacto.....	A20
C.3 Selección Cojinete SKF.....	A23
C.4 Cálculo de Motor.....	A28
D. Simulaciones	A31
E. Diagrama P&ID.....	A37

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 : Inversión minera en los últimos trece años	3
Figura 1.2 : Sistema de perforación rotativa	7
Figura 1.3 : Esquema de método Top-of-the-Hole	9
Figura 1.4 : Esquema de método Down-the-Hole	10
Figura 1.5 : Configuración ensayo Kolsky.....	12
Figura 1.6 : Ensayo realizado por Carlsson, Sundin y Lundberg	13
Figura 1.7 : Equipo de Laboratorio para ensayos de impacto entre barras cortas.....	14
Figura 1.8 : Esquema del equipo diseñado por el Ing. Francisco Geu	15
Figura 1.9 : Patente botones de indentador	17
Figura 1.10: Tipos de indentadores con insertos que ofrece la empresa Atlas Copco....	18
Figura1.11: Recomendación de tipo de indentador para cada tipo de roca	19

Capítulo 2

Figura 2.1 : Indentación en testigo de roca en el equipo de laboratorio del Ing. Geu	21
Figura 2.2 : Zona de sobreposición y ángulo óptimo deseado	22
Figura 2.3 : Caja negra.....	26
Figura 2.4 : Diagrama de funciones.....	28
Figura 2.5 : Concepto de solución	29
Figura 2.6 : Dimensiones testigo de roca.....	31
Figura 2.7 : Resultados experimentales del Ing. Geu con un cilindro de disparo de 40mm de diámetro interior	32
Figura 2.8 : Martillo de impacto. Diseño nuevo.....	32

Figura 2.9 : Diseño indentador. Diseño nuevo	33
Figura 2.10: Separación entre insertos normalizada	35
Figura 2.11: Principio de diseño	36
Figura 2.12: Indentador tentativo	37
Figura 2.13: Cámara de precarga.....	38
Figura 2.14: Bridas: a) Posterior b) Intermedia c) Delantera	39
Figura 2.15: Sello rotativo seleccionado	40
Figura 2.16: Sección transversa de Cojinete PWM	41
Figura 2.17: Sistema de Giro.....	42
Figura 2.18: Comportamiento Velocidad Angular	43
Figura 2.19 a): Sistema neumático propuesto por el Ing. Geu	45
Figura 2.19 b): Plano de sistema agregado	45
Figura 2.20: Tipos de cimientos	47
Figura 2.21: Condiciones de Frecuencia natural	48
Figura 2.22: Límites permisibles para la amplitud de la vibración	48
Figura 2.23: Equipo de disparo diseñado	49
 Capítulo 3	
Figura 3.1 : Representación del sistema de control	51
Figura 3.2 : Salida tipo relé de PLC.....	54
Figura 3.3 : PLC Siemens S7-1200	55
Figura 3.4 : Concepto de funcionamiento de DAQ	56
Figura 3.5 : DAQ USB-6008 y características técnicas.....	57
Figura 3.6 : Menú configuración puertos DAQ.....	58
Figura 3.7 : Esquema sensado de velocidad.....	60
Figura 3.8 : Sensor Inductivo	61

Figura 3.9 : Blindaje de sensores inductivos.....	62
Figura 3.10: Conexión de sensor tipo NPN.....	63
Figura 3.11: Posición Orificios para sensores inductivos	64
Figura 3.12: Conexión Galga Extensiométrica	64
Figura 3.13: Puente Wheatstone	65
Figura 3.14: Giroscopio TL618C-050	66
Figura 3.15: Acelerómetro SKF CMPT 2310	67
Figura 3.16: Electroválvula Norgen de alto caudal	68
Figura 3.17: Cilindro neumático Parker.....	69
Figura 3.18: Esquema de conexiones.....	70
Figura 3.19: Diagrama de conexiones de entradas de PLC.....	71
Figura 3.20: Diagrama de conexiones de salidas de PLC.....	72
Figura 3.21: Diagrama de conexiones de DAQ.....	73
Figura 3.22: Motor DC Pololu MetalGearbox 227:1.....	74
Figura 3.23: Lógica de Control	75
Capítulo 4	
Figura 4.1: Estructura de Costos.....	78
Observaciones y Recomendaciones	
Figura OR.1: Indentador comercial	84
Figura OR.2: Diseño de indentadores alternativos	85
Anexos	
Figura A.1: Concepto de solución 1	A6
Figura A.2: Concepto de solución 2	A7
Figura A.3: Concepto de solución 3	A9
Figura A.4: Evaluación Técnico-Económica	A13

Figura B.1: Método de colocación de inserto.....	A16
Figura C.1: Representación fuerza de impacto.....	A20
Figura C.2: Diagrama de cuerpo libre.....	A23
Figura C.3: Diagrama de cuerpo libre de cojinete.....	A24
Figura C.4: Dimensiones cojinetes SKF.....	A26
Figura C.5: Diagrama Pv de cojinete SKF.....	A27
Figura C.6: Diagrama de cuerpo libre.....	A28
Figura D.1: Simulaciones de carga en indentador.....	A32
Figura D.2: Simulaciones para el soporte delantero.....	A34
Figura D.3: Simulación en tensorador.....	A35
Figura D.4: Simulación de cargas en cilindro de disparo.....	A36
Figura E.1: Diagrama P&ID.....	A37

INDICE DE TABLAS

Capítulo 1	
Tabla 1.1: Sistema de penetración de roca, catalogados según su tipo de energía.....	5
Capítulo 2	
Tabla 2.1: Síntesis de requerimientos	25
Tabla 2.2: Lista de sensores de solución.....	30
Tabla 2.3: Cálculo de S	35
Tabla 2.4: Características de cojinete	41
Tabla 2.5: Componentes.....	44
Capítulo 3	
Tabla 3.1: Criterios de selección PLC	52
Tabla 3.2: Análisis de E/S.....	53
Tabla 3.3: Requisitos de PC según software relevante	59
Tabla 3.4: Código de colores esquemas eléctricos	70
Capítulo 4	
Tabla 4.1: Relación de Planos	77
Tabla 4.2: Costos de componentes mecánicos	79
Tabla 4.3: Costos de sellos neumáticos	80
Tabla 4.4: Costo de sistema de control	81
Tabla 4.5: Costos de Sensores	82
Tabla 4.6: Costos de Actuadores	82
Tabla 4.7: Costos totales del Equipo	83
Anexos	
Tabla A.1: Matriz morfológica para funciones mecánicas	A2
Tabla A.2: Matriz morfológica para funciones de control.....	A3

Tabla A.3: Matriz morfológica para funciones relacionadas a sensores.....	A3
Tabla A.4: Matriz morfológica para funciones relacionadas a actuadores	A4
Tabla A.5: Reorganización de tablas anteriores	A5
Tabla A.6: Peso relativo	A11
Tabla A.7 : Valores escala de Likert.....	A11
Tabla A.8 : Evaluación Técnica	A12
Tabla A.9 : Evaluación Económica	A12
Tabla A.10: Reordenamiento de datos.....	A13
Tabla B.1: Componentes equipo del Ing. Geu	A25
Tabla C.1: Espaciamiento mínimo entre insertos.....	A26
Tabla C.2: Cálculo de S	A27
Tabla C.3: Datos de Cálculo.....	A28
Tabla C.4: Datos para el cálculo de F.....	A32
Tabla C.5: Datos para el cálculo de Pe	A33

INTRODUCCIÓN

La perforación de roca es una de las operaciones más importantes en tres rubros económicos que son fundamentales en el Perú: la minería, la extracción de hidrocarburos y la construcción. La perforación de roca se realiza en todas las etapas de la minería. Además, se utiliza en la extracción de petróleo y gas natural. En la industria de la construcción, se utiliza para el desarrollo de túneles, carreteras en montañas, etc. Se utiliza para extraer con precisión el mármol, el granito y otras rocas que comúnmente se utilizan cotidianamente en casas y ciudades. Existe, pues, una importante necesidad de estudiar el proceso de perforación en un nivel de laboratorio para buscar la mayor eficiencia posible.

El presente documento muestra el diseño de un equipo de laboratorio para estudiar la separación óptima entre insertos, cuya función es perforar la roca, y así aumentar la eficiencia del proceso. Inicialmente se contextualizará el diseño justificando la idea y su influencia en el país. El contexto económico se basará en la tendencia económica del Perú. Luego se procederá a dar una visión general al proceso de perforación, analizando históricamente los aportes de distintos científicos y sus ensayos de laboratorio. De estos aportes se deslinda el estado del arte actual en temas relacionados a pruebas de ensayos de taladros de percusión. Una vez establecido un cimiento estable en el primer capítulo, se procederá a desarrollar el diseño del equipo incluyendo sus planos de fabricación y ensamble para que sea posible mejorar o reproducir la solución planteada. En el segundo capítulo se tratará el concepto de diseño y los elementos que componen el diseño mecánico. En el tercer capítulo se abordará el sistema eléctrico y de control del sistema. En el cuarto capítulo se presentarán los planos y costos de fabricación. Finalmente se expondrán las observaciones, recomendaciones y conclusiones de la presente tesis.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se abordará, de manera breve, dos temas de vital importancia para la presente tesis de diseño. En primera instancia, se presentará un análisis contextual acerca de la situación del Perú y así formar una idea clara de la justificación para el tema de tesis. En segunda instancia se buscará mencionar los antecedentes y la evolución de la tecnología alrededor del tema de la perforación de roca.

1.1 CONTEXTO ECONÓMICO

El Perú se considera un país que sustenta sus ingresos en la extracción de materia prima, el sector minero y el sector de los hidrocarburos (petróleo y gas natural) son los sectores de mayor crecimiento e impacto económico del país. La evidencia más clara de esta afirmación es el gran aporte que genera el rubro de la minería e hidrocarburos en el PBI del país. El Perú ha estado en un crecimiento sostenido en la última década

y básicamente se debe al desarrollo del sector minero. Si bien el último año 2014 no ha sido favorable por las fluctuaciones del precio de los metales preciosos, la minería sigue siendo el rubro más importante económicamente para el Perú. [Minem, 2014]. En la figura 1.1 se muestra estadísticamente la performance de la minería en la última década.

INVERSIONES

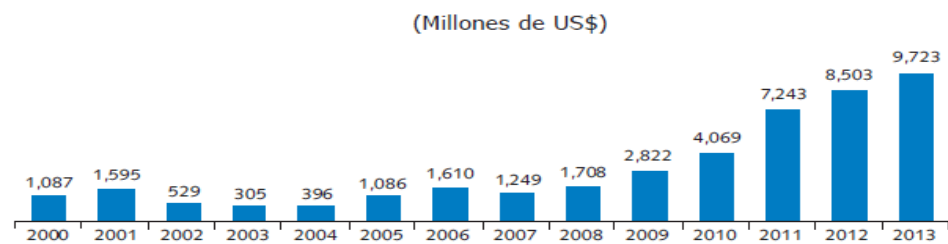


Figura 1.1: Inversión minera en los últimos trece años

Fuente: Minem

La minería es una actividad económica definida como la extracción selectiva de minerales de la corteza terrestre. Este proceso incluye la búsqueda, perforación, extracción, tratamiento y comercialización de minerales. Dichos minerales se encuentran en la roca y normalmente no se encuentran en la superficie sino dentro de la corteza terrestre. Esto implica que debe existir perforación de roca para tener acceso a los materiales a extraer. A este tipo de minería se le llama minería subterránea. [Ministerio de Minas de Colombia, 2003] Por otro lado la extracción de petróleo y gas natural es un proceso que se realiza exclusivamente a través de la perforación de la roca hasta llegar físicamente al yacimiento encontrado. Cabe mencionar que en un proyecto ya sea minero o de extracción de petróleo o gas natural, normalmente se conoce el tipo de roca desde la superficie hasta el yacimiento. Esto quiere decir que la variable tipo de roca es conocida y a través de su análisis en pruebas de laboratorio es posible aumentar la eficiencia del proceso de perforación.

La tendencia económica es que el Perú seguirá creciendo en función del sector minero. Esto quiere decir que mientras mayor sea el crecimiento del sector minero, mayor es el crecimiento económico del país. Tomando esto en cuenta, hay que revisar el estado

actual de los precios de los metales preciosos, especialmente el oro, los cuales han caído debido a diversos factores como la desaceleración económica que está sufriendo China y la posibilidad de entrada masiva de reservas de oro de varios países de Europa para el pago de sus deudas [CNN Expansión, 2013]. Por ello para mantener una mayor productividad, es necesario aumentar la eficiencia del proceso de perforación. Este hecho justifica el diseño de un equipo de laboratorio para estudiar el espaciamiento óptimo de los insertos de la herramienta de indentación entre golpes, para aumentar la eficiencia del proceso. Una mayor eficiencia conlleva a un crecimiento mayor. En otras palabras, si el precio de los metales preciosos aumenta, la eficiencia de perforación debe aumentar para aumentar riquezas; si el precio de los metales disminuye, la eficiencia de perforación debe aumentar para minimizar o evitar una desaceleración de la economía.

1.2 SISTEMAS DE PENETRACIÓN DE ROCA

La perforación de roca es una de las operaciones más comunes en la minería. Desde el inicio de los tiempos la perforación, destrucción y fragmentación de la roca ha constituido a la minería como una de las actividades más importantes del ser humano, desde la labor manual hasta la creación de maquinarias especializadas. La operación de perforación se utiliza en todas las etapas de la minería desde la exploración continuando con todo el proceso de producción hasta el final de la actividad minera. [Rao Karanam,1998] Es por eso que se considera necesario entender los fenómenos físicos que dan lugar a esta operación tan importante. En el presente acápite, se expondrán los métodos utilizados en la actualidad y se desarrollarán los sistemas de perforación más utilizados en la minería.

1.2.1 CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE PERFORACIÓN

Actualmente existen numerosos sistemas para la perforación en roca, éstos se categorizan en función de los medios físicos por los cuáles se logra la fracturación y destrucción de la roca. En la tabla 1.1 se muestran dichos sistemas de perforación catalogados según el tipo de energía. La elección de cada sistema dependerá del propósito y situación de la perforación. No se puede asegurar que un sistema es mejor que el otro, pues depende de las situaciones de perforación y las necesidades técnicas de precisión, recursos, entre otros.

Tabla 1.1: Sistemas de penetración de roca, catalogados según su tipo de energía [Jimeno,2003]

Sistemas de penetración de roca	
Tipo de energía	Variedades
Mecánicos	Percusión
	Rotación
	Rotopercusión
Térmicos	Soplete o lanza térmica
	Plasma
	Fluido caliente
	Congelación
Hidráulicos	Chorro de Agua
	Erosión
	Cavitación
Sónico	Vibración de alta frecuencia
Químicos	Microvoladura
	Disolución
Eléctricos	Arco eléctrico
	Inducción magnética
Sísmico	Rayo láser
Nuclear	Fusión
	Fisión

Como se puede notar de la tabla 1.1, existen muchos métodos de perforación de roca, los más utilizados en la industria minera, petrolera y de construcción son los métodos mecánicos [Jimeno,2003]. Si bien los demás métodos han sido desarrollados para cubrir situaciones específicas, los sistemas de perforación mecánica son los más comunes y prácticos. Todos los sistemas de perforación mecánica constan de tres componentes funcionales: la fuente de energía mecánica, mecanismo de transmisión de energía y el utensilio de penetración; denominado bit. A continuación se explicarán las tres variedades de los sistemas mecánicos pero sólo se profundizará en el método

de perforación percusiva, pues es el método de estudio de esta tesis [Rao Karanam, 1998].

Los sistemas de perforación mecánica generan la destrucción y/o fractura de la roca por medios mecánicos como fuerzas de impacto, fuerzas de corte, fuerzas de aplastamiento, propagación de ondas de esfuerzo, entre otras. Los sistemas de perforación mecánica se dividen en tres variedades, dependiendo del tipo del medio mecánico con el que generan destrucción y/o fractura en la roca. Los tres sistemas de perforación mecánica son perforación rotativa, perforación percusiva y perforación roto-percusiva. La elección de cada tipo de variedad dependerá del tamaño de agujero que se requiere y de la dureza de la roca a perforar.

1.2.2 SISTEMA DE PERFORACIÓN MECÁNICA

La perforación rotativa se basa en la fuerza de corte para penetrar la roca. Se necesita de un torque rotativo y de una fuerza de empuje que permite la perforación de la roca. Las partes básicas de un sistema de perforación rotativo son el sistema de rotación y la broca o bit de perforación rotativa. Existe una gama extensa de brocas distintas para la perforación rotativa, pero es importante denotar que la función de la broca es la de generar fuerza cortante en la roca desprendiendo fragmentos de roca. La figura 1.2 muestra esquemáticamente el sistema de perforación rotativa.

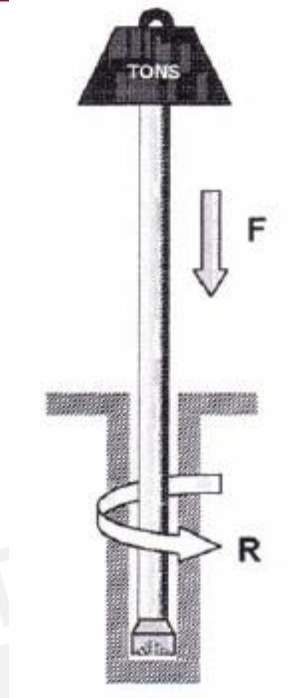


Fig. 1.2: Sistema de perforación rotativa. Notemos que el torque R es el que genera el corte en la roca y la fuerza F genera el empuje para el avance.

La perforación percusiva se basa en las fuerzas de impacto y aplastamiento. Para generar el impacto es necesario tener una fuente de energía mecánica que aumente intempestivamente la velocidad del utensilio de penetración, que en el caso de la perforación percusiva también se conoce como indentador, y así penetrar la roca. Se denomina como martillo a aquel elemento que genera los golpes. Los sistemas actuales de perforación percusiva realizan la labor de fractura golpeando repetidamente la roca pero entre golpe y golpe existe un giro para poder hacer más efectiva la perforación. En ese sentido, los sistemas de perforación percusiva tienen que tener la facultad de realizar pequeños giros para poder asegurar la destrucción de la roca uniformemente y perforar un orificio con el diámetro deseado. Existen dos metodologías utilizadas en la perforación percusiva, el método Top-of-the-Hole y el método Down-the-Hole, que serán explicados con mayor detalle más adelante.

Finalmente, la perforación roto-percusiva combina los conceptos de la perforación rotativa y percusiva. Se puede definir como la continua acción de rotación superpuesta a golpes axiales percusivos. En los sistemas de perforación roto-percusiva, se

fragmenta la roca utilizando fuerzas de impacto y fuerzas de corte, lo que significa que constantemente golpea la roca y gira desgarrando la superficie de la roca. Esto implica que el esfuerzo que sufre la roca se incrementa momentáneamente por la acción percusiva, por ende para fracturar la roca se necesita menor torque y empuje que en un sistema de perforación netamente rotativo. Este sistema también genera pulverización en la superficie de la roca a fracturar, además provoca la generación de micro ranuras que facilitan la perforación posterior [Rao Karanam,1998].

1.2.3 MÉTODOS DE PERFORACIÓN PERCUSIVA

Como se mencionó anteriormente, existen dos metodologías muy utilizadas en la perforación percusiva. Son conocidas como Top-of-the-Hole (TOH) y Down-the-Hole (DTH). Dichas metodologías hacen mención a la ubicación física del martillo en una configuración típica de perforación. En el método Top-of-the-Hole, el martillo se encuentra en la parte superior del sistema, fuera del agujero. El golpe es transmitido a través de un elemento de transmisión, normalmente una barra de acero, hasta el indentador o bit. Una de las grandes desventajas del método Top-of-the-Hole son las pérdidas de energía que se generan en la transmisión a través de la barra. Es por ello que no se utiliza este método para agujeros muy profundos. La figura 1.3 muestra el método Top-of-the-Hole.

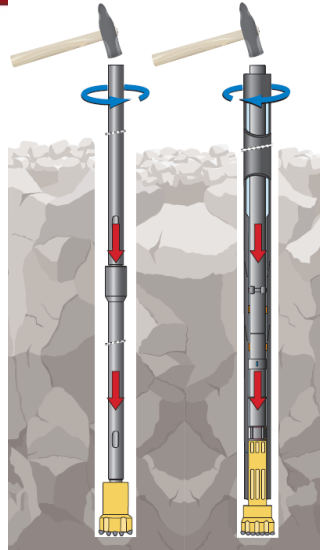


Figura 1.3: Esquema de método Top-of-the-Hole.

Por otro lado en el método Down-the-Hole, el martillo se encuentra dentro del agujero e impacta directamente al indentador. Este método permite realizar agujeros muy profundos pues las pérdidas de energía en la transmisión entre el martillo y el punzón son mínimas dada la cercanía entre ambos elementos. La figura 1.4 muestra el método Down-the-Hole.

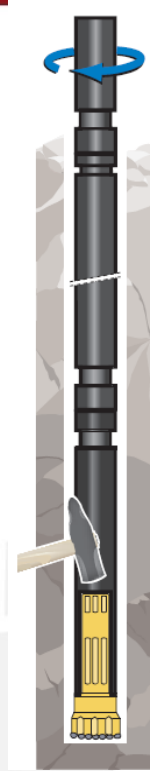


Figura 1.4: Esquema de método Down-the-Hole

1.3 ENSAYOS SOBRE PROPAGACIÓN DE ONDAS ELÁSTICAS

El fenómeno de propagación de ondas elásticas, conocido también como impacto, es difícil de describir matemáticamente por lo que los investigadores y científicos han utilizado métodos indirectos para poder estudiar dicho fenómeno. En el siglo XIX, la teoría de propagación de ondas elásticas en sólidos fue desarrollada por autores como Stokes, Poisson, Rayleigh, Hopkinson entre otros, como una extensión de la teoría de la elasticidad enfocada en el problema de vibraciones de sólidos. Durante el primer cuarto de siglo del siglo XX, este tema perdió relevancia debido a la novedad de la física atómica y además porque la teoría no contaba con métodos eficientes para poder observar el fenómeno a escala de laboratorio. Tras la segunda guerra mundial se retomó el interés por este fenómeno, impulsado por los avances en la electricidad y electrónica; así como el desarrollo de nuevos materiales y su comportamiento, como por ejemplo el plástico. Es evidente que este análisis es muy importante para el diseño de sistemas de perforación percusiva.

Dentro de los experimentos de laboratorio más importantes del desarrollo de la propagación de ondas elásticas se encuentran los avances realizados por Bertram Hopkinson (1914), R.M.Davies (1948), H. Kolsky (1949) y finalmente, Carlsson y Lundberg. En la época pre-electrónica, Hopkinson estudió la relación presión-tiempo durante una explosión o durante el impacto de una bala. Por otro lado Davies optimizó el ensayo de Hopkinson por el acceso que tuvo a la electrónica. Los estudios de Kolsky fueron novedosos por el uso de sensores para medir la deformación unitaria.

El experimento de Hopkinson es conocido coloquialmente como la “barra de Hopkinson”. El ensayo consiste en una barra cilíndrica larga y delgada (una relación diámetro-longitud elevada) suspendida horizontalmente por cuatro hilos y una pequeña pastilla adherida a un extremo de la barra. La pastilla es del mismo material y diámetro que la barra. La pastilla es adherida a la barra por medio de una capa de grasa o por magnetismo. Cuando el extremo libre de la barra es impactado, se transmite una onda de compresión de un extremo a otro. Cuando la onda de compresión llega a la pastilla, se desprende de la barra y, por medio de un péndulo balístico, se mide el momento lineal de la pastilla. En la barra es posible medir el momento lineal a partir de la oscilación de la barra. Al medir el momentum atrapado en la pastilla para diferentes longitudes, permite obtener las áreas bajo las curvas de fuerza-tiempo en diferentes intervalos. [Kolsky, 1963] A pesar de su importancia, este ensayo tiene tres grandes limitaciones: a) no es posible hallar la forma de la onda de esfuerzos, aunque se conoce el área bajo la curva. b) no considera distorsiones tridimensionales y c) no se toma en cuenta la resistencia de la grasa, aumentando la incertidumbre en los resultados. [Geu, 2005]

En el año 1948, Davies ideó su propia barra de presión en la cual las mediciones eran eléctricas y su aparato proporcionaba información continua con lo cual fue posible divisar la curva de fuerza-tiempo. El experimento de Davies consiste en un circuito RC montado entre una placa y la barra, el circuito RC tiene una constante de tiempo alta, por lo que cualquier cambio pequeño por la capacitancia se pueda observar como un cambio de voltaje entre la placa y la barra. La variación de la capacitancia es, en realidad, proporcional a la deformación radial, la cual puede ser asociada a la

dilatación longitudinal por medio de la teoría de Poisson. Una de las grandes ventajas de este aparato es que puede ser colocado en cualquier sección de la barra y no necesariamente en un extremo.

El trabajo de H. Kolsky (1949) es también conocido como la barra de Kolsky o la Split Hopkinson Bar, traducido como la barra de Hopkinson separada. El arreglo del experimento consiste en dos barras de materiales conocidos separados por medio de una probeta. Se colocan sensores de deformación en cada barra para poder medir el comportamiento de la barra cuando la onda de esfuerzos se traslada a través de ambas barras. Las propiedades de la probeta son expresadas en función de los resultados de ambos sensores. En la figura 1.5 se muestra la configuración del ensayo de Kolsky.

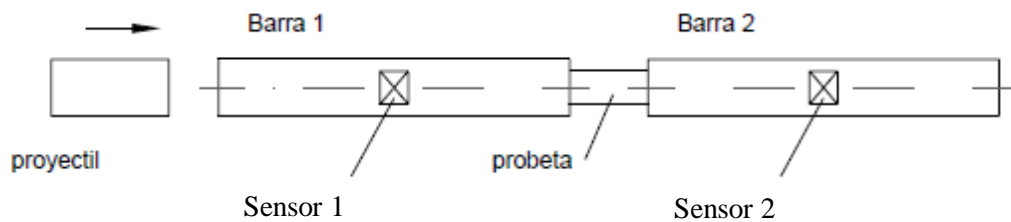


Figura 1.5: Configuración ensayo Kolsky

En el año 1970 Hauser introdujo las galgas de tensión que son sensores de deformación muy eficientes, pequeños y livianos; que actualmente dominan el ámbito de investigación por laboratorio y en la industria. Las galgas de tensión es una resistencia variable cuyo valor depende de la deformación unitaria a la que está sometida. Los investigadores Carlsson, Sundin y Lundberg han desarrollado otros ensayos para determinar las relaciones entre las fuerzas de impacto y la eficiencia de los punzones. El ensayo consiste en un martillo, una barra, un punzón y una probeta de roca. En la barra se encuentran dos galgas de tensión que miden la deformación unitaria cuando la onda de esfuerzos es transmitida desde el martillo y la reflexión que existe cuando el punzón impacta con la roca. Es decir, se mide la onda de esfuerzos en un sentido y en el sentido contrario. Las diferencias entre la onda inicial y la de retorno pueden explicar la interacción entre punzón y roca. Además si se mide la profundidad de

penetración del punzón pueden establecerse relaciones entre las fuerzas de impacto y la eficiencia de penetración del punzón. En la figura 1.6 se muestra la configuración del ensayo de Carlsson, Sundin y Lundberg.

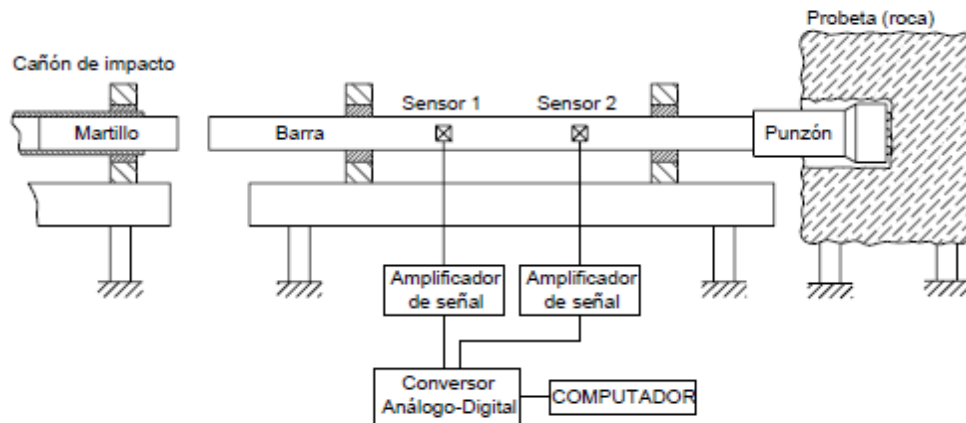


Figura 1.6: Ensayo realizado por Carlsson, Sundin y Lundberg

El Ing. Francisco Geu, en el año 2004, diseñó y fabricó un equipo de laboratorio para realizar ensayos de impacto entre barras cortas. Específicamente se cuenta con un martillo y una barra cuyo extremo sostiene un punzón de perforación indentando una probeta de roca. El equipo permite estudiar la onda de esfuerzos generada por el impacto, siendo medida por medio de un conjunto de sensores, para posteriormente contrastar los resultados obtenidos experimentalmente con resultados obtenidos por métodos numéricos. El equipo fue fabricado íntegramente en las instalaciones de la Pontificia Universidad Católica del Perú. En la figura 1.7 se muestra el equipo diseñado y fabricado por el Ing. Francisco Geu.



Figura 1.7: Equipo de Laboratorio para ensayos de impacto entre barras cortas.

Fuente: [Geu,2004]

El equipo de laboratorio previamente mencionado, consiste de manera general, en un cañón de impacto neumático que permite acelerar el martillo hasta una velocidad de 10 m/s. Dicho martillo, impacta sobre el extremo de una barra, generando una onda de esfuerzos que se propaga hasta el otro extremo, donde se encuentra el punzón de perforación. El punzón de perforación evidentemente se encuentra en contacto con el testigo de roca. La onda de impacto es medida por medio de galgas de tensión, las cuales se especificarán líneas más adelante. El equipo cuenta, también, con un sistema de medición de velocidad, que puede medir la velocidad del martillo instantes antes del impacto. En la figura 1.8 se muestra el esquema del equipo.

Las galgas de tensión, en inglés llamadas strain-gauges, se utilizan para medir la deformación unitaria. En el diseño presentado, se utilizan las galgas de tensión para medir la deformación de la barra que sostiene al punzón de perforación. Las galgas de tensión se definen como una celda cuya resistencia eléctrica cambia en función de la deformación a la que es sometida. A través de éste tipo de sensor se puede inferir la forma de la onda de esfuerzos que recorre la barra, en ambos sentidos. Por otro lado, los sensores de velocidad utilizados consisten en dos haces de luz láser que iluminan

dos fotodiodos separados una distancia conocida. Cuando el pistón interrumpe los haces de luz, se generan dos señales desfasadas un tiempo, con el cual un microprocesador puede medir la velocidad del martillo. [Geu,2004]

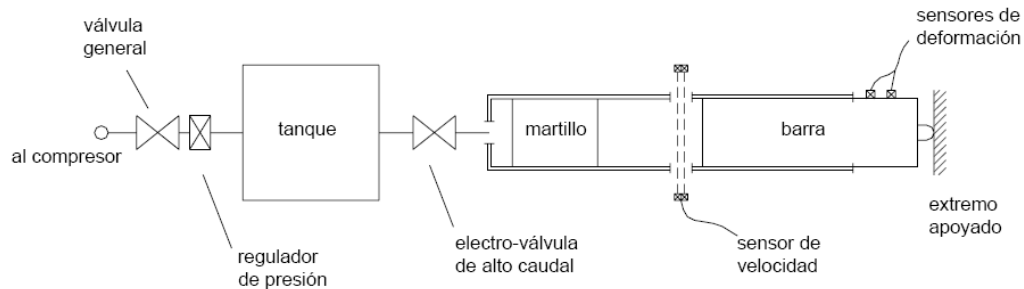


Figura 1.8: Esquema del equipo diseñado por el Ing. Francisco Geu

Fuente: [Geu,2004]

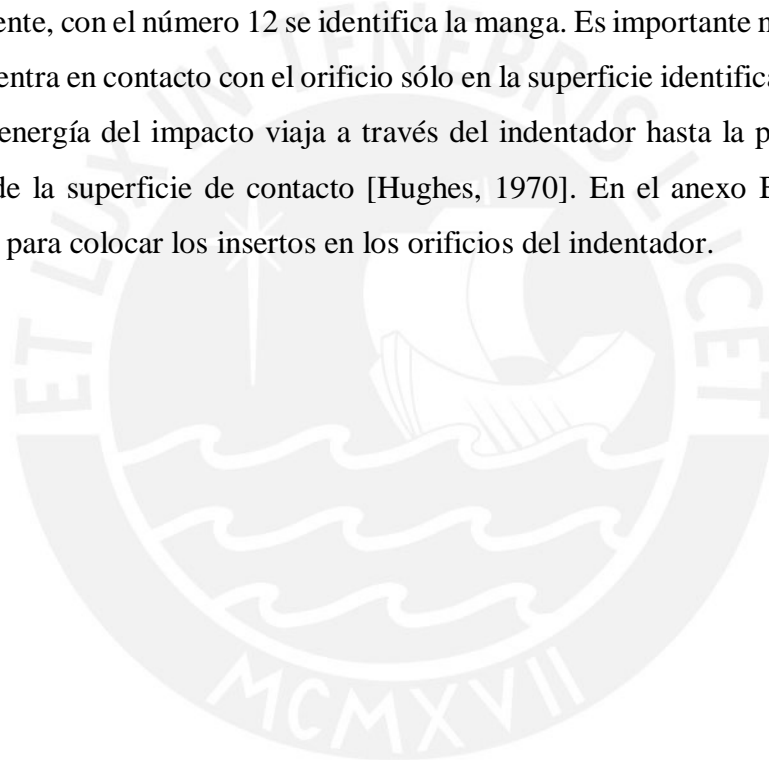
1.4 PATENTES

Como se mencionó anteriormente, existen varios métodos de perforación percusiva y se mencionó brevemente los elementos que constituyen a un taladro de percusión, dentro de los cuales está el martillo y el indentador. Existen dos tipos de indentadores llamados de cincel (chisel bit) y de botón (button bit). El tipo de indentador más usado actualmente en la industria es el segundo, el indentador de botones, también llamados insertos. Los botones normalmente están hechos de carburo de tungsteno por sus propiedades de dureza y resistencia a la abrasión [Persson, 1994].

En el año 1970, se ingresó una patente relacionada con el montaje de los botones. La figura 1.9 muestra el invento mencionado. Antes de dicha invención, los insertos eran sostenidos al indentador por medio de ajuste entre el botón y el indentador. Eso implicaba tener tolerancias muy estrictas en la fabricación, por ende, mayor costo. También era necesario calentar el indentador para realizar el ajuste necesario, por lo

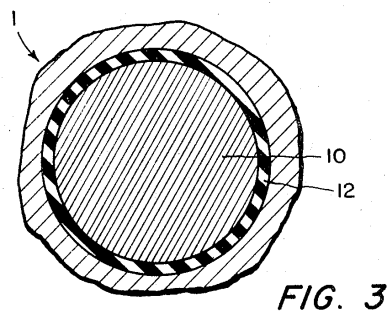
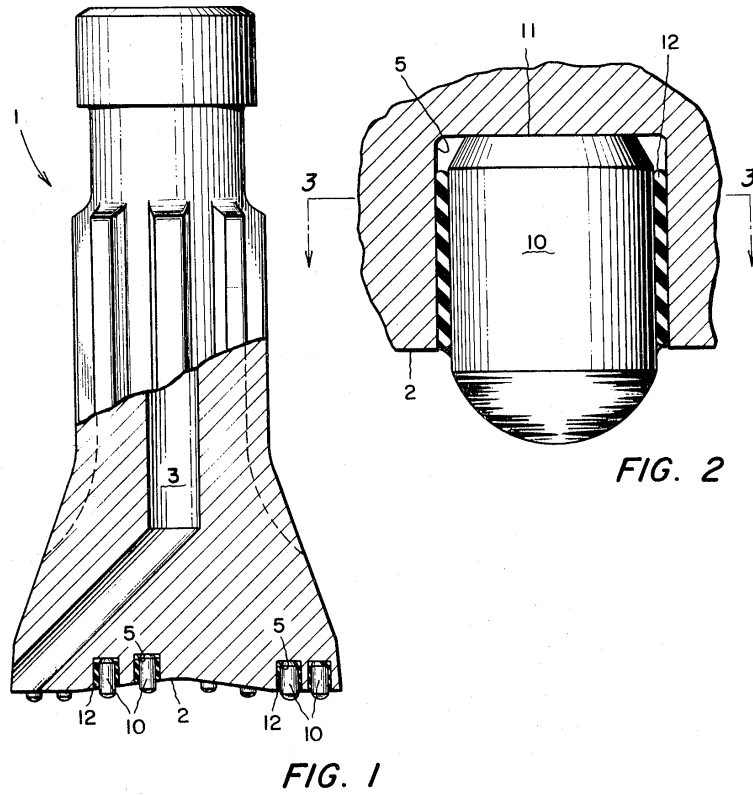
que no era posible tratar térmicamente el indentador antes de colocar los insertos. La invención de Hughes modifica el montaje mencionado anteriormente, al mejorar el sistema de ajuste directo entre el inserto y el indentador con un sistema que utiliza una “manga” de un material elastómero. La manga genera suficiente interferencia y fricción para que el inserto no se suelte del indentador.

La figura 1.9 muestra tres figuras que el inventor utiliza para presentar su invención. Identificado con el número 1, se muestra el indentador. Con el número 5 se identifica el orificio donde se aloja el inserto. El inserto se identifica con el número 10. Finalmente, con el número 12 se identifica la manga. Es importante notar que el inserto se encuentra en contacto con el orificio sólo en la superficie identificada con el número 11. La energía del impacto viaja a través del indentador hasta la punta del inserto a través de la superficie de contacto [Hughes, 1970]. En el anexo B.1 se muestra un método para colocar los insertos en los orificios del indentador.



PATENTED NOV 9 1971

3,618,683



INVENTOR
ROBERT W. HUGHES

Frederic H. Johnson

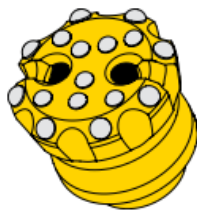
ATTORNEY

Figura 1.9: Patente botones de indentador.

Fuente: [Hughes, 1970]

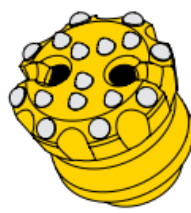
En la industria existen varias empresas que se dedican al diseño, fabricación y distribución de maquinaria pesada para perforación. Una de las más reconocidas y antiguas es la empresa sueca Atlas Copco fundada en 1873. La empresa Atlas Copco ofrece una gama extensa de máquinas de perforación tanto DTH como TOH. Además ofrece una variedad de indentadores con insertos. La figura 1.10 muestra los tipos de indentadores con insertos que ofrecen. Todos los indentadores que fabrica la empresa Atlas Copco son fabricados con acero de alta calidad, mecanizados con alta precisión, tratados térmicamente para aumentar su dureza y han sido tratados por compresión superficial para resistencia a la fatiga. En la figura 1.10 se puede notar que existen dos tipos de insertos, los insertos pueden ser esféricos o pueden ser convexos, también llamados balísticos por su semejanza a la geometría de una bala. Los insertos son de alta precisión.

Drill bits – standard assortment



Flat front

Applications:
Hard and abrasive formations, all round.
Typical formations:
Granite, hard limestone, basalt.



SpeedBit

Applications:
Medium hard to hard and abrasive formations. For higher productivity.
Design feature:
Ballistic buttons in front.
Typical formations:
Granite, hard limestone, basalt.



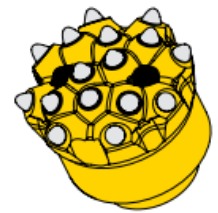
Convex front, ballistic

Applications:
Soft to medium hard rock. Non abrasive formations. High penetration rate.
Typical formations:
Limestone, hard limestone, shale.



Concave front

Applications:
Medium hard to hard formations. Less abrasive, fractured formations. Excellent control over hole deviation.
Design feature:
HD - larger gauge buttons. DGR - double (overlapping) gauge row. Only from 8".
Typical formations:
Granite, hard limestone, basalt.



Rocket bit

Applications:
Soft to medium hard formations. For exceptional productivity. Fractured rock.
Design feature:
Spherical buttons for hard and abrasive formations. Ballistic buttons for soft formations.
Typical formations:
Limestone, hard limestone.

Figura 1.10: Tipos de indentadores con insertos que ofrece la empresa Atlas Copco

Fuente: [Atlas Copco, 2007]

Los catálogos de la empresa Atlas Copco, también recomiendan el tipo de indentadores para cada tipo de roca, dicha recomendación se muestra en la figura 1.11. La empresa enfatiza la correcta elección del indentador para prolongar la vida útil del indentador.

La elección del tipo de indentador está basado en el tipo de roca que se requiere perforar y de la tasa de penetración para una aplicación específica. [Atlas Copco, 2007].

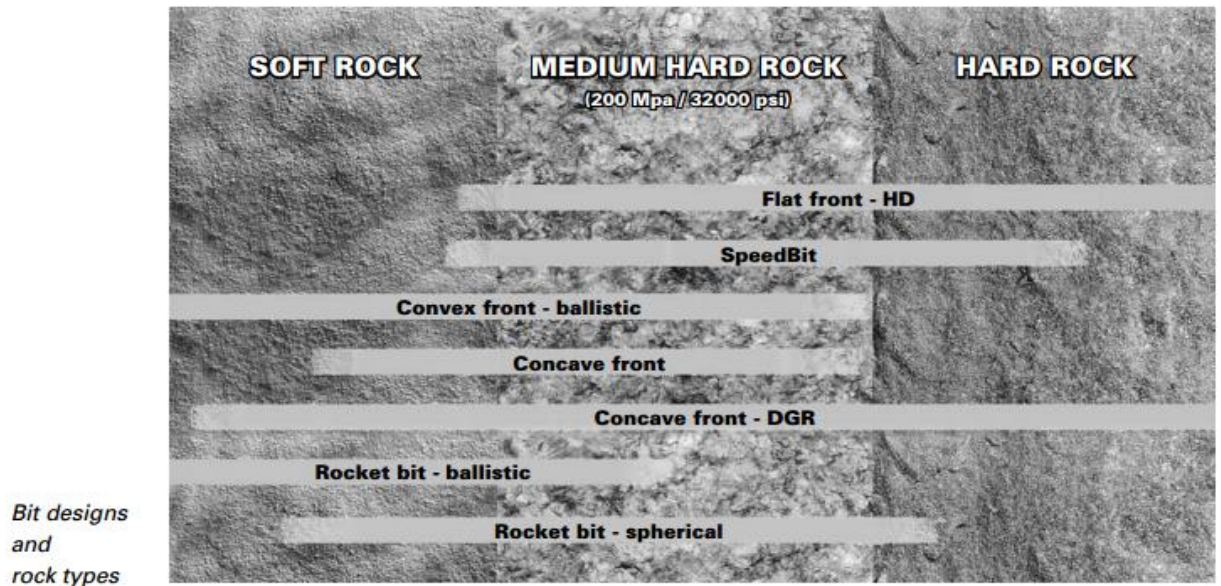


Figura 1.11: Recomendación de tipo de indentador para cada tipo de roca

Fuente: [Atlas Copco,2007]

CAPÍTULO 2

DISEÑO CONCEPTUAL

En el capítulo anterior se abordó el tema para dar a entender el contexto alrededor de la ciencia y estudio de la operación de perforación. Se mostró el estado del arte y específicamente el diseño y fabricación de un aparato de laboratorio para el estudio del impacto entre dos barras cortas, diseñado por el Ing. Francisco Geu. En este capítulo se expondrá tanto la problemática que la presente tesis trata de resolver, siendo una mejora del diseño del Ing. Geu; como la solución planteada mostrando todas las consideraciones tomadas. En ese sentido, se utilizarán muchos conceptos del equipo del Ing. Geu para la realización de esta tesis. Para el desarrollo de la tesis, se utilizará la metodología de diseño normalizada VDI 2222. [Barriga, 1985]

2.1 PROBLEMÁTICA

El diseño del Ing. Geu aborda el tema del impacto entre el indentador con inserto con un testigo de roca para poder contrastar los resultados del ensayo con los resultados de los métodos numéricos desarrollados en las últimas décadas. Su análisis se dirige a la indentación de la roca en un solo punto. La figura 2.1 muestra el concepto de indentación en la roca del aparato de laboratorio del Ing. Geu. El área sombreada interior con tonos de azul representa la muestra de roca, mientras que el área

sombreada de gris representa el mortero que rodea a la muestra de roca. En el anexo B.2 se muestra a detalle los componentes del equipo diseñado por el Ing. Geu.

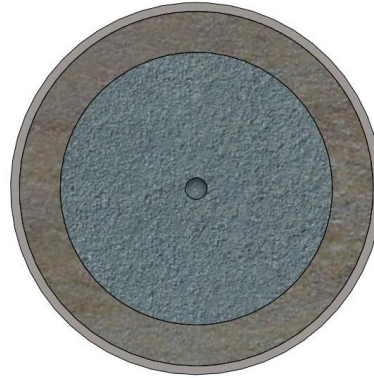


Figura 2.1: Indentación en testigo de roca en el equipo de laboratorio del Ing. Geu

Como se puede notar en la figura 2.1 el ensayo siempre genera una indentación en la misma posición del testigo de roca. Como se mencionó anteriormente, los taladros percusivos en la industria, golpean y giran para generar la mayor destrucción posible en la roca. El propósito de esta tesis es diseñar un equipo de laboratorio que permita estudiar el espaciamiento entre impactos, de manera que la perforación sea más eficiente. En este sentido, el objetivo es estudiar el espaciamiento óptimo que permite una perforación más rápida, utilizando menos recursos energéticos y alargando la vida útil de los aparatos de perforación. Todos estos aspectos se reflejan directamente en el costo de la perforación.

La figura 2.2 muestra el objetivo principal de la presente tesis de manera gráfica. Se puede notar que al existir una zona de sobreposición de daño, el daño es mayor y se extiende por todo el borde de la roca. Por lo que se puede notar, variar el ángulo en el giro del indentador permite estudiar la existencia de la zona de sobreposición. La presente tesis aborda este tema como objetivo principal.

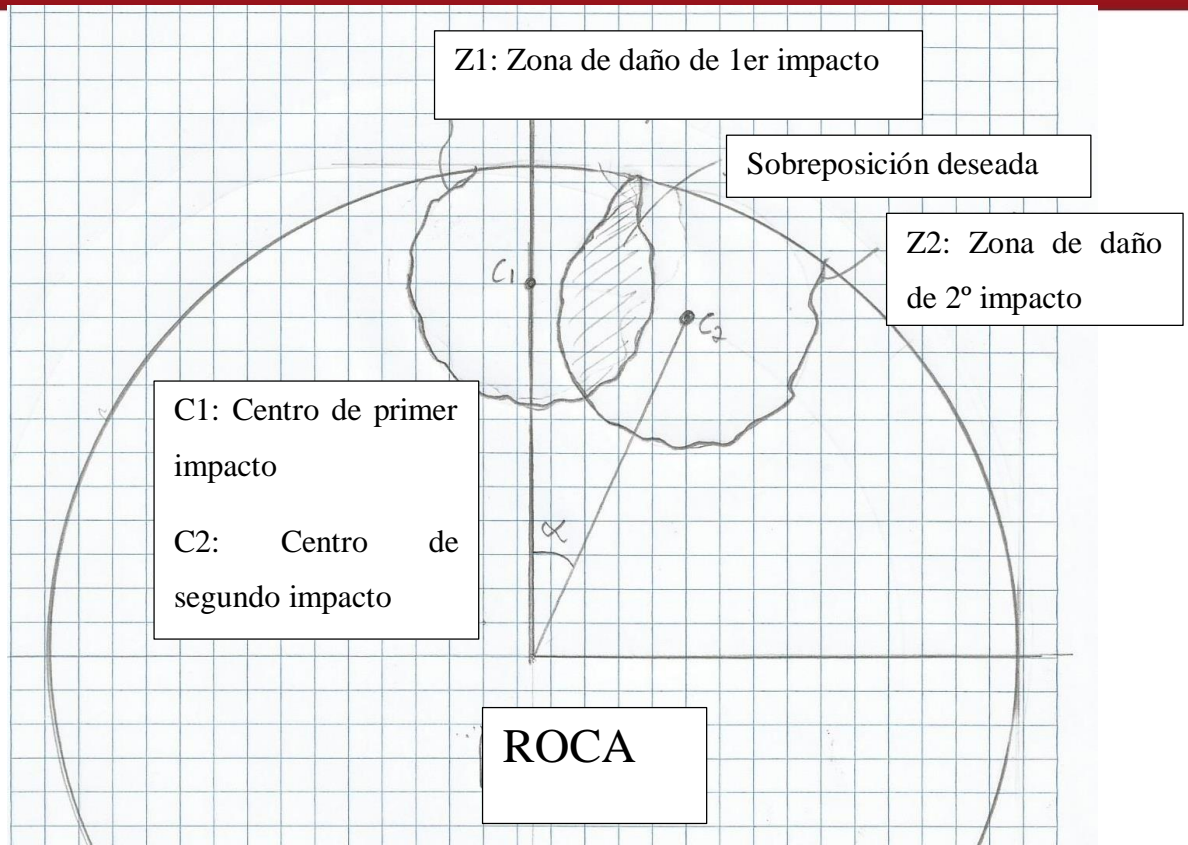


Figura 2.2: Zona de sobreposición y ángulo óptimo deseado

2.2 LISTA DE REQUERIMIENTOS

Como parte del procedimiento de diseño utilizado, es necesario enlistar los requerimientos que debe cumplir la máquina, de manera que se pueda idear distintas maneras para completar dichos requerimientos y dejar fluir la creatividad. El requerimiento principal de la máquina es que sea capaz de generar indentaciones, por impacto, en distintas posiciones del testigo de roca. En la tabla 2.1 se muestra una síntesis de los requerimientos. El testigo de roca debe cumplir con los siguientes requerimientos:

- Debe ser de un tipo de roca dura como granito, graniodorita, andesita, etc.
- Debe cumplir con las siguientes dimensiones para que sea posible moverlo y cargarlo y tenga un área suficiente para realizar las indentaciones: Diámetro indentable de al menos 150 mm.

Por otro lado los insertos que pueden utilizar deben tener un diámetro entre 8 mm y 12 mm.

Geometría:

- La máquina debe ser lo más compacta posible, para así poder utilizarse en el laboratorio de Mecánica de Suelos.
- Debe permitir el intercambio de insertos. Así, con el intercambio de insertos es posible ensayar distintos tipos de insertos y encontrar la mejor forma para el tipo de roca a ensayar.

Cinemática:

- El martillo y el indentador deben desplazarse longitudinalmente, debe evitarse el movimiento transversal. De esta manera, se asegura que el estudio sea en una dimensión (paralelo al eje del martillo e indentador).
- El indentador debe encontrarse en reposo hasta el impacto y así poder tener lecturas objetivas en el ensayo. De esta manera se asegura que la única energía que recibe el indentador sea la transmitida en el impacto.
- El indentador y el martillo deben poder desplazarse longitudinalmente después del impacto para poder registrar la reflexión de la onda de esfuerzos.
- La máquina debe acelerar el martillo desde una velocidad de 1 m/s a 10 m/s, la cual debe ser regulada por el usuario.

Fuerzas:

- La máquina debe proporcionar la fuerza necesaria para generar un impacto medible. Dicha fuerza dependerá de la sensibilidad de los sensores.
- El indentador debe estar en contacto con el testigo de roca, por lo que debe existir una fuerza mínima que asegure el contacto.
- La fuerza de impacto debe ser paralela al eje del indentador para evitar fuerzas oblicuas que impidan una medición real.

Energía:

- Debe permitir conectarse a la corriente comercial de 220 VAC. La máquina es para ensayos dentro de un laboratorio donde se tiene una toma de corriente de 220 VAC.
- Se debe buscar la menor cantidad de pérdidas de energía en la máquina para evitar medidas falsas.

Materia:

- Los materiales de la máquina deben ser lo suficientemente resistentes para soportar las cargas. Cualquier daño estructural puede afectar los resultados del ensayo.
- Los materiales deben ser duraderos ante la corrosión ambiental. Esto para evitar que la corrosión afecte el movimiento del martillo y perturbe la medición de la onda de esfuerzos.

Señales (Información):

- La máquina debe ser capaz de medir la velocidad del martillo antes del impacto, para conocer la energía que se está transmitiendo.
- La información debe ser almacenada para su posterior análisis.
- Los sensores, actuadores y sistema de almacenamiento y control deben utilizar niveles de voltaje comerciales de manera que sea sencillo suministrar de energía.

Seguridad:

- La máquina debe asegurar la seguridad e integridad del usuario para evitar accidentes.
- La máquina debe tener un dispositivo de seguridad que avise y asegure que es posible manipular la máquina.
- La máquina debe tener un medio de accionamiento de emergencia con el cual se liberen las cargas que pueden resultar peligrosas para el usuario.

Ergonomía:

- La interfaz de usuario debe ser intuitiva y fácil de manipular, usando la menor cantidad de medios de accionamiento posible. El usuario debe enfocar sus esfuerzos al análisis del ensayo, no a la manipulación de la máquina.
- Los dispositivos de accionamiento deben seguir las normas de color, forma y tamaño para evitar confusiones y accidentes.
- El diseño de la máquina debe seguir como guía el percentil antropométrico correspondiente al país, esto permite el uso correcto y seguro de la máquina.

Fabricación:

- El diseño de la máquina debe asegurar una fácil fabricación, es decir, que pueda ser fabricado en cualquier taller mecánico.

Montaje:

- La máquina debe ser fácil de montar y desmontar, para poder realizar los ensayos de manera eficaz y rápida.
- Los repuestos de la máquina deben encontrarse en el mercado local. La máquina no debe estar inhabilitada por mucho tiempo debido a la espera de repuestos.

Control:

- La máquina debe tener un sistema de control confiable. El usuario debe tener confianza plena en el sistema de control para asegurar su seguridad, debido a las fuerzas de impacto elevadas, y medidas correctas.
- La respuesta del sistema de control debe ser rápida y precisa siguiendo el criterio del 5% de error.

Uso:

- La máquina debe ser fácil de usar, sin la necesidad de conocimientos técnicos para su uso. El investigador debe estar más concentrado en los resultados del impacto que en la operación del equipo.

Mantenimiento:

- Se deben diseñar con la menor cantidad de piezas posibles para realizar el mantenimiento, esto facilita la tarea y abarata los costos del mantenimiento.
- El diseño debe incluir formas de fácil desmontaje, para agilizar la tarea de mantenimiento.

Tabla 2.1: Síntesis de requerimientos.

Requerimientos del equipo	
Tipo	Detalle
Geometría	Equipo compacto
	Permitir el intercambio de insertos
Cinemática	El martillo e indentador deben desplazarse longitudinalmente
	El indentador debe encontrarse en reposo antes del impacto
	Debe acelerar el martillo desde una velocidad de 1 hasta 10 m/s
Fuerza	Proporcionar la fuerza necesaria para generar un impacto
	El indentador debe estar en contacto con el testigo de roca
	La fuerza de impacto debe ser paralela al eje del indentador
Energía	Conexión a la red local de 220 VAC
	Menor cantidad de pérdidas de energía
Materia	Los materiales deben resistir las cargas generadas
	Los materiales deben ser duraderos ante la corrosión ambiental
Señales	Medir la velocidad del martillo antes del impacto
	La información debe ser almacenada
	Niveles de voltaje comerciales
Seguridad	Asegurar la seguridad e integridad del usuario
	Dispositivo de seguridad que advierta manipulación
	Medio de accionamiento de emergencia
Ergonomía	Interfaz intuitiva y fácil de manipular
	Dispositivos de accionamiento bajo normas
	Diseño basado en guía antropométrica
Fabricación	Fácil fabricación
Montaje	Fácil de montar y desmontar
	Repuestos fáciles de encontrar en el mercado local
Control	Sistema de control confiable
	Respuesta precisa para asegurar medidas con menos de 5% error
Uso	Fácil de usar
Mantenimiento	Menor cantidad de piezas posibles
	Fácil desmontaje

2.3 ESTRUCTURA DE FUNCIONES

La estructura de funciones es una técnica de diseño en la cual se realiza una abstracción del problema para evitar bloqueos mentales y predisposiciones a ciertas soluciones. Es, además, una manera para agrupar e identificar las funciones que debe completar el diseño. Se parte de lo más general a lo más específico, es decir, la función principal del diseño se subdivide en funciones que permiten lograr el objetivo deseado. Inicialmente se aborda el diseño como una caja negra y luego se enlistan las funciones generales que debe cumplir en este caso el equipo de laboratorio. En la figura 2.3 se muestra el esquema de caja negra.

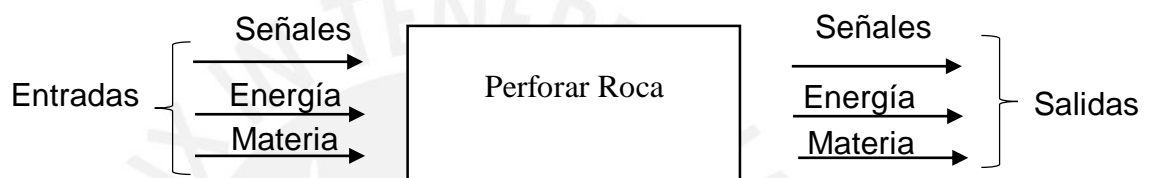


Figura 2.3: Caja negra. [Barriga, 1985]

Entradas:

- Señales: Inicio de funcionamiento de la máquina, parámetros de impacto
- Energía: Fuente de energía de impacto (mecánica) y sistema de control.
- Materia: Testigo de roca con dimensiones determinadas

Salidas:

- Señales: Aviso de proceso terminado, recopilación de datos.
- Energía: Vibración, ruido, calor.
- Materia: Fragmentos de roca tras impacto.

Para facilitar la tarea de enumerar las funciones, es posible dividir las funciones en cuatro grandes rubros: funciones mecánicas, funciones de control/procesamiento, funciones relacionadas a sensores y funciones relacionadas a actuadores.

Funciones Mecánicas:

- Sostener componentes
- Convertir energía eléctrica en energía mecánica
- Posicionar testigo
- Colocar y sujetar indentador
- Posicionar indentador en posición inicial
- Asegurar que el martillo esté en posición cero (posición con mayor carrera de impacto)
- Posicionar indentador en contacto con testigo
- Ejercer fuerza de contacto entre testigo e indentador (entre 0 y 3 kN)
- Acelerar martillo (velocidad entre 1m/s a 10 m/s)

- Retirar martillo de zona de impacto
- Orientar indentador para nueva prueba
- Limpiar superficie

Funciones de Control/Procesamiento:

- Transformar energía eléctrica a 24 VAC (disponible si es necesario para sensores u actuadores)
- Rectificar energía (24VDC)
- Elegir parámetros de impacto (Interfaz)
- Controlar actuadores
- Almacenar datos de impacto
- Acondicionar señales de sensores (amplificar, digitalizar, etc.)

Funciones relacionadas a Sensores:

- Registrar velocidad
- Registrar onda de esfuerzos (incidente y reflejada)
- Registrar energía transmitida a testigo
- Registrar nueva posición de impacto
- Registrar posición del martillo

Funciones relacionadas a Actuadores:

- Regular fuerza de contacto
- Regular velocidad del martillo
- Regular retorno de martillo a su posición cero
- Regular cambio de posición
- Regular limpieza

2.4 DIAGRAMA DE FUNCIONES

El diagrama de funciones es una técnica utilizada para visualizar la interacción de señales, energía y materia en las funciones y sub funciones establecidas. En otras palabras se dice que es una caja negra transparente, donde se puede ver claramente el flujo de señales, energía y materia a través de todas las funciones enlistadas. También permite definir qué se necesita medir y es posible también observar los lazos de control necesarios. En la figura 2.4 se muestra el diagrama de funciones.

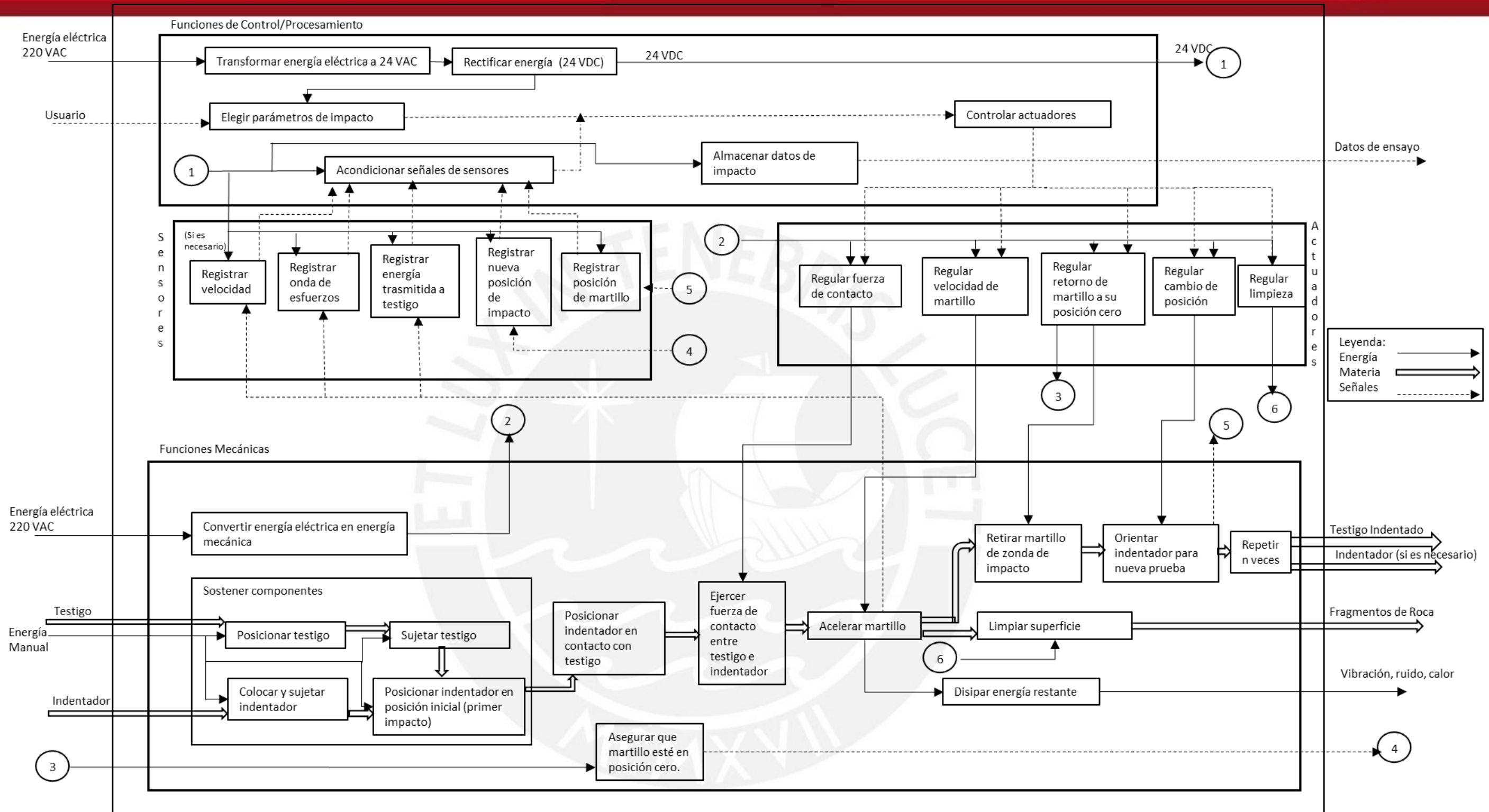


Figura 2.4: Diagrama de funciones

2.5 CONCEPTO DE SOLUCIÓN

El concepto de solución seleccionado se muestra en la figura 2.5. Según el método de diseño seguido, una parte integral de la formulación del concepto de solución es la matriz morfológica. La matriz morfológica es una técnica que permite mostrar distintas alternativas de solución a cada una de las funciones enlistadas. Es la combinación de cada una de estas alternativas la que genera un concepto de solución. En el anexo A.1 se muestra la matriz morfológica utilizada. Luego es necesario evaluar cada una de las soluciones. El análisis y evaluación de los conceptos de solución formulados se encuentra en el anexo A.2.

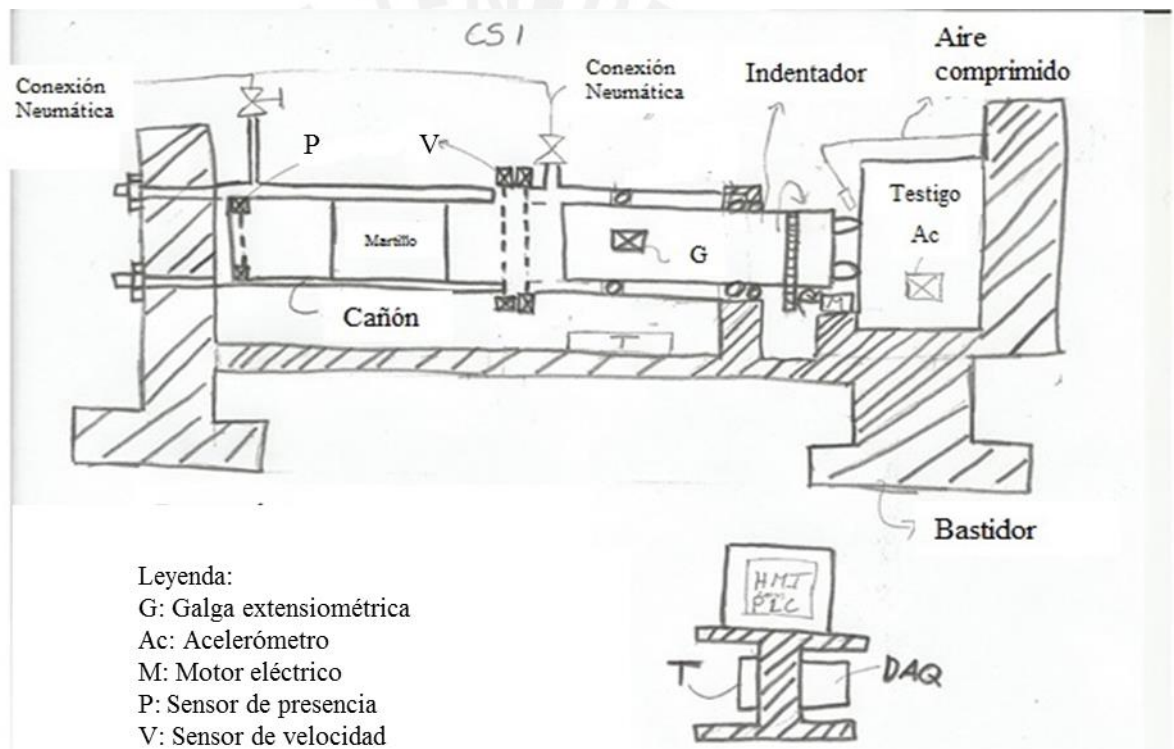


Figura 2.5: Concepto de solución.

El concepto de solución mostrado en la figura 2.5 se basa en la energía neumática para generar las cargas de contacto y las cargas de impacto. Es importante recalcar que el cambio de posición de indentación se va a realizar por giro del sistema de impacto, es decir que el indentador (o parte de él) van a girar sobre el eje longitudinal. El giro del sistema se va a realizar por medio de un motor eléctrico. Para lograr una uniformidad en el impacto, es necesario que existan dos

indentadores diametralmente opuestos, esto garantiza que el golpe sea exitoso. Los datos a recolectar se muestran en la tabla 2.2, así como el sensor para medir dicha información. Dichos datos pasaron por una etapa de pre-procesamiento en la cual las señales serán adecuadas para poder ser procesadas posteriormente por la unidad de control. El concepto de solución planteado, utilizaría un PLC (Computador Lógico Programable por sus siglas en inglés) con un HMI (Interfaz Humano Máquina por sus siglas en inglés). El HMI permite la interacción entre el usuario y la unidad de control. La unidad de control se encargaría de regular los parámetros de ensayo, activación de los actuadores pertinentes para el ensayo y la recopilación y almacenamiento de los datos de salida del ensayo.

Tabla 2.2: Lista de sensores de concepto de solución.

Magnitud a medir	Sensor
Velocidad de impacto	Sensor inductivo (V)
Onda de esfuerzos	Galga extensiométrica en indentador (G)
Onda transmitida a testigo	Acelerómetro en testigo (Ac)
Posición de nuevo impacto	Giroscopio (Giro)
Posición del martillo	Sensor de presencia (P)

2.6 DESCRIPCIÓN DE COMPONENTES DEL EQUIPO

A continuación, se describirán algunos componentes claves que arman el concepto de solución óptimo presentado. También se describirá de manera resumida los componentes que serán diseñados.

2.6.1 TESTIGO Y CAÑÓN DE DISPARO

Inicialmente el testigo es un componente importante, ya se había mencionado algo sobre las dimensiones que debe tener el testigo, pero en esta sección será definido completamente. El testigo de roca debe tener una forma cilíndrica, normalmente se estila tener un casquete de concreto alrededor de la muestra de roca. Las dimensiones

externas del testigo no deben sobrepasar un diámetro de 200 mm (D_2). La cara frontal del testigo debe mostrar una superficie de roca cortada o pulida de alrededor de 150 mm de diámetro (D_1). La “altura” del cilindro deberá ser de 50 mm (E). La figura 2.6 muestra un diagrama del testigo descrito.

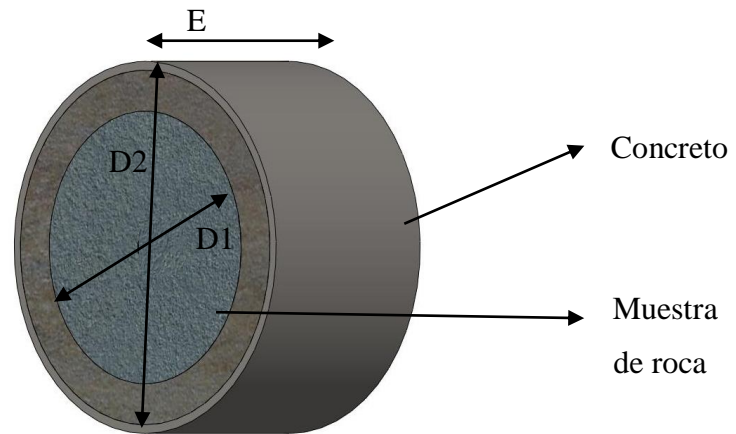


Figura 2.6: Dimensiones testigo de roca.

Lo que corresponde al cañón de disparo, comprende en un cilindro neumático que alberga un martillo de acero, que es aquel componente que genera el impacto. Este martillo se comporta de la misma manera que un cilindro neumático. La norma ISO 3320 gobierna el diseño y dimensiones de los cilindros neumáticos estándar. Se ha elegido el diámetro interior normalizado de 63 mm. En el año 2004, el ing. Geu concretó experimentalmente la velocidad del testigo. La figura 2.7 muestra los resultados del Ing. Geu. Para el desarrollo de la presente tesis, debido a que las dimensiones han cambiado, se hace imprescindible determinar experimentalmente la relación entre la velocidad del martillo y la presión del aire. Por otro lado, la elección del diámetro permite utilizar sellos neumáticos existentes en el mercado peruano, sin necesidad de hacer pedidos especiales. En la figura 2.8 se muestra el diseño del martillo. Los fabricantes de sellos muestran las dimensiones que deben tener los componentes.

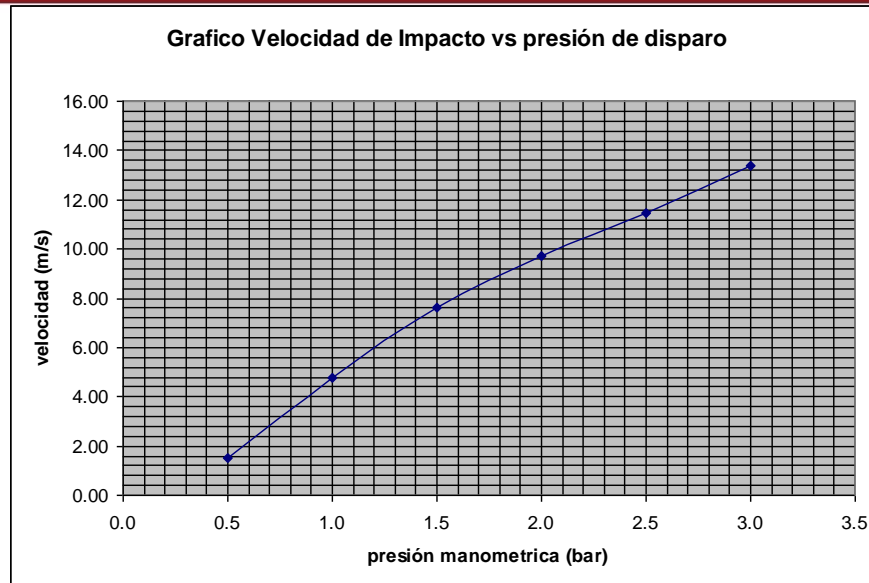


Figura 2.7: Resultados experimentales del Ing. Geu con un cilindro de disparo de 40 mm de diámetro interior.

Fuente: [Geu, 2004]

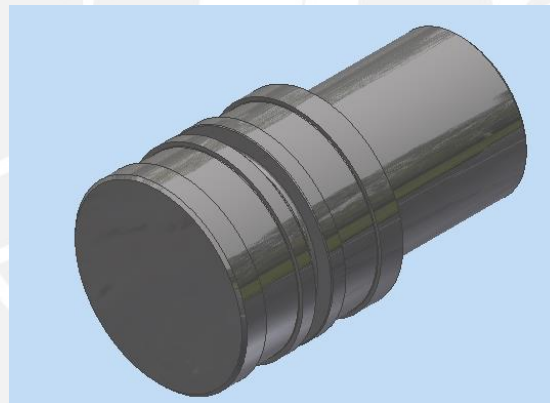


Figura 2.8: Martillo de impacto. Diseño nuevo

2.6.2 INDENTADOR

Definitivamente el elemento más importante del trabajo de tesis es el indentador. Anteriormente, se mencionó los distintos tipos de indentadores (Fig. 1.10) y se ha elegido diseñar un indentador con cara plana, pues es el tipo de bit que más se usa en rocas duras. El diseño del indentador tiene que cumplir con las siguientes premisas: debe permitir el intercambio de insertos, para ello se seguirá el diseño expuesto en estado del arte, diseño presentado por Hughes en el año 1970. Adicionalmente a eso, se va a proponer un método para realizar la inserción del inserto en el indentador. Se puede encontrar dicho método en el anexo B.1 [Pearson, 1974]. Es importante recalcar

que el diseño debe incluir la posibilidad de elegir distintos tipos de insertos. Eso incluye distintas formas (esférico, balístico o cónico balístico) y de distintos tamaños (diámetros de 8 a 12 mm). El diseño del indentador debe permitir, también, la posibilidad de giro. En otras palabras, el diseño debe constituirse pensando en el giro del indentador. En la figura 2.9 se muestra el diseño del indentador.

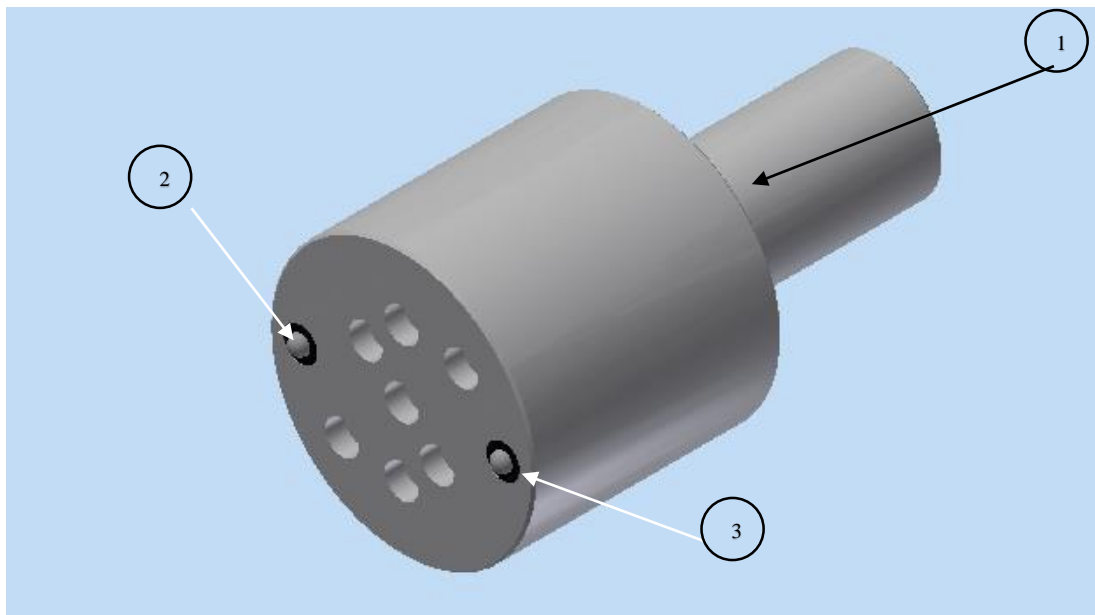


Figura 2.9: Diseño indentador. Diseño nuevo

En la figura 2.9 podemos notar tres elementos importantes, la matriz donde se alojan los insertos (1), los insertos (2) y la manga (3). La matriz está compuesta por 9 orificios por lo que el equipo es más versátil. El investigador será capaz de tener mayor combinación de efectos para estudiar, incluyendo:

- a) Estudio del radio de daño en el impacto.
- b) Estudio de la distancia diametral entre insertos para estudiar el daño interior.
- c) Estudio del espaciamiento entre insertos (giro del indentador, objetivo principal de la presente tesis).

El diseño del indentador tiene una peculiaridad y es ese arreglo de orificios que tiene una forma poco simétrica. Se llegó a dicho diseño analizando la sobre posición de daños en la roca debido a tener dos insertos presentes. En las siguientes páginas se busca explicar la teoría detrás del diseño, para ello es importante establecer algunas definiciones.

Se conoce como espaciamento lineal (S), al espaciamento entre los ejes de insertos adyacentes. Es un parámetro muy importante en el diseño y la operación de las herramientas de perforación, pues permite una perforación más eficiente. La teoría nos explica que a cierta distancia, las fracturas que genera cada inserto en la roca, se superponen generando un desprendimiento más rápido. La mayoría de los análisis numéricos que abordan el tema del espaciamento entre insertos, asumen un régimen cuasi-estático, pero es evidente que el fenómeno del impacto es todo menos estático. El impacto es un fenómeno dinámico [H.Y. Liu, 2004].

Linqvist en el año 1982 realizó varios experimentos con cargas estáticas y pudo señalar que el espaciamento lineal $S= 40a$, donde a es el diámetro del indentador, no presenta ningún tipo de sobre posición de efectos. Con un valor de $S=30a$, existe una interacción entre los insertos pero sin influir demasiado en el desprendimiento de fragmentos de roca. Se puede considerar que a partir de $S=25a$, comienza la interacción y sobre posición de efectos de destrucción de roca. [H.Y.Liu,2004]

Por otro lado, el análisis del impacto como un fenómeno dinámico, fue abordado en el año 2010 de manera que se obtuvo una relación normalizada entre la fragmentación de roca y el espaciamento entre insertos [Wang et al, 2010]. En la figura 2.10, se muestra la configuración utilizada por Wang en su investigación. Los resultados permiten obtener una relación de:

$$\frac{L}{a} = 7.66 \dots \dots \dots \text{Ec. 1}$$

Donde L es la distancia entre el borde de insertos y a es el diámetro del inserto. Wang explica que para un espaciamento de 7.66, hay pocas fisuras entre los insertos por lo que sugiere que se utilice un espaciamento menor.

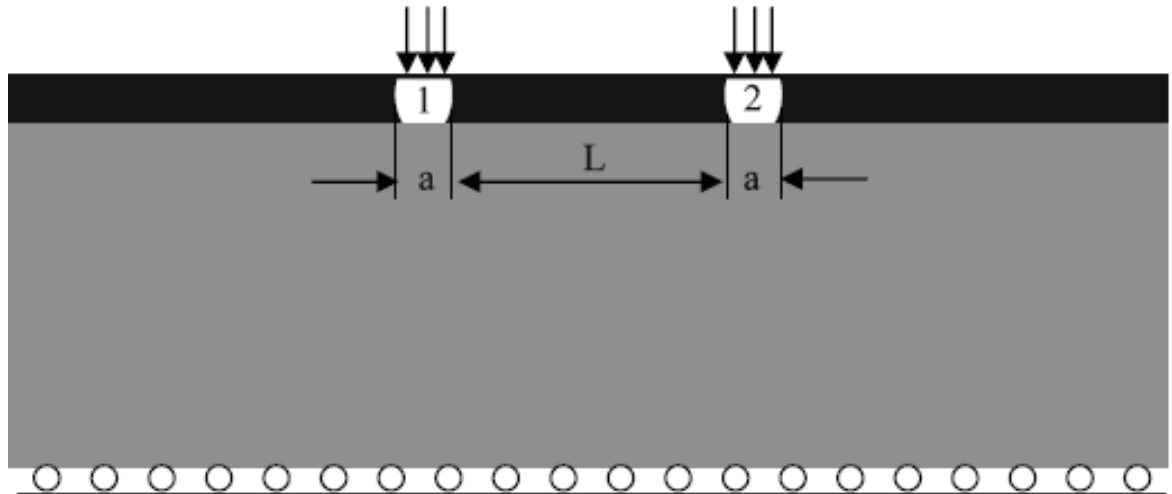


Figura 2.10: Separación entre insertos normalizada.

Fuente: [Wang, 2010]

Si se siguiera la recomendación de Wang al pie de la letra, el indentador resultaría siendo un elemento grande y pesado (diámetro mayor a 180 mm), sugiriendo un cambio completo del concepto de solución óptimo. El diseño de la figura 2.9, muestra un compromiso entre la factibilidad y el valor de S . Para lograr este compromiso, se intercambiaron necesidades teóricas por versatilidad de experimentación. En la figura 2.11 se muestra el concepto de compromiso. La tabla 2.3 muestra el cálculo geométrico de las distancias entre insertos necesarias. En el anexo C.1 se muestra a detalle el cálculo realizado.

Tabla 2.3: Cálculo de S .

$\frac{L}{a}$ (mm)	L (mm)	S (mm)	
2	28	42	S1
3	42	56	S2
4	56	70	S3
5	70	84	S4

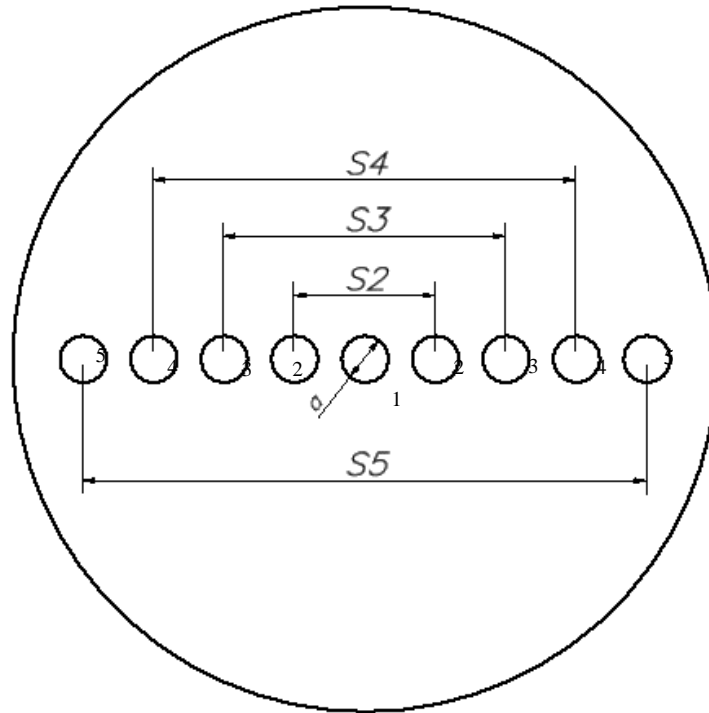


Figura 2.11: Principio de diseño

La figura 2.11 muestra el principio de diseño utilizado. Cuenta con cuatro pares de orificios diametralmente opuestos a distancias normalizadas de $2a$, $3a$, $4a$ y $5a$ respectivamente. Además se cuenta con un orificio en el centro de la cara del indentador para realizar pruebas individuales. La versatilidad ofrecida con este concepto permite al investigador:

1. Estudiar la huella de daño que realiza el indentador sobre la roca. Esto implica utilizar solamente el orificio 1 que se muestra en la figura 2.11.
2. Estudiar el espaciamiento lineal entre insertos para el daño interior (daño entre insertos diametralmente opuestos), caracterizado por la distancia S .
3. Estudiar el espaciamiento entre impacto óptimo para generar un daño uniforme en el exterior del radio de impacto, como se muestra en la figura 2.2

Debido a que las distancias en el concepto de diseño se encuentran en función del diámetro del inserto, es necesario estudiar geoméricamente la cara de la matriz para que no se interpongan los orificios, como se muestra en la figura 2.12 a. Para evitar esto, se optó por rotar los pares de orificios 45° para finalmente obtener el diseño mostrado en detalle en la figura 2.12 b.

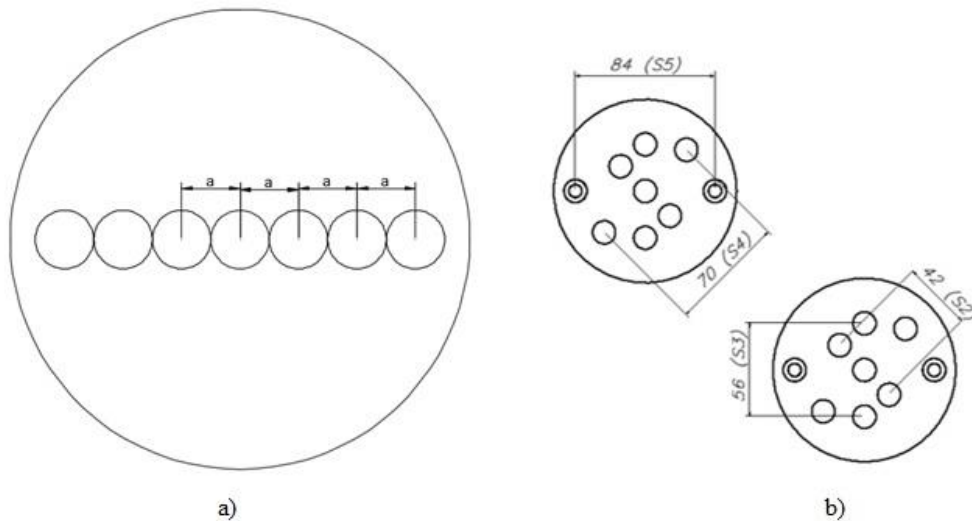
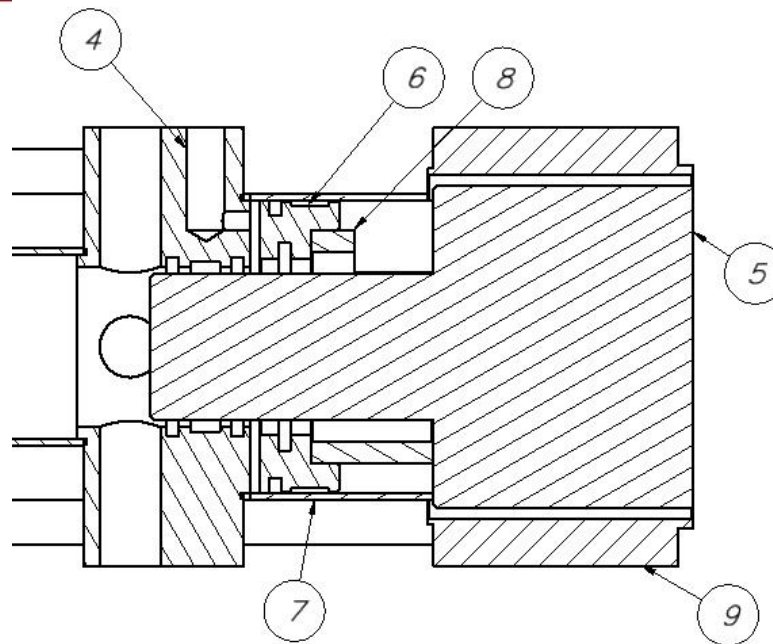


Figura 2.12: a) Sobreposición de orificios distribuidos linealmente. b) Diseño final con orificios rotados 45°.

2.6.3 SISTEMA DE PRECARGA

Como se mencionó anteriormente, se debe asegurar que el indentador y el testigo de roca se encuentren en contacto por medio de una fuerza de precarga. Esta fuerza de precarga se logra a través de un cilindro de precarga y una brida intermedia que permite generar la presión en el indentador. En este sentido, el diseño es nuevo solo en dimensiones a comparación con el equipo presentado por el Ing. Geu. La figura 2.13 muestra la configuración de la cámara de precarga.



Número	Elemento
4	Brida intermedia/Orificio de entrada de aire para precarga
5	Indentador
6	Pistón de precarga
7	Cilindro de precarga
8	Brida de precarga
9	Brida delantera

Figura 2.13: Cámara de precarga.

2.6.4 BRIDAS

Finalmente, parte importante del diseño mecánico son las bridas. Se realizaron tres diseños y son nombradas por su ubicación relativa: posterior, intermedia y delantera, que se muestran en la figura 2.14. La brida posterior aloja el cilindro de impacto y contiene la entrada de aire que acciona el martillo. El elemento de diseño más complejo es la brida intermedia pues debe alojar el impacto. Por un extremo ingresa el martillo en su movimiento y en el otro extremo se encuentra el indentador. La brida intermedia se muestra en la figura 2.14 b, se puede notar cuatro agujeros que sirven para la salida del aire durante el movimiento del martillo. Además tienen otra función que es la de permitir la medición de la velocidad del martillo por medio de un sensor óptico. Finalmente, la brida intermedia permite accionar la cámara de precarga necesario. Finalmente, la brida delantera es el asiento para el indentador, aquí se aloja un cojinete

especial, el cuál será discutido en la siguiente sección.

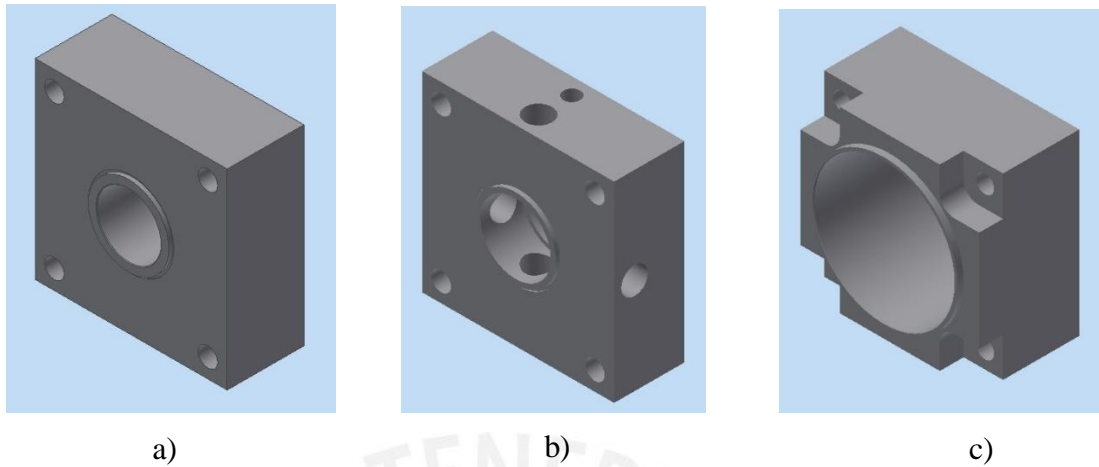


Figura 2.14: Bridas: a) Posterior b) Intermedia c) Delantera

2.6.5 SELLOS Y COJINETES

Los sellos son probablemente los elementos críticos del diseño, sin ellos no sería posible mover el martillo. Son el único tipo de elemento que puede asegurar la hermeticidad suficiente para realizar todas las tareas con la energía neumática. Los sellos se pueden dividir en sellos que dan soporte, llamados bandas guía, y sellos que aseguran hermeticidad en movimiento lineal y rotativo. En la tabla 2.3 se muestran los sellos utilizados. La marca Parker tiene una variedad impresionante de sellos y cuentan con una guía de selección para cada tipo de aplicación neumática. Así, se han elegido los sellos del martillo e indentador.

En base al trabajo del Ing. Geu, el único tipo de sello distinto es el sello rotativo OR. El sello de perfil OR se utiliza tanto en aplicaciones neumáticas como hidráulicas con un excelente comportamiento de fricción por su cubierta de PTFE, la cual disminuye la fricción. Además no se presenta el efecto slip stick. Este tipo de sello permite el giro intermitente (que sería el caso del diseño de la presente tesis). El sello seleccionado según las dimensiones es el sello M204OR05-5060-4.2A. La figura 2.15 muestra el sello correspondiente. La empresa Machen es distribuidor de la marca Parker y es posible pedir de importación dichos sellos o que sean fabricados en Perú bajo la marca Fitseal.



Figura 2.15: Sello rotativo seleccionado. ¹

Los cojinetes son elementos de apoyo para ejes y elementos, además permiten el movimiento relativo entre dos elementos. Los tipos de cojinetes se clasifican en según el rozamiento que se genera entre dos elementos. Puede ser rozamiento de deslizamiento o rozamiento por rodadura. Los cojinetes del primer tipo se conocen, también, como cojinetes de fricción y este tipo de cojinete se utiliza en situaciones de poco espacio. Por otro lado los cojinetes de rozamiento por rodadura se conocen como rodamientos.

Primeramente se eligió, por temas de espacio, que el cojinete óptimo para el equipo es un cojinete de fricción. Tras una investigación sobre los cojinetes de fricción se eligió el cojinete PWM 11012580 de la marca SKF. Es un cojinete de material compuesto que tiene ciertas ventajas sobre otros modelos de SKF. Las características del cojinete PWM 11012580, según la guía de selección del catálogo de SKF, se enlistan en la tabla 2.4. Además en la figura 2.16 se muestra el cojinete seleccionado. Los cálculos relacionados a las dimensiones del cojinete se pueden encontrar en el anexo C.2.

¹ Catálogo Parker

Tabla 2.4: Características de cojinete.²

Característica de selección	Performance del cojinete PWM (evaluado por SKF)
Auto lubricación	Excelente
Operación SIN mantenimiento	Excelente
Cargas de impacto/vibraciones	Excelente
Sensibilidad a des alineamiento	Buena
Baja fricción	Excelente



Figura 2.16: Sección transversa de Cojinete PWM.

2.6.6 SISTEMA DE GIRO

En secciones anteriores se enfatizó la necesidad de poder girar el indentador y así probar la separación entre impactos. Debido a que no se tiene acceso a ninguno de los extremos del indentador, pues en un extremo tenemos la zona de impacto con el martillo y en el otro extremo se tiene el testigo de roca, es necesario utilizar un sistema de giro utilizando la superficie perimetral del indentador. Por ello, se propone un sistema que transmite el movimiento por medio de fricción. La figura 2.17 muestra el concepto del sistema.

² Catálogo SKF bushings, thrust washers and strips. [SKF,2010]

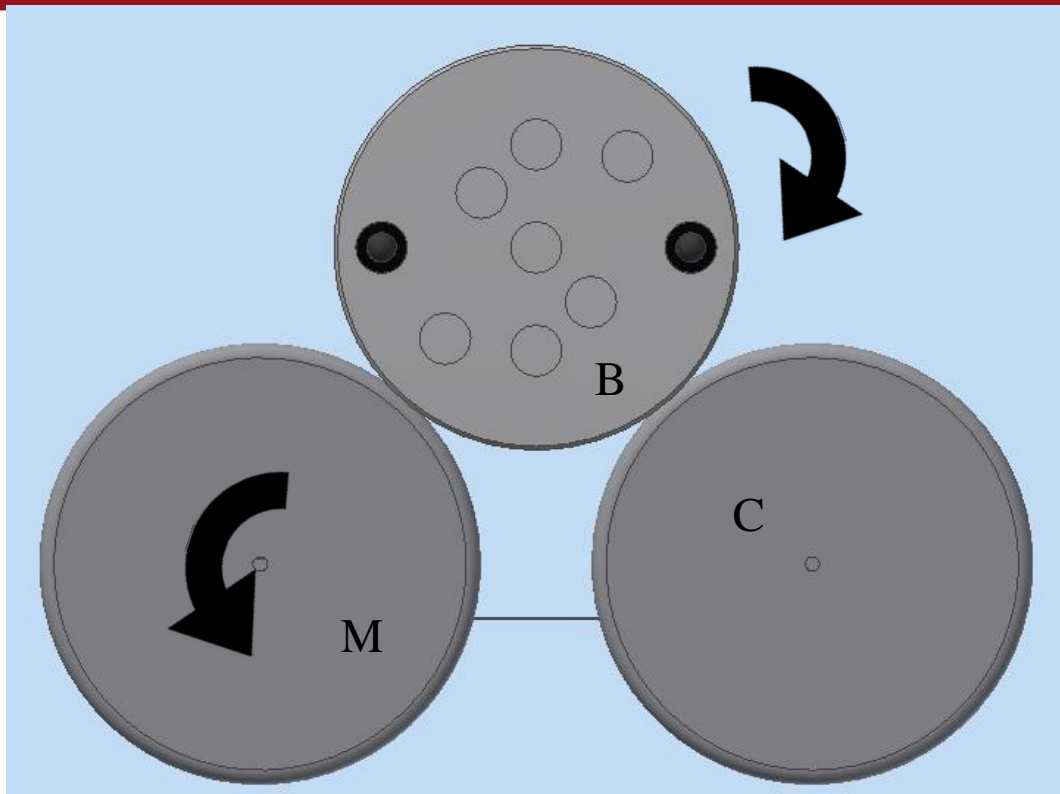


Figura 2.17: Sistema de Giro.

En la figura 2.17 se puede notar que el movimiento del indentador (B en la figura) es proporcionado por la fricción entre B y la rueda motriz (M). La rueda identificada con C es una rueda de apoyo para equilibrar las fuerzas de contacto. Es importante recalcar que el giro del indentador está dado por la fricción que existe entre M y B. Esto implica que se debe tener una fricción muy alta en el contacto entre M y B. Para asegurar que no hay deslizamiento entre M y B, el coeficiente de fricción entre los materiales debe ser elevado. Otro aspecto que asegura que no habrá deslizamiento es la velocidad angular del indentador. Este aspecto es un tema arbitrario y se eligió una velocidad angular de 30° por segundo (90° en 3 segundos). Además se definió la aceleración angular. La figura 2.18 muestra el comportamiento de la velocidad angular del indentador durante el giro.

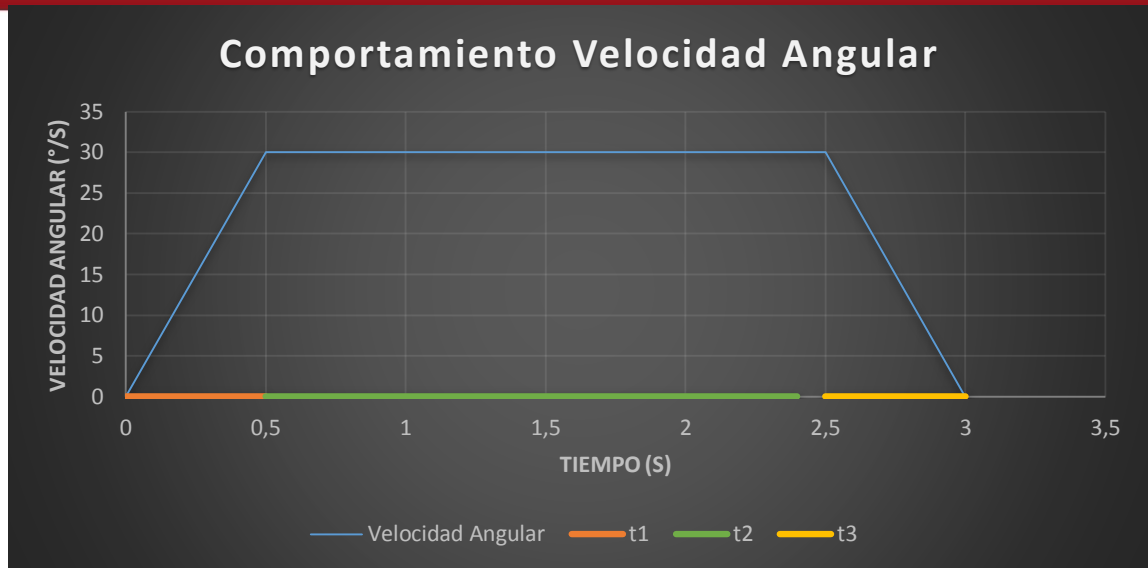


Figura 2.18: Comportamiento Velocidad Angular

Asimismo, es importante recalcar que este sistema de giro debe ser retráctil durante el impacto, es decir, que no debe estar en contacto con el indentador. Para esto, se plantea el uso de un cilindro neumático, aprovechando que se tiene disponible la energía neumática. Además, utilizando el cilindro, es posible regular la fuerza de contacto entre M y B. El sistema de giro consiste, entonces de un motor DC con encoder que genere el par motriz, dos ruedas de acero, que por ser del mismo material tienen un alto coeficiente de fricción entre sí, las placas respectivas para sostener el resto de componentes y un cilindro neumático. La selección del motor DC está en función al torque necesario para mover el indentador, dicho cálculo se encuentra en el anexo C.3. También en el anexo C.4 se encuentran los cálculos para la selección del cilindro neumático.

En la tabla 2.5 se muestra una lista de los componentes que conforman el concepto de solución, así como el grado de diseño que este requiere. Es decir, si es diseño nuevo, si es guiado por alguna norma, o si es un elemento que sólo necesita una selección.

Tabla 2.5: Componentes.

Componente	Tipo (Diseño, Selección)	Observaciones
Cañón Neumático	Diseño según norma	Se continúa con diseño de Ing. Geu
Martillo	Diseño según norma	Se continúa con diseño de Ing. Geu
Indentador	Diseño	Completamente nuevo
Inserto	Selección	Sus dimensiones son restringidas
Sistema de precarga	Diseño	Se continua con diseño de Ing. Geu
Bridas	Diseño	Según funcionamiento
Bastidor	Diseño	Según dimensiones
Sellos neumáticos	Selección	De fácil acceso en el mercado local
Electroválvulas	Selección	De fácil acceso en el mercado local
Sensor de velocidad	Selección	De fácil acceso en el mercado local
Sensor onda de esfuerzo	Selección	De fácil acceso en el mercado local
Sensor martillo	Selección	De fácil acceso en el mercado local
Sensor testigo	Selección	De fácil acceso en el mercado local
Elemento de limpieza	Diseño	Ubicación, selección de manguera
Motor eléctrico	Selección	Según mecánica de movimiento
Transmisión de giro	Selección	
Rodamientos o cojinetes	Selección	Afectan el diseño de bridas

2.7 SISTEMA NEUMÁTICO

El cañón de disparo puede ser modelado como un cilindro neumático de doble efecto, en el cual por un extremo ingresa aire con un alto caudal, acelerando el martillo y por el otro extremo permite el ingreso del aire para el retorno del martillo. El diseño fue basado en el trabajo previo del ingeniero Geu, pero se agregó una línea más para controlar el cilindro neumático necesario para accionar el sistema de giro y la manguera de limpieza. Es necesario hacer notar que los componentes manuales que había propuesto el Ing. Geu, han sido reemplazados por electroválvulas de manera que el pilotaje del sistema neumático sea remoto y automatizado. La figura 2.19 a) muestra el plano del ingeniero Geu y en la figura 2.19 b) se muestra el diseño agregado de la línea agregada. La línea A realiza el disparo del martillo. La línea B permite el retorno del martillo. La línea C genera la fuerza de precarga. Finalmente la línea D acciona la limpieza pertinente y permite accionar el sistema de giro.

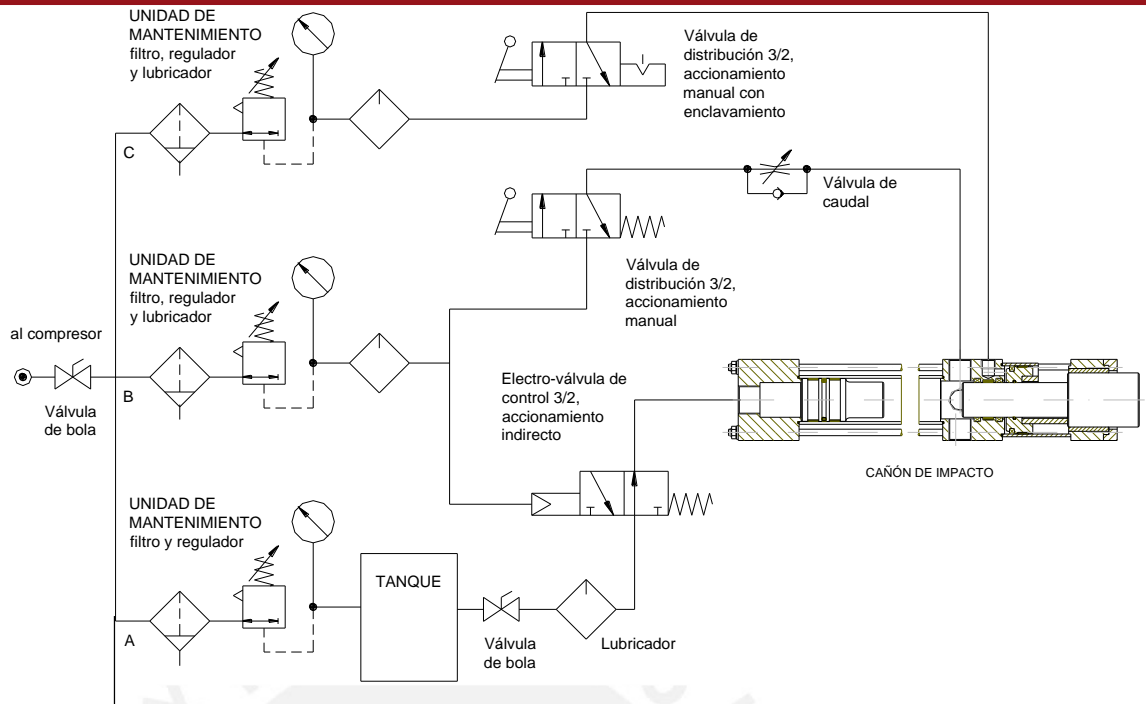


Figura 2.19 a): Sistema neumático propuesto por el Ing. Geu.

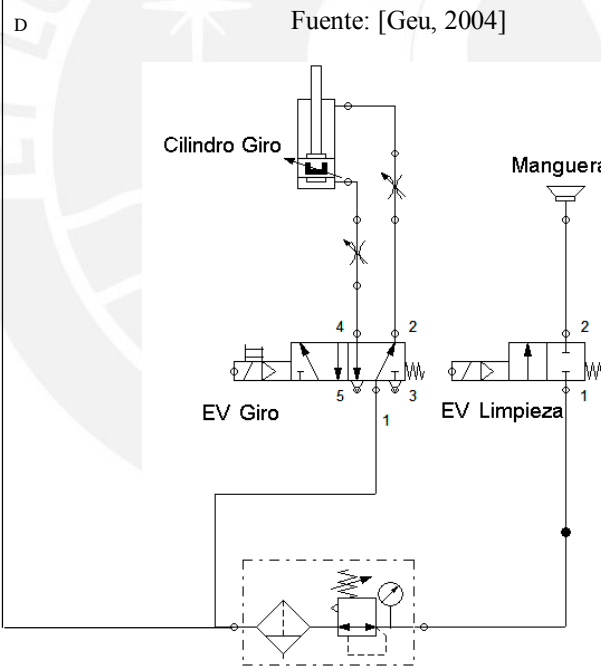


Figura 2.19 b): Plano de sistema agregado.

Normalmente, un cilindro de doble efecto es controlado por medio de una válvula de 5 vías 2 posiciones, es decir, una válvula 5/2. Sin embargo, el hecho de que el martillo tenga una velocidad de salida mucho mayor a la velocidad de retorno, hace que dicha válvula sea descartada. En la sección anterior, se profundizó en el sistema de precarga,

cuyo funcionamiento es con aire comprimido y requiere de una válvula 3/2 para funcionar. El sistema de giro es accionado por un cilindro neumático, que a su vez se controla con una válvula 5/2, ya que es un cilindro de doble efecto. Cabe notar que tanto la salida del émbolo como el retorno de dicho cilindro neumático son reguladas por una válvula reguladora de caudal. Esto permite que el movimiento de la plataforma del sistema de giro se desplace suavemente.

2.8 ANCLAJE

El anclaje de maquinaria es un aspecto relevante del diseño; en especial tratándose de un equipo que genera impacto. En el anexo C.2 ya se calculó la fuerza de impacto y es posible notar que es muy elevada. La fuerza de impacto se traslada a través de los elementos para impactar la roca y transferir parte de esa energía a la separación de fragmentos. Otra parte de la energía se convierte en vibraciones que deben ser disipadas de manera que no perjudiquen el equipo y no sean molestas para el ambiente donde trabaja.

En esta sección se explicarán algunos aspectos importantes relacionados al diseño de los cimientos, así como los requerimientos mínimos para poder diseñar el cimiento. Es importante recalcar que, el diseño de cimientos es un tema complejo depende, en gran medida, del suelo donde se va a construir el cimiento. Es por ello, que se requieren de datos precisos acerca del suelo y este análisis escapa la profundidad de la presente tesis. Sin embargo, existen aproximaciones preliminares que permitirán delimitar las características que debe cumplir el cimiento para el equipo propuesto.

Los tipos de cimientos para maquinaria se muestran en la figura 2.20 y se clasifican en:

- Cimiento tipo bloque (a)
- Cimiento tipo caja (b)
- Cimiento tipo pared (c)
- Cimiento tipo marco (d)

Las máquinas que producen fuerzas de impacto y periódicas, normalmente se anclan en cimientos tipo bloque [Srivivasulu, 1962]. El diseño planteado cumple con las características de fuerzas de impacto periódicas, por lo que se elige un anclaje de tipo bloque de concreto.

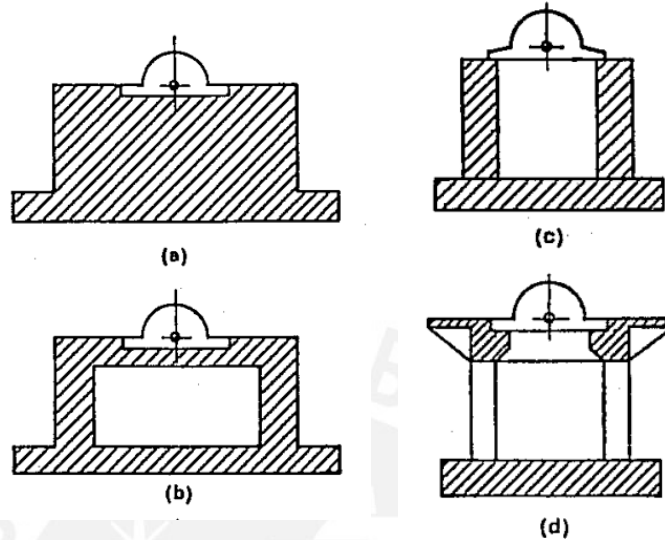


Figura 2.20: Tipos de Cimientos.

Fuente: [Srivivasulu, 1962]

En la literatura, se pueden encontrar lineamientos para poder diseñar una estructura de cimientos, los cuales se exponen a continuación:

- a) El cimiento debe ser capaz de resistir las cargas estáticas y dinámicas sin presentar falla por aplastamiento ni corte.
- b) El centro de masa combinado de la maquinaria debe coincidir, en lo posible, con el centro de masa del bloque de concreto
- c) No debe ocurrir resonancia. Para esto, la frecuencia natural del arreglo cimiento-suelo, debe ser tal que se encuentre alejado de la frecuencia natural de la máquina. (figura 2.21)
- d) La amplitud de las vibraciones no debe sobrepasar los límites establecidos. (Ver figura 2.22)
- e) El diseño debe permitir una posible modificación de la frecuencia natural. [Srivivasulu, 1980]

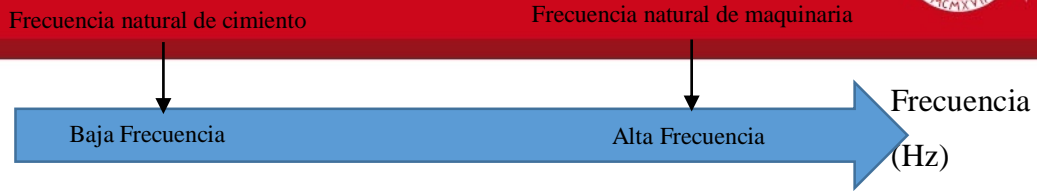


Figura 2.21: Condiciones de frecuencia natural.

Fuente: Srivivasulu. Elaboración propia

En la figura 2.21 se muestra las condiciones que debe cumplir el cimiento. Si la frecuencia natural de la maquinaria a anclar es alta, la frecuencia natural del cimiento debe ser baja y viceversa.

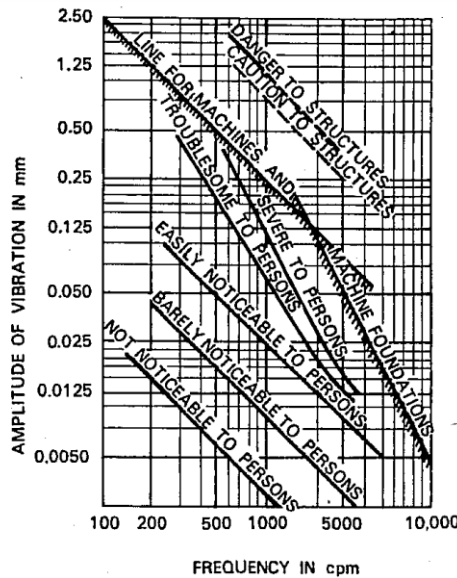


Figura 2.22: Límites permisibles para la amplitud de la vibración.

Fuente: Srivivasulu

Cabe recalcar que el diseño de un cimiento, no solo está en función de la máquina a soportar, sino que también son muy importante las características del suelo donde se va a encontrar. Si bien, el extenso análisis y estudio sugiere obtener experimentalmente las características de la interface suelo-cimiento, es posible hacer una aproximación preliminar por medio de la siguiente expresión, planteada por Alpan:

$$f_n = \frac{\beta}{\sqrt{W}} (At)^{\frac{1}{4}}$$

Donde:

f_n : frecuencia natural del cimiento

W: peso combinado de la maquinaria y cimiento

A_t : área de la base del cimiento

β : constante del material obtenida experimentalmente

La expresión anterior tiene como finalidad dar un cálculo preliminar del cimiento. Además, sólo es válido para suelo de turba, arcilla plástica, arena y arenisca. La constante β tiene los siguientes valores 3900, 69000, 82000 y 111000 respectivamente. [Srivivasulu, 1980]

Finalmente en la figura 2.23 se muestra el diseño realizado.

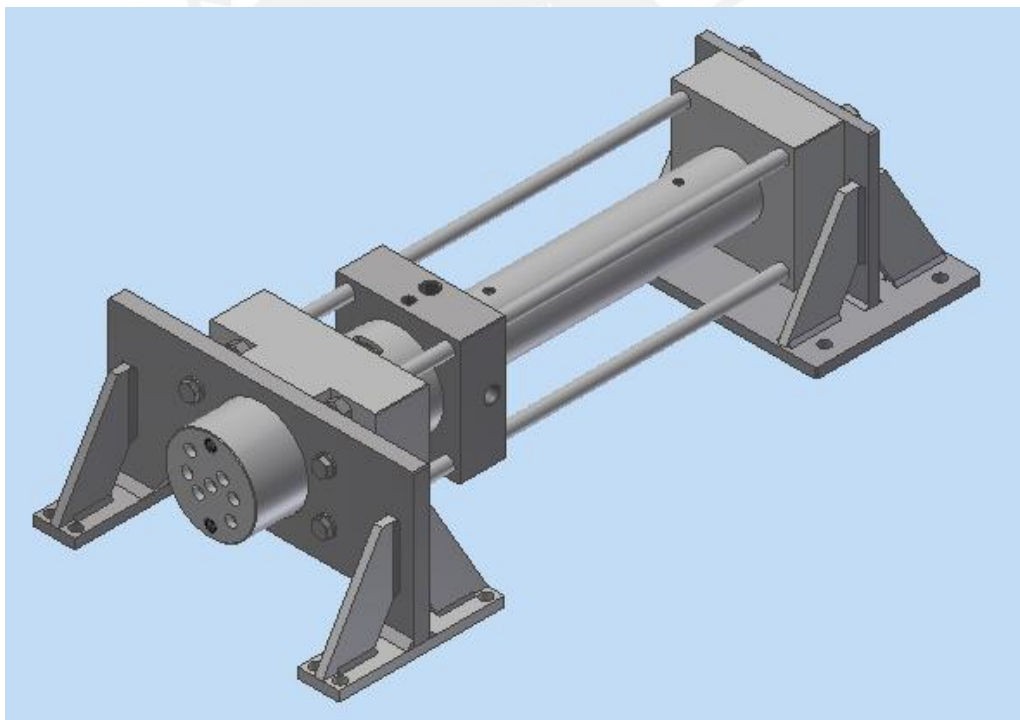


Figura 2.23: Equipo de disparo diseñado

CAPÍTULO 3

INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL

El desarrollo de este capítulo permitirá entender aquellas funciones relacionadas a los sensores, actuadores y control. En un sistema mecatrónico es importante la instrumentación asociada a las funciones del equipo diseñado. Como se mencionó antes, es necesario recopilar datos de velocidades, posiciones y más importante, deformaciones. Este capítulo muestra el método de selección de componentes utilizado. Además en este capítulo se mostrarán las conexiones que deben tener, así como la lógica de funcionamiento del equipo.

3.1 DESCRIPCIÓN SISTEMA DE CONTROL

Debido a la naturaleza de trabajo que va a desarrollar el equipo de laboratorio, es evidente que el sistema de control es secuencial, es decir, se debe controlar que sucedan las cosas en el momento adecuado y en un orden específico pre definido. El único detalle que requiere un control específico es el giro del indentador, el cual funcionará con un método de On/Off. En otras palabras, el giro del indentador se dará hasta que llegue a la posición deseada. En resumen, el sistema de control es secuencial pero dentro de esta secuencia se debe controlar que el indentador llegue correctamente a la posición especificada por el investigador. En la figura 3.1 se muestra una representación del sistema de control propuesto.

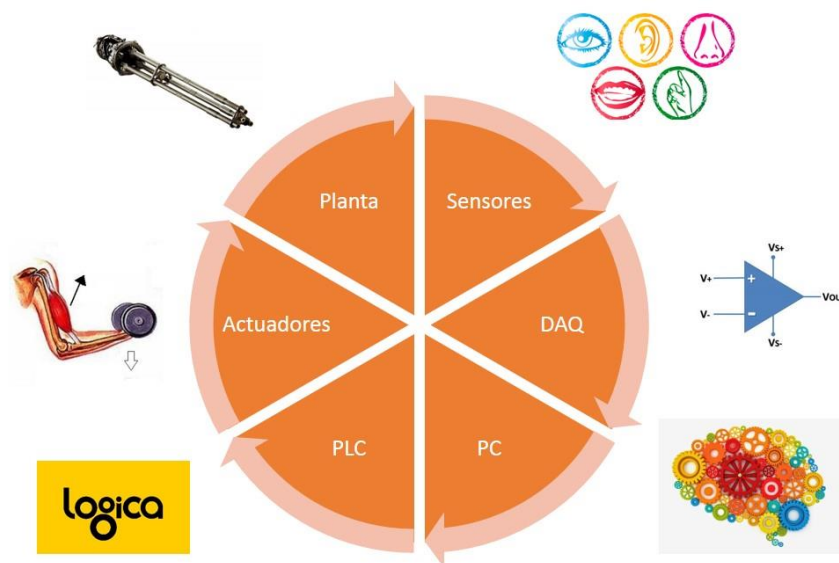


Figura 3.1: Representación del sistema de control

Es importante explicar la representación del sistema de control, donde se encuentran idealizados los elementos principales. Si bien es cierto, la cantidad de sensores y actuadores no queda representada, es posible agruparlos. La DAQ o tarjeta de Adquisición de Datos es uno de los elementos más importantes del sistema planteado. Es una tarjeta que permite acondicionar las señales de los sensores por medio de software, es por ello que funciona con una computadora con el programa Labview. La

elección de la computadora será tratada de manera más detallada líneas adelante. El uso de la DAQ permite conectar cualquier sensor y programar en la computadora la amplificación necesaria así como el proceso de digitalización de las señales. Esto le da una versatilidad bastante amplia en una proyección a futuro si es que se decide aumentar el número de sensores o cambiar los tipos de sensores.

Además se plantea una solución con un PLC (Controlador de Lógica Programable por sus siglas en inglés). El PLC es un dispositivo ampliamente utilizado en la industria para automatizar procesos secuenciales. Se utiliza normalmente para automatizar actividades repetitivas. Tiene la gran ventaja que puede ser programado y es relativamente sencillo de utilizar. En la tabla 3.1 se muestran los criterios que permiten la selección del tipo de PLC. Normalmente el PLC puede actuar de manera independiente de una PC y se pueden colocar los sensores directamente a las entradas del PLC, siempre que estén acondicionadas. Esto se puede evitar utilizando entradas y salidas con valores de voltaje y corriente estándar.

Tabla 3.1: Criterios de selección PLC

Criterio	Detalle
Fuente de Alimentación	Nivel de Tensión
	Potencia admisible
	Frecuencia de la red
	Capacidad de corriente
	Condiciones Ambientales
	Módulos de E/S ³
	Ampliaciones futuras
CPU	Capacidad de memoria
	Tiempo de ejecución
	Cantidad de E/S (Analógicas y Digitales)
	Cantidad de memorias internas
	Cantidad de temporizadores, contadores, etc.
E/S	Cantidad
	Tipo (AC/DC)
	Nivel de Tensión Nominal (V)
	Intensidad de Corriente (mA)
	Temperatura Admisible (°C)

³ Entradas / Salidas

Los niveles de voltaje y corriente de las entradas y salidas del sistema, definen prácticamente la elección del PLC. En otras palabras, es necesario analizar los sensores y actuadores del sistema de manera que se pueda realizar la selección óptima. En la tabla 3.2 se enlistan las entradas y salidas para el equipo.

Tabla 3.2: Análisis de E/S

Tipo	Detalle	Tipo	Total
Sensores	Sensor de velocidad	Digital	6
	Sensor de presencia	Digital	
	Sensor de deformación (2x)	Analógico	
	Sensor de posición (giro del indentador)	Digital	
	Acelerómetro (testigo)	Analógico	
Actuadores	Electroválvula disparo	NA	6
	Electroválvula pre carga	NA	
	Electroválvula retorno	NA	
	Pistón neumático para asegurar giro	NA	
	Motor eléctrico DC	Digital	
	EV limpieza	NA	

La selección de sensores se ha realizado en función de sus valores estándar de salida, especialmente para las entradas analógicas. Normalmente los sensores industriales utilizan el protocolo de variación de corriente con un rango de 4 a 20 mA para representar una magnitud sensada. Este rango es invariante al ruido electromagnético que se puede dar en las instalaciones. Este ruido electromagnético proviene de señales en el ambiente y específicamente en este proyecto, de las vibraciones del impacto.

En lo que respecta a las salidas del PLC, es decir, los actuadores, notamos que la mayoría de señales son para dispositivos electroneumáticos. Dichos dispositivos funcionan activando o desactivando una bobina con cierto valor de voltaje. Hay electroválvulas que pueden ser activadas con corriente alterna (220 VAC) y otras que pueden ser activadas con corriente continua (24 VDC normalmente). Es importante notar entonces, que las salidas del PLC deben poder soportar dichos valores de corriente, por eso se opta por utilizar un PLC con salidas de tipo relé. El relé es un dispositivo electromecánico que funciona como un interruptor. Es un dispositivo usado normalmente en circuitos mecánicos para controlar el flujo de las tensiones de

potencia. Consiste en una bobina que al ser excitada, hace conmutar sus contactores, uno normalmente abierto y otro normalmente cerrado. La figura 3.2 muestra el concepto de salida tipo relé de un PLC.

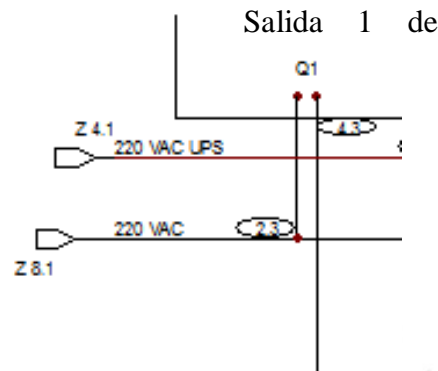


Figura 3.2: Salida tipo relé de PLC

Como se puede observar, la línea de tensión z8.1 entra a la salida Q1 (el nombre difiere entre un PLC y otro) del PLC y continúa hacia el resto del circuito. La lógica de programación es la de cerrar el interruptor Q1 de manera que la corriente proveniente de la línea z8.1 atraviese el PLC y continúe al resto del circuito. Este tipo de salida permite tener varios actuadores de voltajes de accionamiento distintos conectados al mismo mando. Es posible, entonces, cambiar fácilmente de actuador.

3.2 SELECCIÓN DE COMPONENTES DE CONTROL

En la sección anterior se explicó de manera general los criterios y juicios relacionados al sistema de control. En esta sección se muestran los componentes seleccionados, dando a conocer sus virtudes y el grado de cumplimiento con lo previamente explicado. Comenzaremos por el elemento principal, el PLC. Luego explicaremos la selección de la DAQ, la computadora que la acompaña y finalmente la selección de sensores y actuadores.

3.2.1 PLC SELECCIONADO

Tras una investigación detallada de los PLCs disponibles en el mercado, y siguiendo los lineamientos previamente expuestos, se eligió el PLC Siemens S7-1200. Los PLC Siemens, los cuales dominan el mercado nacional, son PLCs del tipo modular, es decir es posible armarlos en función a lo que uno necesita agregando módulos al sistema. Las partes importantes del PLC S7-1200 son el CPU, el módulo integrado de entradas y salidas (tanto digitales como analógicas) y la tarjeta de señales (Signal Board por sus siglas en inglés) referida también como la SB. La SB es un módulo expandible integrado al PLC de manera que se puedan agregar entradas salidas o puertos de comunicación sin aumentar las dimensiones físicas del PLC. En la figura 3.3 se muestra el PLC elegido y se muestran las partes importantes mencionadas.



Figura 3.3: PLC Siemens S7-1200

En la figura 3.3 se puede apreciar el PLC elegido, que se muestra en el extremo derecho de la figura, hacia el lado izquierdo se muestran los módulos expandibles, que pueden

ser entradas y salidas o puertos de comunicación. Existe una amplia variedad para elegir.

3.2.2 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

La tarjeta de adquisición de datos (Data acquisition), también conocida como DAQ es, como antes mencionado, un dispositivo que permite acondicionar y digitalizar las señales de un sensor. Es la interfaz encargada de conectar a los sensores con una computadora PC. La figura 3.4 muestra el concepto de la DAQ.



Figura 3.4: Concepto de funcionamiento de DAQ.

Fuente: National Instruments

La DAQ elegida es el modelo USB-6008 de National instruments. En la figura 3.5 se muestra físicamente la tarjeta y además se presenta las especificaciones técnicas que tiene.



Entradas Analógicas	8 (12 bits , 10KS/s)
salidas analógicas	2 (12 bits a 150 S/s)
E/S Digitales	12 (TTL/CMOS)
Contador	32 bits , 5MHz
Voltaje de Salida	0-5Vdc
Intensidad de Corriente	5mA
Software	LabVIEW

Figura 3.5: DAQ USB-6008 y características técnicas.

Fuente: Guía Laboratorio de Sensores y actuadores PUCP

En páginas anteriores, se mencionó que la DAQ permite conectar cualquier tipo de sensor y es esta característica relevante que hace que este elemento sea uno de los elementos claves del sistema de control. Es posible programar el tipo de acondicionamiento y digitalización para cada sensor por lo que no es necesario tener un circuito de acondicionamiento de señales fijo. Además, el uso de la computadora le da mayor potencia al procesamiento de señales, así como el almacenamiento de datos. Por ejemplo, realizar curvas de tendencia, ordenamiento de datos, etc.

La empresa National Instruments (NI) proporciona una guía bastante completa acerca de sus tarjetas de adquisición de datos. Dicha guía busca orientar a los usuarios acerca de la manera correcta para conectar distintos tipos de entradas y salidas a la DAQ así de cómo realizar la configuración interna para el tipo de sensor, demostrando su versatilidad. En la figura 3.6 se muestra el menú de opciones de la DAQ donde se nota claramente todas las entradas que son posibles de configurar solo ingresando los datos del sensor utilizado. [National Instruments,2015]

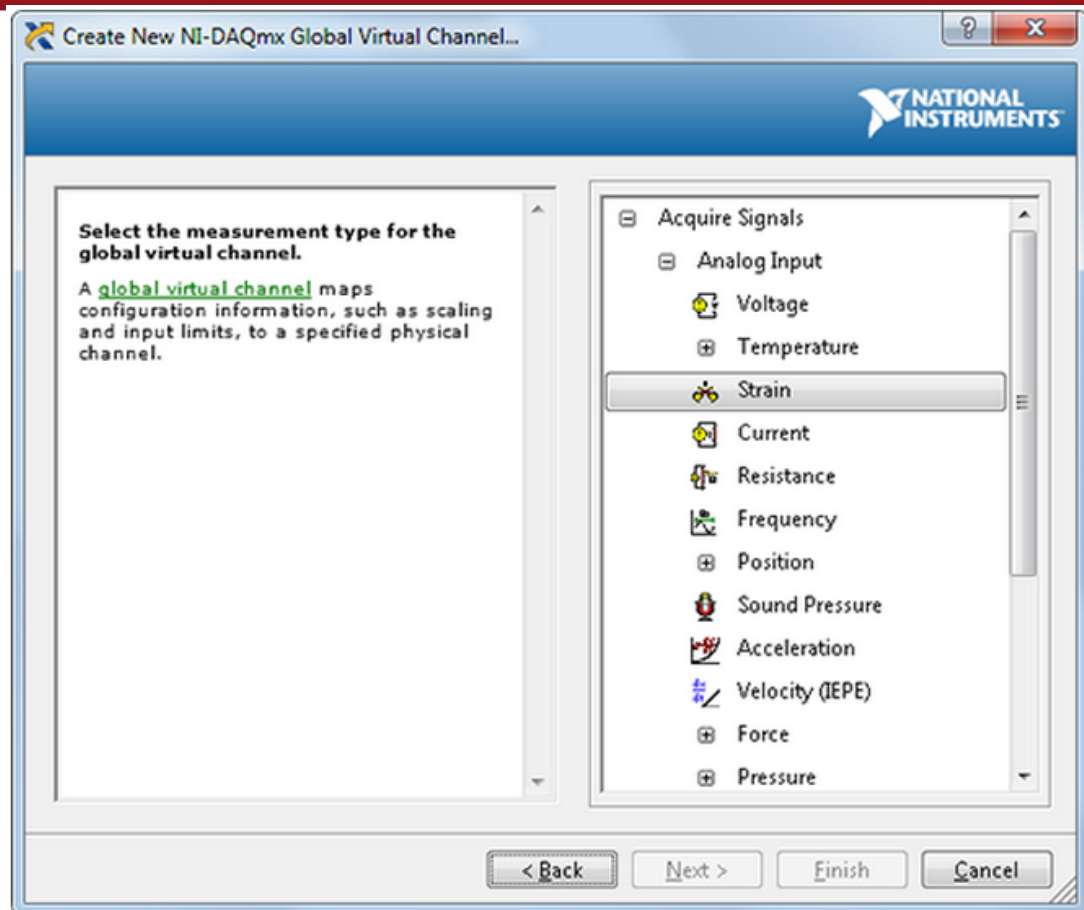


Figura 3.6: Menú configuración puertos DAQ.

Fuente: National Instruments

3.2.3. COMPUTADORA PC

La computadora permite programar el acondicionamiento de señales, el tratamiento, almacenamiento y exhibición de datos. Cada una de las facetas mencionadas es modificable por el investigador y, utilizando la potencia de un computador, es posible evaluar mayor cantidad de datos. En la siguiente tabla 3.4 se presentan los requisitos necesarios para los programas de software más relevantes para el equipo de laboratorio.

Tabla 3.3: Requisitos de PC según software relevante

Programa	RAM	Espacio necesario en Disco Duro	Procesador	Tarjeta de Video	Sistema Operativo
Lab View	1 GB	5 GB	Pentium 4/M (o superior)	N/A	Hasta Windows 8
Matlab	2 GB	5 GB	Cualquier Intel o AMD 64 bits	1 GB integrada (recomendación)	Hasta Windows 8
Tia Portal (PLC Siemens)	2 GB	N/A	Core i5, 2.4 Ghz	N/A	Windows 7
Office 2013	1 GB	3 GB	64 bits a 1GHz o superior	1 GB integrada (recomendación)	Hasta Windows 8

Los requisitos mostrados son requisitos que la mayoría de las computadoras modernas cumplen. De igual manera se prevé una PC con suficiente capacidad para tener mayor cantidad de programas relevantes, como por ejemplo, programas de estadística o el programa Wolfram Mathematica, etc. Por lo tanto, la computadora propuesta para el año 2015 es la HP ProBook 655.

3.2.4. SENSORES

La tabla 3.2 muestra la lista de todos los sensores necesarios para el proyecto de tesis, esto incluye los sensores con salidas digitales y analógicas. Como se mencionó, es recomendable utilizar sensores con salida de protocolo de comunicación de 4 – 20 mA de corriente. Este protocolo es conocido como protocolo HART. La mayoría de los sensores industriales que manejan salidas analógicas, se encuentran en dichos valores de corriente. En el presente proyecto de tesis, existen tres sensores que entran en la categoría de magnitudes analógicas. El acelerómetro que se encontrará en el testigo de roca y las galgas extensiométricas (2) que medirán la deformación en el indentador. En esta sección se seguirá el orden establecido en la tabla 3.2.

3.2.4.1 SENSOR DE VELOCIDAD DE MARTILLO

En lo que respecta al sensor de velocidad, se ha elegido un método indirecto de medición. Esto quiere decir que se va a calcular la velocidad a partir del tiempo de activación entre dos sensores y la distancia conocida que los separa. Esto quiere decir que es necesario tener dos sensores para conocer la velocidad del martillo. Después de un estudio del mercado, se optó por utilizar sensores inductivos para dicha medición. La figura 3.6 muestra el concepto de medición. En la figura 3.7 se muestra la progresión del martillo y cómo al momento de llegar a los sensores, se activan sus salidas (funcionando como normalmente abierto). Esto quiere decir que las señales que se obtienen de los sensores, se pueden considerar como entradas digitales para el sistema de control, dado que cada sensor funciona en un estado ON u OFF.

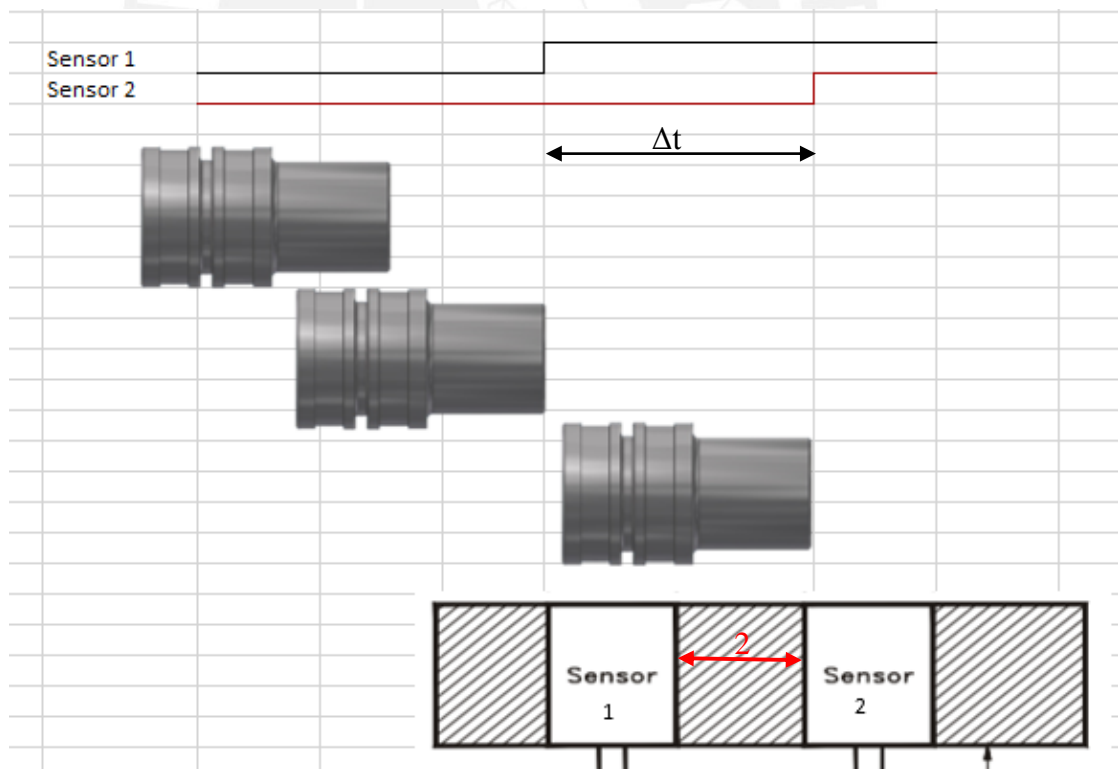


Figura 3.7: Esquema sensado de velocidad

En la figura 3.7, Δt representa la variación de tiempo entre el primer disparo y el segundo y $2D$ representa la separación entre los sensores. Esta distancia $2D$ es conocida y recomendada por el fabricante, de tal manera que se puede inferir la velocidad por medio de la relación 3.1.

$$\text{Velocidad del Martillo} = \frac{2D}{\Delta t} \dots\dots\dots 3.1$$

Los sensores inductivos, también conocidos sensores de presencia, detectan la presencia de materiales ferrosos. Trabajan bajo el concepto de inducción magnética. El sensor emite un campo magnético que varía con la presencia de un elemento ferroso como el acero. Cuando dicha variación llega a un umbral, el sensor permite (cierra el circuito) o impide (abre el circuito) el flujo de corriente. Líneas abajo se aborda el tema de las conexiones electrónicas para los sensores inductivos. En la figura 3.8 se muestra un sensor inductivo.



Figura 3.8: Sensor Inductivo.

Fuente: Catálogo Fotek

Existen dos tipos de cubiertas para los sensores inductivos, uno con cubierta cuadrada y otro con cubierta cilíndrica. La ventaja de los sensores de cubierta cilíndrica es que es posible colocarlos y asegurarlos a una estructura por medio de roscas normalizadas y así medir directamente la presencia del martillo. Debido a que los sensores inductivos trabajan con campos magnéticos, se debe elegir el área de sensado, existen sensores inductivos cuya área de sensado está restringida de manera que no haya interferencia

entre dos sensores contiguos, se conocen como sensores con blindaje. La figura 3.9 muestra los dos tipos de sensores. En la figura 3.7 se puede observar el montaje recomendado por el fabricante para sensores blindados, ambos sensores son cilíndricos con un diámetro D separados una distancia de $2D$.

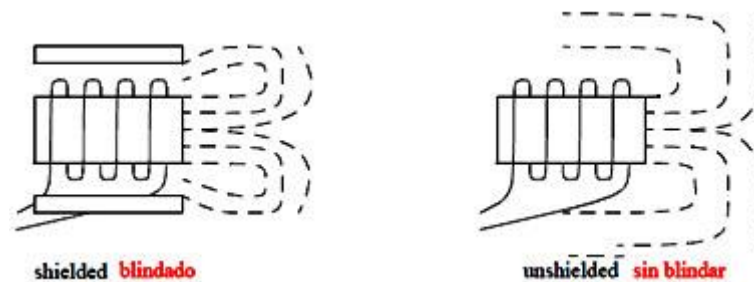


Figura 3.9: Blindaje de sensores inductivos.

Fuente: Tecnoficio

Además, los sensores inductivos se dividen, electrónicamente, en dos clases, uno con salida NPN, conocido como colector abierto, y otro con salida PNP, conocido como emisor abierto. El sensor elegido es el PNP pues las entradas de la DAQ tienen una restricción de voltaje de entrada máximo de 5v. La figura 3.10 muestra la conexión que debe tener el sensor, donde la tarjeta de adquisición de datos (o el dispositivo de control) es la carga denominada “Load”. El sensor elegido es el sensor PM12-08N de la marca Fotek. El modelo elegido tiene rosca métrica M12 y una distancia de detección (S_n) de 8 mm.

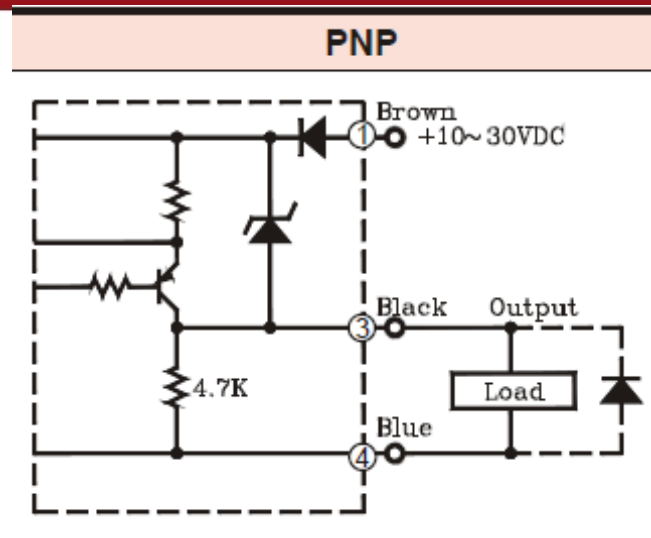


Figura 3.10: Conexión de sensor tipo PNP.

Fuente: Catálogo Fotek

3.2.4.2 SENSOR DE PRESENCIA (RETORNO DEL MARTILLO)

El sensor de presencia permite al sistema saber que el martillo se encuentra en la posición inicial, es decir, la posición con la mayor carrera posible. Esto implica que el martillo ha retornado y está preparado para el siguiente disparo. Para ello se utilizará también un sensor inductivo, pero con otra distancia de detección de 4mm y con salida NPN. De igual manera es un sensor blindado para evitar que se realice un sensado incorrecto. En la figura 3.11 se muestra la posición del sensor con respecto al martillo dentro del cañón de disparo.

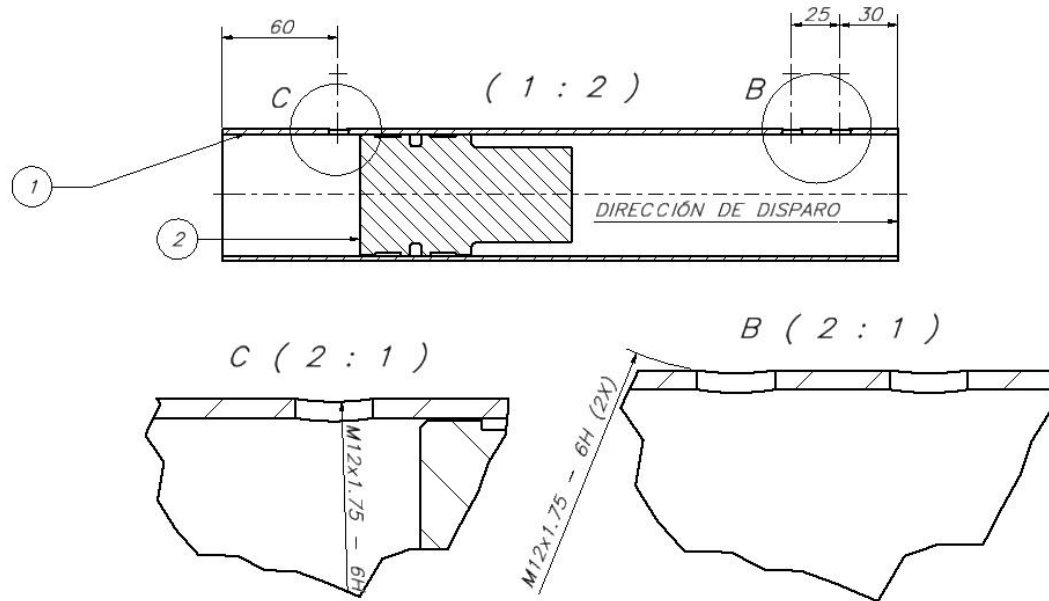


Figura 3.11: Posición Orificios para sensores inductivos

3.2.4.3 SENSOR DE DEFORMACIÓN

Los sensores de deformación más conocidos y comerciales son las galgas extensiométricas. El principio de funcionamiento es relacionar la deformación lineal que se presenta en el indentador en el momento del impacto con un cambio proporcional de una resistencia eléctrica.

La empresa National Instruments proporciona una guía paso a paso para conectar distintos tipos de sensores. Incluye una sección dedicada a la conexión de galgas extensiométricas a la tarjeta DAQ, así como la metodología para configurar la entrada. En la figura 3.12 se muestra la conexión recomendada por el fabricante de la tarjeta DAQ.

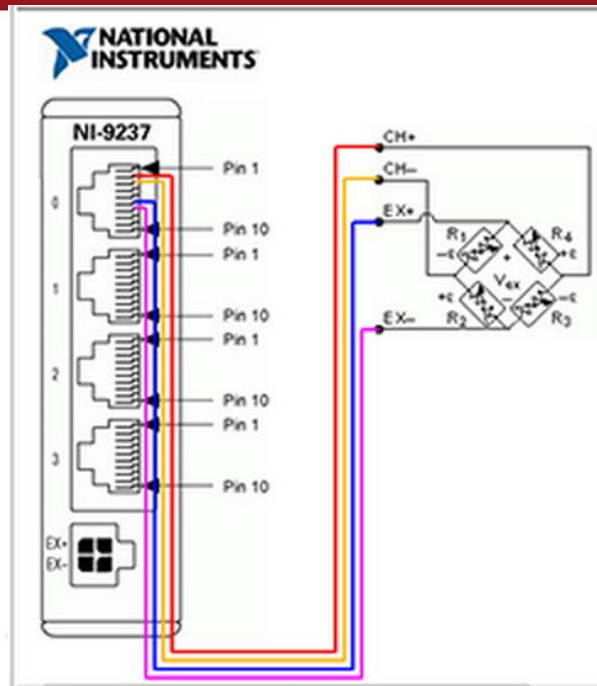


Figura 3.12: Conexión Galga Extensiométrica.

Fuente: National Instruments

La conexión de una galga extensiométrica a cualquier dispositivo de sensado necesita de un dispositivo llamado puente wheatstone, el cual se muestra en la figura 3.13. Dicho puente tiene un voltaje de entrada V_s y al menos una resistencia variable. En el presente trabajo se eligió un puente de un cuarto de ala, lo que significa que solo la resistencia R_3 es variable (galga extensiométrica). Se dice que el puente se encuentra balanceado cuando el voltaje V_{out} es igual a cero. La deformación presente en la galga genera un cambio en la resistencia con lo cual aparece un voltaje V_{out} proporcional a la deformación y es leída de manera diferencial por la tarjeta DAQ [Electronics Tutorial, 2015].

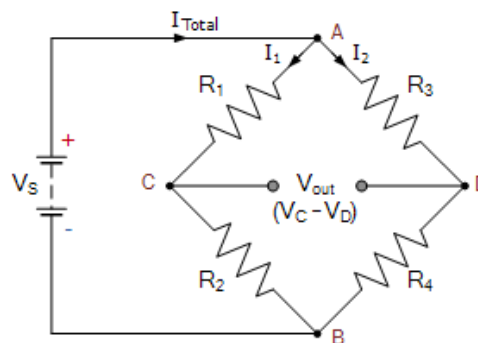


Figura 3.13: Puente Wheatstone. . Fuente: Electronics Tutorial

3.2.4.4 SENSOR DE POSICIÓN

El sistema de giro planteado se realiza por medio de un motor eléctrico DC con encoder y debido a que el par motriz no se encuentra localizado directo en el indentador, es necesario asegurar que el giro sea el correcto. Esto significa que el indentador debe tener un sensor de posición angular que realimente al sistema de control el giro efectivo del indentador y detenga el movimiento en el punto adecuado. Para ello se plantea un sistema de sensado utilizando un giroscopio. Los giroscopios son sensores inerciales que permiten sensar la velocidad angular del elemento al que es solidario. El sensor elegido es el sensor TL618C-050 de la marca Rion. Dicho sensor es de un solo eje y tiene salida con protocolo 4-20 mA, resistencia especial al impacto y sensibilidad de hasta 0.1°/seg. En la figura 3.14 se muestra el sensor. Es importante recalcar que dicho sensor debe estar acoplado al indentador y es necesario diseñar y fabricar una pieza hecha a la medida.



Figura 3.14: Giroscopio TL618C-050.

Fuente: Catálogo Rion

3.2.4.5 ACELERÓMETRO

Tras una búsqueda de sensores industriales en el mercado peruano, se llegó a la selección del acelerómetro SKF CMPT 2310. La empresa SKF ofrece una guía de selección para sus sensores. En esta guía de selección, se clasifican los sensores según

el sector en la industria donde más se utilizan. Debido a que parte primordial del equipo de laboratorio es el impacto, se eligió un grupo de sensores para la industria de “minería, de procesamiento de materiales y cemento”. Estos sensores tienen la particularidad de tener una excelente resistencia al impacto y tienen una cubierta para proteger el sensor de cualquier proyectil que se pueda desprender de la roca. [SKF,2015] En la figura 3.15 se muestra el sensor elegido.

CMPT 2310

Accelerometer for mining industry, integral, braided cable, side exit

The CMPT 2310 is a physically rugged accelerometer optimized for use in heavy-duty environments in the following industries:

- Mining
- Mineral Processing
- Cement

In these industries, dust, mud and flying debris are commonplace, together with low rotational speeds. When used on shakers and screens, the accelerometer must also withstand high levels of continuous and random vibration. The sensor uses an integral cable with stainless over-braid for mounting where protective conduit is not available.



Specifications

Specifications conform to ISA-RP-37.2 (1-95) and are typical values referenced at 24 °C (75 °F), 24 V DC supply, 4 mA constant current and 80 Hz.

Figura 3.15: Acelerómetro SKF CMPT 2310.

Fuente: Catálogo SKF

3.2.5 ELEMENTOS NEUMÁTICOS

En el capítulo anterior se mencionó y describió el sistema neumático a utilizar. En el presente capítulo se expondrán los dispositivos seleccionados en función de su disponibilidad en el mercado y las especificaciones técnicas. Dentro de las especificaciones técnicas se tiene la presión nominal de trabajo, el voltaje nominal de trabajo de las bobinas en las electroválvulas, caudales y roscas normalizadas. En el mercado nacional se cuentan con casi todas las electroválvulas necesarias, excepto la válvula de alto caudal para realizar el disparo. Como se mencionó anteriormente, las salidas del PLC son de tipo relé por lo que permiten elegir los valores nominales de voltaje que activan las bobinas. Se eligen bobinas de 220 VAC.

3.2.5.1 ELECTROVÁLVULA DE DISPARO

Así como el diseño que realizó el Ing. Geu, se elige la electroválvula Norgren prospector poppet valve con código EA025C-AA, cuyas características principales son: caudal muy elevado, elevada fiabilidad, presiones de 2 a 10 bar para pilotaje eléctrico y bobina de 220 VAC. El caudal máximo es de 5,717 l/min. Su conexión es de G ¾. La figura 3.16 muestra la electroválvula elegida.



Figura 3.16: Electroválvula Norgen de alto caudal.

Fuente: Geu 2004

3.2.5.2 CILINDRO NEUMÁTICO

Como se ha mencionado anteriormente, el sistema de giro planteado tiene la facultad de replegarse durante el impacto, esto se logra por medio de un cilindro neumático. El cilindro neumático elegido es de la serie P1D-S040MS-0100 de la marca Parker. Es un cilindro robusto con la capacidad de levantar hasta 16 kg. Tiene 32 mm de diámetro y una carrera de 100 mm, lo que lo hace un cilindro compacto y efectivo. Tiene la gran ventaja de tener un pistón magnetizado y la preparación necesaria para la colocación

de un sensor de proximidad para detectar su posición. La figura 3.17 muestra el cilindro elegido.



Figura 3.17: Cilindro neumático Parker.

Fuente: Catálogo Parker

3.3 SISTEMA ELÉCTRICO/ELECTRÓNICO

El sistema eléctrico comprende todas las conexiones físicas entre los sensores, los dispositivos de control y los actuadores. Cabe resaltar que si se utiliza la tarjeta DAQ, no es necesario que el PLC reciba los datos de los sensores analógicos, pues estos se almacenan directamente en la PC para ser visualizados o utilizados eventualmente. La figura 3.18 muestra en forma de esquema las conexiones. En este capítulo se mostrarán los diagramas eléctricos del sistema, luego se mostrarán los actuadores eléctricos seleccionados para el sistema de giro y finalmente en esta sección se mostrará la lógica de control del sistema.

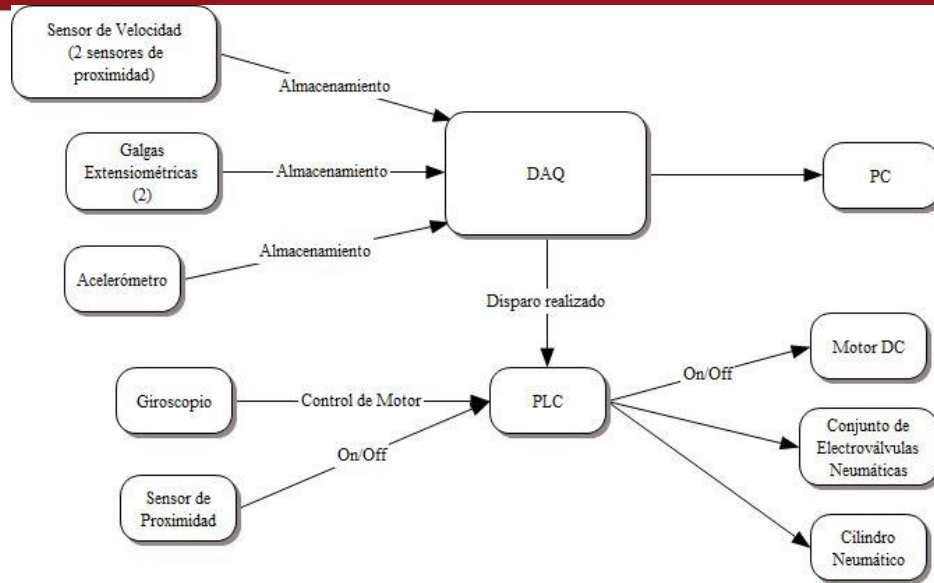


Figura 3.18: Esquema de conexiones

Las figuras 3.19, 3.20 y 3.21 muestran las conexiones eléctricas necesarias para el equipo de laboratorio. La primera figura muestra las conexiones a las entradas del PLC, la segunda muestra las salidas del PLC y finalmente la conexión entre los sensores y la tarjeta DAQ. La tabla 3.4 muestra el código de color utilizado en los diagramas. En el anexo E se encuentra también el diagrama de conexiones P&ID según la norma ISA S5.1.

Tabla 3.4: Código de color esquemas eléctricos

Color	Significado
Rojo	Voltaje DC (+24 ò +5 según indicado)
Negro	Conexión a tierra (GND)
Guinda	Línea de voltaje AC (L)
Azul	Línea de voltaje AC (N)

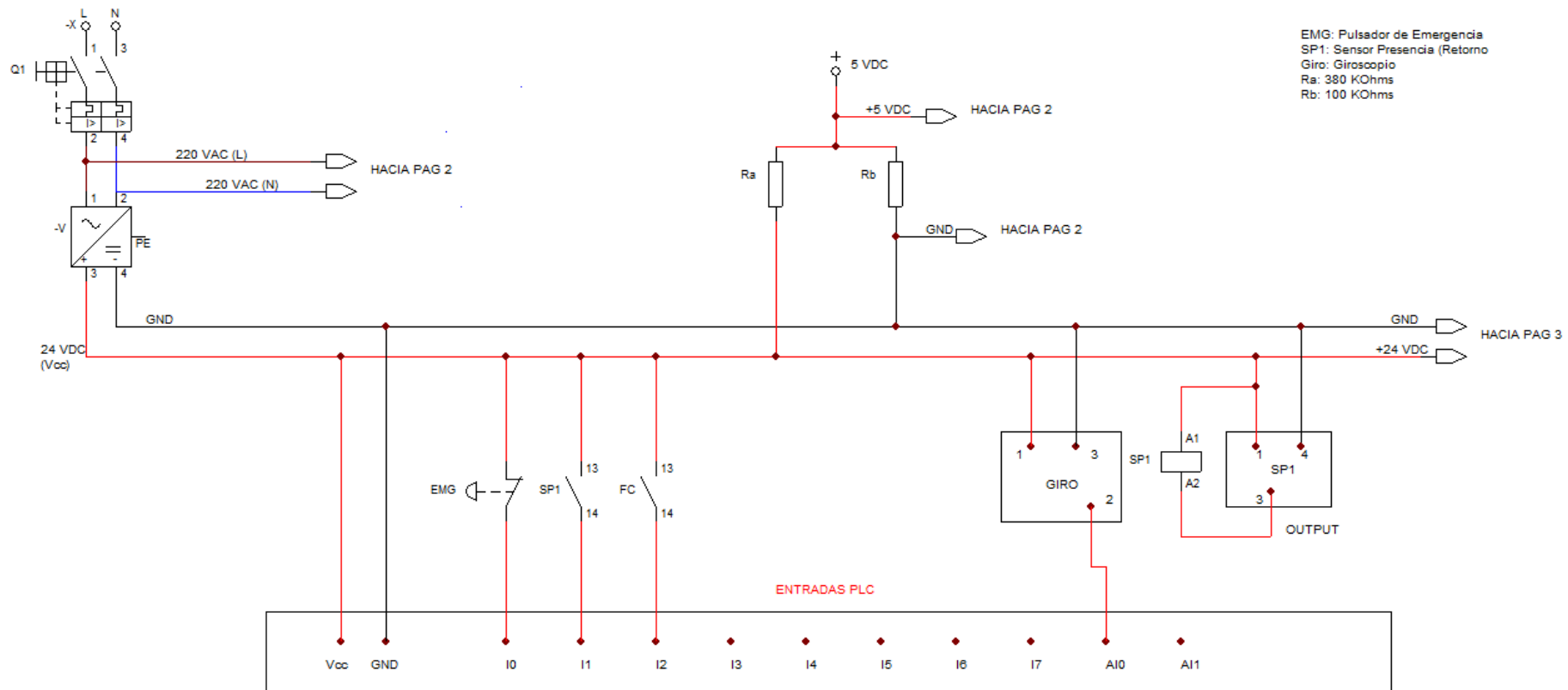


Figura 3.19: Diagrama de conexiones entradas a PLC

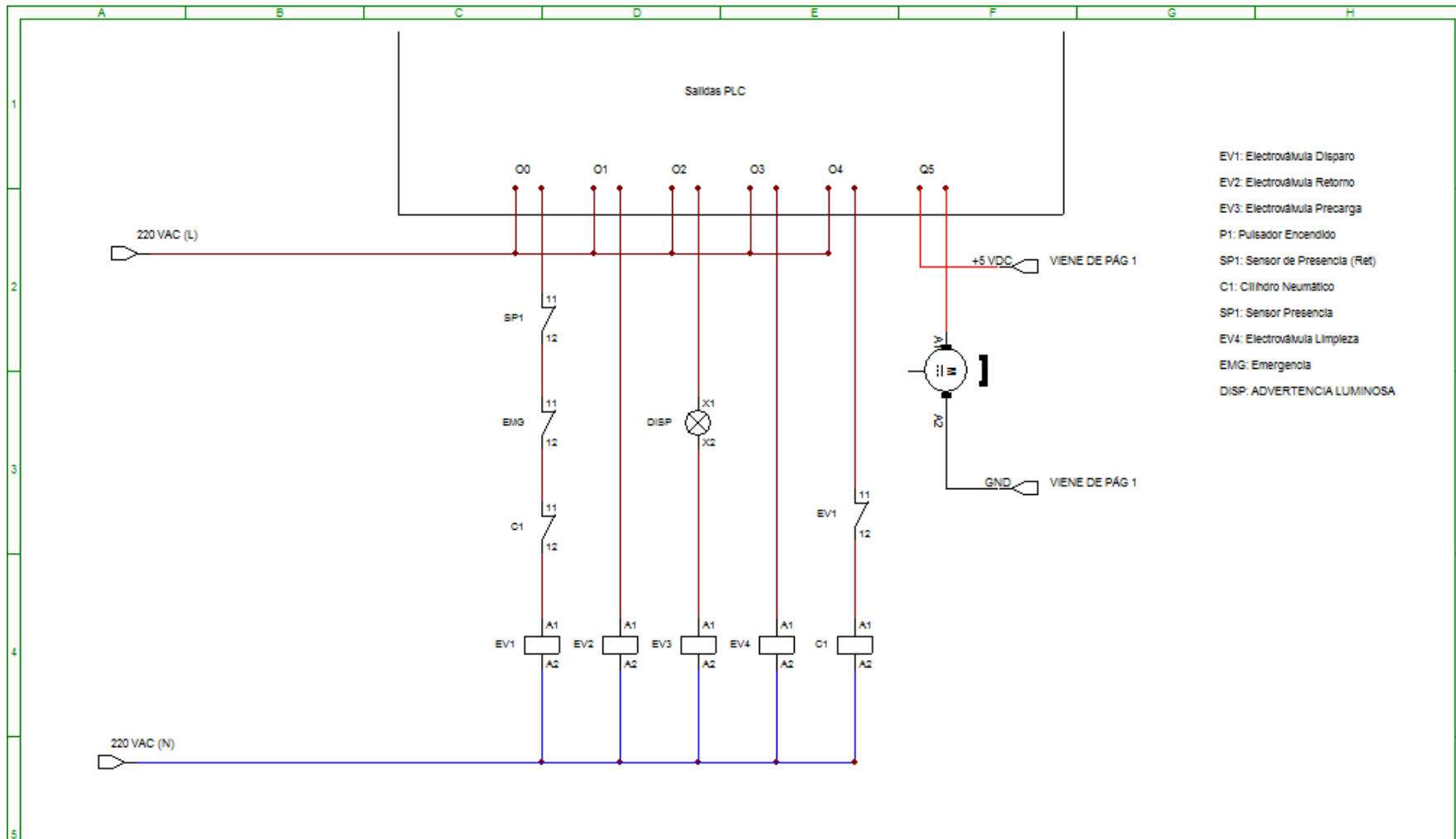


Figura 3.20: Diagrama de conexiones salidas de PLC

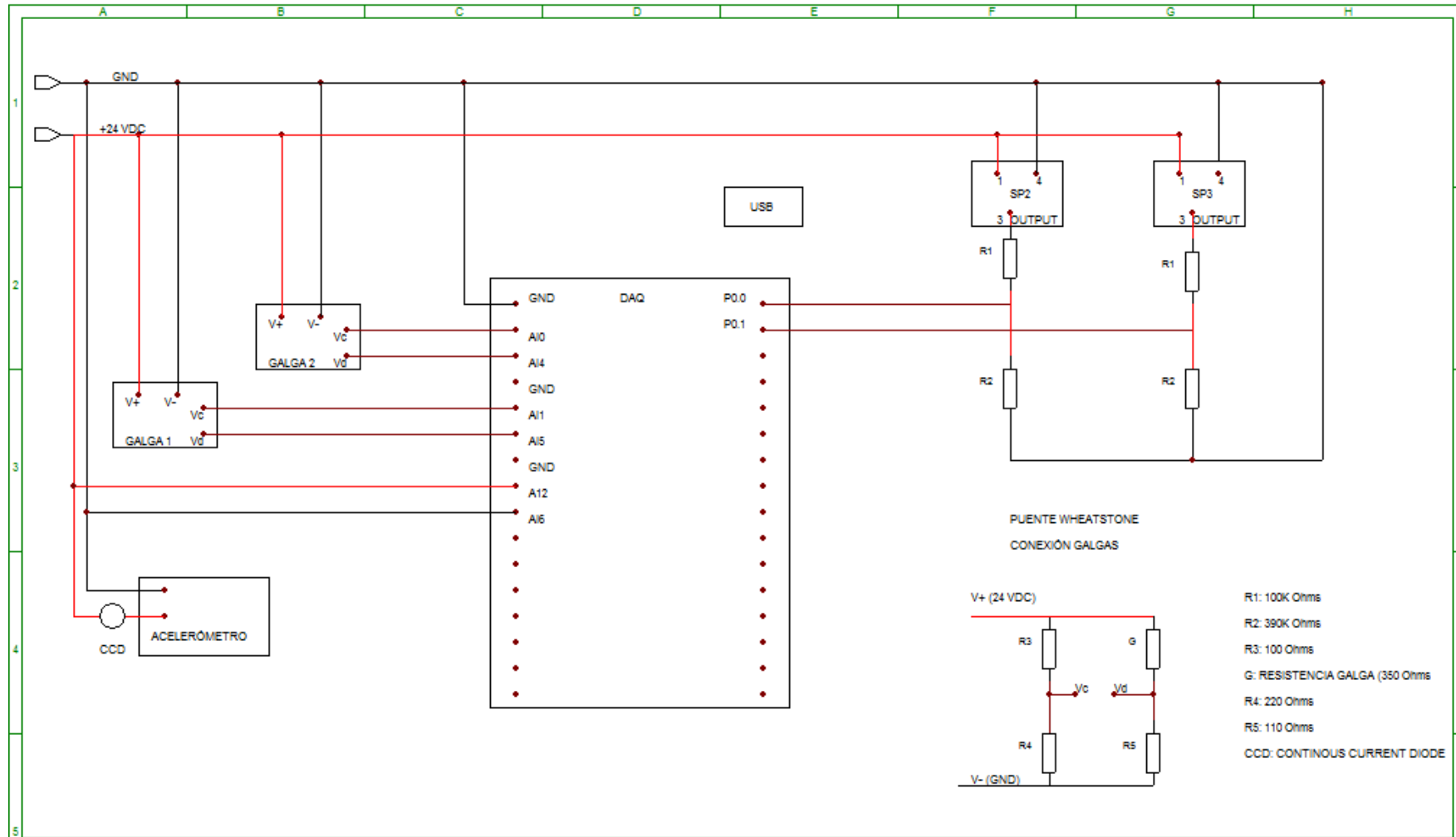


Figura 3.21: Diagrama de conexiones DAQ

3.3.1 MOTOR DEL SISTEMA DE GIRO

En el anexo C.4 se muestra los cálculo inerciales necesarios para poder girar el indentador. Para mover el indentador es necesario aplicar un torque mayor a 12 kg cm. Cabe recalcar que el cálculo comprende un factor de seguridad de 2. Se eligió un motor eléctrico de la marca Pololu 227:1 Metal Gearmotor 25Dx56L mm cuyo torque nominal es 15.8 kgcm; esto es 30% mayor al torque necesario. Además consume 0,48 W de potencia. Es un motor de alto toque debido a la caja de reducción de acero. El eje es de 4mm de diámetro y es en forma D. En la figura 3.22 se muestra el motor elegido.



Figura 3.22: Motor DC Pololu MetalGearbox 227:1

3.3.2 LÓGICA DE CONTROL

Ya se había discutido acerca de la naturaleza del control secuencial necesario para este equipo. Así pues, se presenta la secuencia para realizar el ensayo. Se asume lo siguiente, el martillo está en su posición inicial, todos los dispositivos se encuentran debidamente conectados y listos para operar, hay suficiente aire comprimido como para realizar los ensayos, se valida que no haya emergencia continuamente. En la figura 3.23 se puede apreciar la lógica de control para el equipo diseñado.

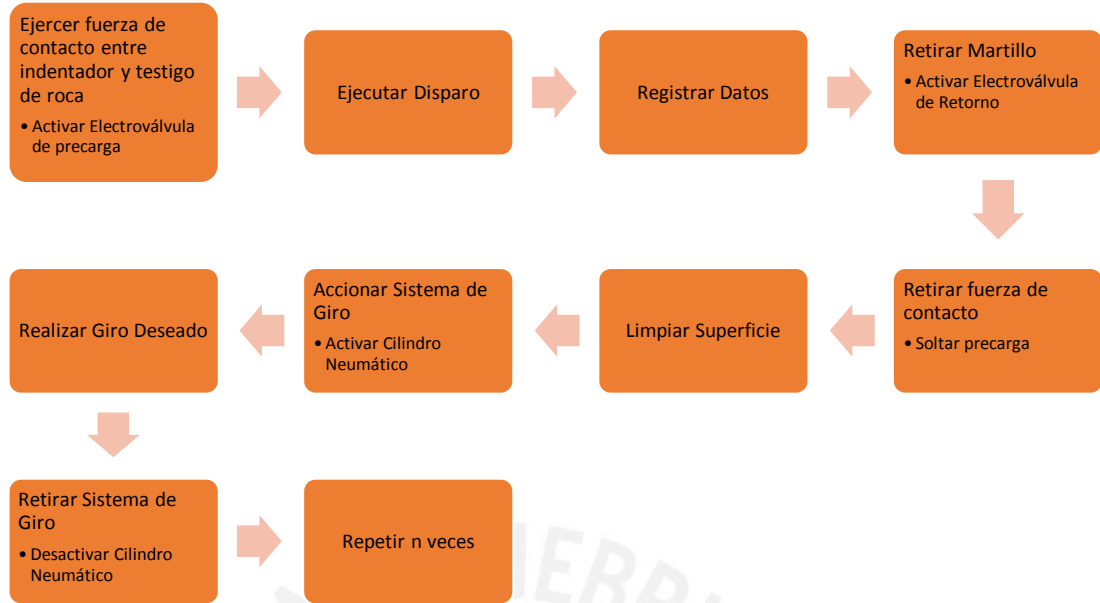
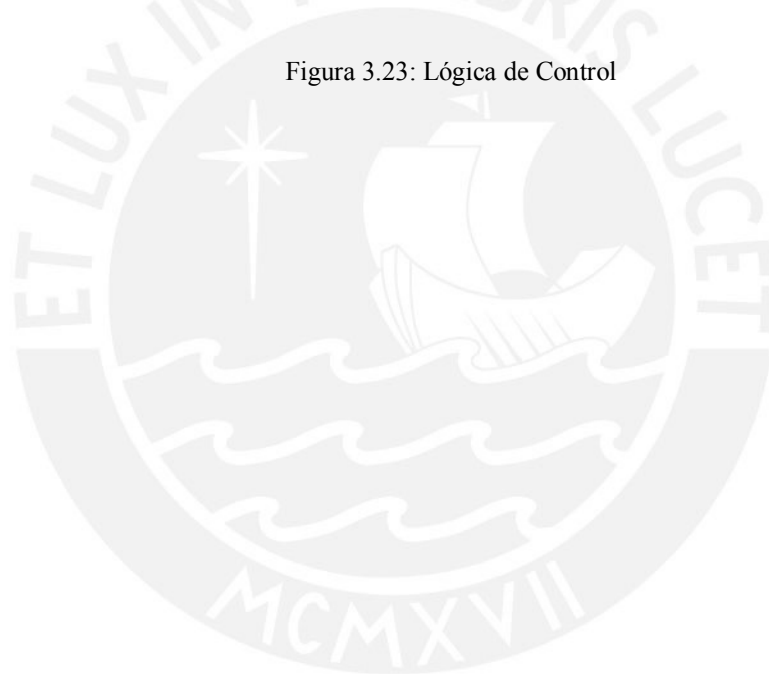


Figura 3.23: Lógica de Control



CAPÍTULO 4

PLANOS Y COSTOS DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

En este capítulo se muestra la relación de los planos de despiece y ensamble del equipo que se encuentran anexados al trabajo de tesis. En la tabla 4.1 se muestra la relación de planos correspondientes. El código seleccionado para la identificación de planos denota las siguientes características: el tamaño de hoja utilizado, tipo de plano y número de plano. El formato presentado es: (tamaño de hoja normalizado).(tipo de plano)(número de plano).

Además, este capítulo aborda un tema importante en la ingeniería, esto es la estimación del costo del proyecto, en otras palabras se cotizan los costos de diseño y fabricación para conocer el nivel de inversión que se requiere para llevar a cabo un proyecto como el presentado en esta tesis. Es importante mencionar que los precios de los componentes seleccionados pueden variar dependiendo de la disponibilidad del mercado, el tipo de cambio y las ofertas que se puedan encontrar (especialmente en los

equipos de cómputo y control). Gran parte del diseño previamente expuesto se ha basado en la disponibilidad del mercado y se ha tratado, en la medida de lo posible, que todos los componentes sean de fácil acceso en el mercado local. En este capítulo se mostrará en detalle los costos tanto de fabricación como los costos pertenecientes a la compra de dispositivos seleccionados. La estructura de costos se muestra en la figura 4.1. Asimismo en la tabla 4.7 se muestra el costo total del equipo, que posteriormente será detallado en cada sección de este capítulo.

Tabla 4.1: Relación de Planos

Planos		
Núm	Concepto	Código
1	BRIDA POSTERIOR	A3.D001
2	CILINDRO DE DISPARO	A4.D002
3	MARTILLO DE IMPACTO	A3.D003
4	BRIDA INTERMEDIA	A2.D004
5	INDENTADOR DE IMPACTO	A3.D005
6	CILINDRO Y BOCINA DE PRECARGA	A2.D006
7	PISTÓN DE PRECARGA	A3.D007
8	BRIDA DELANTERA	A2.D008
9	TENSADOR	A4.D009
10	SOPORTE POSTERIOR	A1.D010
11	SOPORTE DELANTERO	A1.D011
12	COMPONENTES VARIOS SISTEMA GIRO	A3.D012
13	RUEDA	A4.D013
14	DESPIECE MESA	A3.D014
15	PORTA TESTIGO	A2.D015
16	ENSAMBLE EQUIPO	A1.E001
17	SUBENSABLE CAÑÓN DE DISPARO	A1.E002

Leyenda	
AX	Tamaño de hoja
D	Despiece
E	Ensamblaje
C	Esquema eléctrico/electrónico
YYY	Número de plano

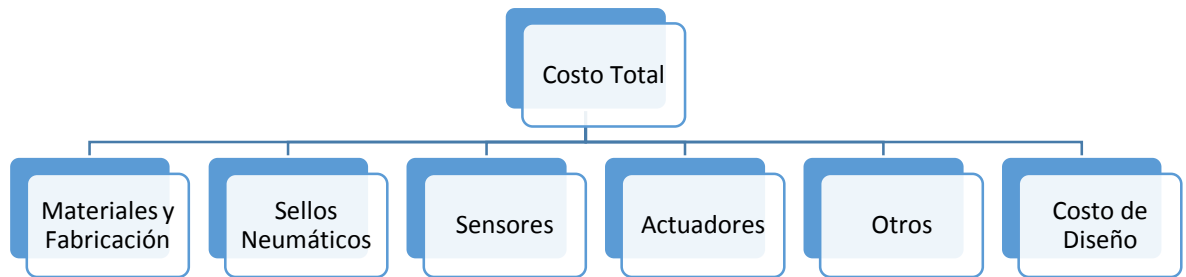


Figura 4.1: Estructura de Costos

4.1 COSTOS DE MATERIAL Y FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS MECÁNICOS

En la tabla 4.2 se muestra en detalle el costo de material y fabricación del equipo, descrito por elemento. Los costos de fabricación fueron estimados en el taller de manufactura de la PUCP.

Tabla 4.2: Costos de componentes Mecánicos

Ítem	Cantidad	Comentarios	Material	Precio (S./)
Brida trasera	1	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	AISI 1045	211.00
Cilindro de Disparo	1	Según dimensiones ISO 3320	OVAKO 280	117.00
Martillo	1	Según sellos neumáticos comerciales (basados en la norma ISO 3320 y CETOP RP 51 P)	CRYODUR 2510	74.00
Brida Intermedia	1	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	AISI 1045	211.00
Piston de Precarga	1	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	AISI 1045	12.00
Cilindro pre carga	1	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	OVAKO 280	28.00
Bocina de Precarga	1	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	AISI 1045	10.00
Brida Delantera	1	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	AISI 1045	356.00
Cojinete SKF PWM	1	Según catálogo SKF	COMPUESTO	541.00
Indentador	1	Diseño nuevo	CRYODUR 2510	467.00
Tensadores	4	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	AISI 1045	112.00
Tuercas y arandelas tensadores	4	Diseño basado en el diseño del Ing. Geu y ajustado a las dimensiones nuevas	Según norma	20.00
Mano de Obra				1,948.00
Total (S./)				3,891.00

4.2 COSTOS SELLOS NEUMÁTICOS

En la tabla 4.3 se muestra en detalle los sellos neumáticos utilizados en el diseño. Cabe mencionar que el precio es por grupo de sellos (kit). Se realizó la cotización en la empresa Machen

Tabla 4.3: Costos de sellos neumáticos

Ítem	Cantidad	Comentarios	Material
Sello de velocidad OA	1	Marca Parker	PTFE Carbon+ NBR
Banda guía F2	4	Marca Parker, con distintas medidas (Martillo, pistón de precarga e indentador)	PTFE Carbon
Sello pistón OR	1	Marca Parker (brida intermedia e indentador)	PTFE Carbon + NBR
O ring	3	Marca Parker, con distintas medidas (Cilindro impacto y cámara de precarga)	NBR 70
Total (s./)			201.00

4.3 COSTOS SISTEMA DE CONTROL

En la tabla 4.4 se puede apreciar el costo de implementación del sistema de control. Los precios de los ítems indicados fueron hallados online y no incluyen costos de traslado y otros como desaduanaje.

Tabla 4.4: Costo de sistema de control

Ítem	Cantidad	Comentarios	Precio (S./)
PLC	1	Siemens S7-1200	1,027.00
Expansiones E/S	1	Siemens Signal Board 1231 (1 entrada analógica adicional)	263.00
Expansiones E/S	1	Siemens Signal Module 1231 (4 entradas y salidas analógicas adicionales)	1,290.00
DAQ	1	NI USB-6008 (Online)	682.00
PC	1	HP ProBook 655	1,500.00
Fuente de Alimentación	1	Fuente 220 VAC/ 24 VDC.Delta 5A	173.00
Total (S./)			4,933.00

4.4 COSTOS DE SENSORES

En la tabla 4.5 se muestra en detalle los costos de los sensores planteados. Cabe mencionar que el precio tan elevado se debe al sensor SKF de muy alta precisión que, además, es un producto de importación. Por otro lado, el giroscopio también es un producto de importación y es un sensor preciso y resistente al impacto.

Tabla 4.5: Costos de Sensores

Ítem	Cantidad	Comentarios	Precio (s./)
Galga de extensión	2	Analógico	190.00
Sensor de velocidad	1	Se puede considerar digital como 0 y 1	170.00
Acelerómetro	1	Analógico	6,948.00
Sensor de proximidad	1	Digital	60.00
Giroscopio (Giro)	1	Analógico	1,061.00
Total (S./)			8,427.00

4.5 COSTOS DE ACTUADORES

En la tabla 4.6 se muestra el detalle los actuadores necesarios y los costos asociados.

Tabla 4.6: Costos de actuadores

Ítem	Cantidad	Comentarios	Precio (s./)
Actuadores			
Electroválvula Disparo	1		
Electroválvula Retorno	1	Electroválvula 3/2 con rosca G1/2. Marca Festo	850.00
Electroválvula Precarga	1	Electroválvula 3/2 con rosca G1/4. Marca Festo	330.00
Pistón neumático	1	Pistón $\phi 40 \times 100$. Marca Parker	554.90
Válvula manual Apagado	1	Válvula de paso	40.00
Unidad FRL	3	Presión de 0-16 bar. Marca Festo	1,950.00
Válvula reguladora de caudal	1	Regulador de flujo	25.00
Manómetro	1	Manómetro con glicerina	50.00
Motor DC	1	Motor DC Pololu	155.00
Total (S./)			3,954.90

Finalmente se muestra la tabla 4.7 mencionada al principio del capítulo. Esta representa el costo total de implementar el diseño planteado.

Tabla 4.7: Costos Totales de Equipo

Equipo	Subtotal
Componentes Mecánicos	3,890.29
Componentes Neumáticos (Sellos)	201.19
Sensores	8,426.59
Actuadores	4,853.90
Control	4,932.96
Misceláneo	231.00
Reserva	5% del total
Total	22,535.93

OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

El diseño del indentador muestra nueve orificios y solamente se utilizan dos orificios simultáneamente. Este hecho puede despertar la duda de que si el resto de orificios pueden afectar el golpe, debido a que son un cambio de geometría innecesario. Por ello, para responder esta incógnita, se estudió la geometría de los indentadores que se encuentran en el mercado. En la figura OR.1 se muestra un indentador proporcionado por la empresa Química Suiza Industrial. En la figura se puede notar que los indentadores comerciales, tienen orificios que no son utilizados por lo que el diseño simula, hasta cierto grado, las condiciones geométricas encontradas en el mercado.



Figura OR.1: Indentador comercial

En el capítulo 2 se presentó el diseño del indentador de manera que en un solo indentador cumplieran todas las posibilidades de espaciamiento interno entre insertos, esto es, el espaciamiento interno S . En la tabla 2.3 se muestran dichas dimensiones. En esta sección se plantea una alternativa para evitar recargar la cara frontal del indentador. En este sentido, se separaron los espaciamientos internos en pares e impares (Columna $\frac{L}{a}$ de tabla 2.3). Los diseños más conservadores se muestran en la figura OR.2.

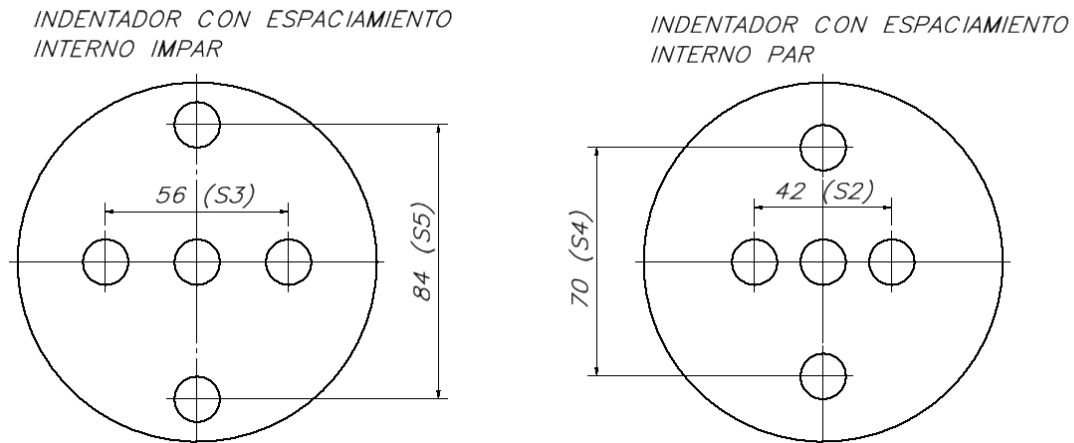


Figura OR.2: Diseños de indentadores alternativos

El diseño fue desarrollado alrededor de la premisa que restringe el rango de diámetros de insertos para el diseño realizado. Dicho rango fue establecido entre 8 y 12 mm de diámetro. Si bien en el mercado local no se encuentran a la venta los insertos por separados, es posible emular el diseño de un inserto y transcribirlo para obtener un inserto de características similares, por no decir iguales. Si fuese absolutamente necesario realizar el ensayo con un inserto de diámetro menor a ocho, es posible utilizar el diseño de orientación geométrica propuesto (revisar figura 2.12) y trasladarlo a un indentador de diámetro 50 y así poder utilizar el diseño realizado por el ingeniero Geu en el año 2004.

Por otro lado, es importante confirmar experimentalmente que la velocidad de trabajo del martillo sea de 5 m/s. Cabe solo resaltar que debe procurarse no realizar los ensayos con velocidades mayores a las indicadas pues la combinación de alta velocidad y una masa grande en el martillo pueden poner en riesgo el desarrollo del ensayo.

Los posibles cambios de diseño se pueden catalogar como cambios estructurales (componentes de apoyo) y cambio de elementos seleccionados. Los cambios estructurales pueden obedecer a temas de eficiencia de montaje o reducción de peso del equipo. En cambio, en lo que respecta a los cambios de elementos seleccionados, obedecen a la versatilidad del sistema de recopilación de datos y el sistema de control, el cual si permite una expansión o cambio de datos a investigar de manera satisfactoria.

CONCLUSIONES

La metodología de diseño VDI, plasmada en el desarrollo de la presente tesis, permitió desarrollar el diseño de un equipo de laboratorio para estudiar la influencia de la configuración de los insertos en taladros percusivos con las siguientes características:

- Ensayos semi automatizados cuyos parámetros pueden ser modificados.
- Estudiar hasta 320 combinaciones de distintos tipos, tamaños y configuraciones de insertos.
- Permite ensayar insertos entre 8 mm y 12 mm de diámetro.

El dispositivo permite estudiar los siguientes aspectos relacionados a la disposición de los indentadores:

- Zona de daño que genera un tipo de inserto para un tipo de roca específico
- La separación interna entre insertos para generar superposición de efectos
- La separación entre impactos sucesivos para conseguir la mayor destrucción posible. (revisar Figura 2.2)

Las ventajas de realizar un ensayo de esta naturaleza, utilizando el equipo diseñado, se materializan en los siguientes aspectos:

- Perforación más rápida. (Menor tiempo de obra)
- Menor desgaste en las piezas, lo que conlleva a utilizar menos repuestos.
- Gasto de energía menor.

Estos aspectos se traducen en ahorro de tiempo y dinero.

El presente documento pretende ser un escalón en el edificio del conocimiento. Por ello cabe la posibilidad de ser replicado y mejorado buscando un mayor aporte a la ciencia de la perforación de roca, buscando un equipo que permita estudiar el impacto in situ.

También es importante, tras el desarrollo del proyecto de tesis, confirmar que se han cumplido con los requerimientos planteados inicialmente. La tabla 2.1 muestra un resumen de los requerimientos planteados para el trabajo de tesis. Es posible concluir que se han cumplido con los requisitos planteados, menos el requerimiento de velocidad del martillo (revisar Anexo C.2).

Los componentes determinantes para el diseño planteado fueron: el diámetro de los insertos (dimensiones generales), la selección de los sellos neumáticos (mecanizado preciso y rugosidades específicas) y el asiento del indentador. La correcta selección fue clave para el desarrollo del diseño.

Dentro de los aspectos más relevantes del diseño se encuentra el diseño indentador; en específico la separación que existen entre dos pares de insertos. El análisis realizado trajo como resultado el diseño de la cara frontal del indentador, que permite estudiar distintas combinaciones de separaciones distintas.

El desarrollo de la presente tesis, evidenció la alta complejidad que conlleva el diseño y puso a prueba los conocimientos y habilidades adquiridas a través de los años como estudiante de ingeniería. Es importante recalcar las dificultades enfrentadas y superadas. Dentro de las cuales destacan, el diseño del sistema neumático, el diseño del anclaje (cimentación) del equipo y el diseño del sistema de giro. Al término de este proyecto, estos problemas fueron superados.

La simulación (Anexo D) muestra que la selección de materiales fue acertada y se encuentra dentro de un rango seguro de funcionamiento evitando el fallo de los componentes mecánicos del equipo. La selección de aceros especiales, fue especialmente importante debido a las altas cargas que se generan en el impacto. Cabe recalcar que los aceros especiales son productos nacionales que son de fácil acceso y tienen equivalencias internacionales.

El costo de desarrollo y fabricación del dispositivo es de s./ 23,000.00, monto más elevado que el esperado debido a tres factores: el uso de aceros especiales para los elementos que sufren impacto, sensores industriales y precisos y, finalmente, la fabricación de elementos mecánicos cuyas tolerancias son normalizadas.



Bibliografía

[Ministerio de Minas de Colombia, 2003]

MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA

2003 *Glosario Técnico Minero. Pág. 108.* República de Colombia. Web
accesada el 23 de Marzo de 2015.
<http://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/glosario_minero.pdf>.

[Minem, 2014]

SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA

2014 *Minería en Cifras 2014.* Marzo de 2014. Web 22 de Marzo de 2015.
<<http://www.snmpe.org.pe/informes-y-publicaciones-snmpe/nuestros-sectores-en-cifras/mineria-en-cifras-2014.html>>.

[CNN Expansión, 2013]

CNN EXPANSIÓN

2013 *¿Por Qué Cae El Precio Del Oro?" Economía.* 17 Apr. 2013. Web. 23
Mar. 2015.
<<http://www.cnnexpansion.com/economia/2013/04/17/por-que-cae-el-precio-del-oro>>.

[Rao Karanam, 1998]

RAO KARANAM

1998 *Principles of Rock Drilling.* Rotterdam: A.A. Balkema, 1998.

[Kolsky, 1963]

KOLSKY, H.

1963 *Stress Waves in Solids.* New York. Dover Publications.

[Jimeno, 2003]

JIMENO LÓPEZ, CARLOS

2003 *Manual De Perforación Y Voladura De Rocas.* Madrid. Madrid: Carlos
López Jimeno, 2003.

[Geu, 2005]

GEU, Francisco y ELÍAS, Dante

2005 *Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para Ensayos de Impacto entre Barras Cortas*. Artículo científico presentado en 8o. Congreso Iberoamericano de Ingeniería Mecánica. Congreso Cobim 8. Pontificia Universidad Católica del Perú, Oct. 2005. Web 23 Marzo, 2015. <<http://congreso.pucp.edu.pe/cibim8/pdf/19/19-12.pdf>>.

[Geu,2004]

GEU, Francisco

2004 *Diseño y Fabricación de un Equipo de Laboratorio para Ensayos de Impacto entre Barras Cortas*. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.

[Persson,1994]

PERSSON, Per-Anders

1994 *Rock blasting and explosives engineering*. Boca Ratón, Estados Unidos: CRC Press. Consulta: 28 de Marzo de 2015.
<http://books.google.com.pe/books?id=sdLO5HESJwgC&pg=PA1&hl=es&source=gbs_toc_r&cad=3#v=onepage&q&f=true>.

[Hughes,1970]

HUGHES, Robert W.

1970 Ingersoll Rand Co., (1970). *Button Bit*. US3618683 A. Patente de Estados Unidos.

[Atlas Copco,2007]

ATLAS COPCO SECOROC

2007 *Product Catalogue-DTH Equipment*. Fagersta, Suecia. Consulta: 30 de Marzo de 2015.
<<http://www.americawestdrillingsupply.com/Downloads/Atlas%20Copco/DTH/Secoroc.pdf>>

[Barriga,1985]

BARRIGA, Benjamín

1985 *Métodos de diseño en Ingeniería Mecánica*. Lima: PUCP. Facultad de Ciencias e Ingeniería.

[Pearson, 1974]

PEARSON, B.

1974 *Smith Willinston Inc. (1974). Method of inserting buttons in a drilling Head.* US 3852874 A. Patente de Estados Unidos.

[Decker Karl, 180]

DECKER, KARL

1980 *Elementos de Máquinas.* Bilbao, España. URMO S.A de Ediciones. Página 278.

[SKF,2005]

SKF

2005 *SKF Vibration Sensor Catalog.* Consulta: 8 de Junio de 2015.
<<http://www.skf.com/binary/82-48549/CM-P1-11604-EN-SKF-Vibration-Sensors-Catalog.pdf>>

[SKF,2010]

SKF

2010 *SKF bushings, thrust washers and strips Catalog.* Consulta: 12 de Junio de 2015. <<http://www.skf.com/binary/12-120169/SKF-bushings-thrust-washers-and-strips-1-EN.pdf>>

[Srinivasulu, 1980]

SRINIVASULU y VAIDYANATHAN

1980 *Handbook of Machine Foundations.* New Delhi, India. Tata McGrawHill.

[Electronics Tutorial, 2015]

STORR, WAYNE

2015 *Wheatstone Bridge.* Consulta: 2 de Agosto de 2015.
<<http://www.electronics-tutorials.ws/blog/wheatstone-bridge.html>>