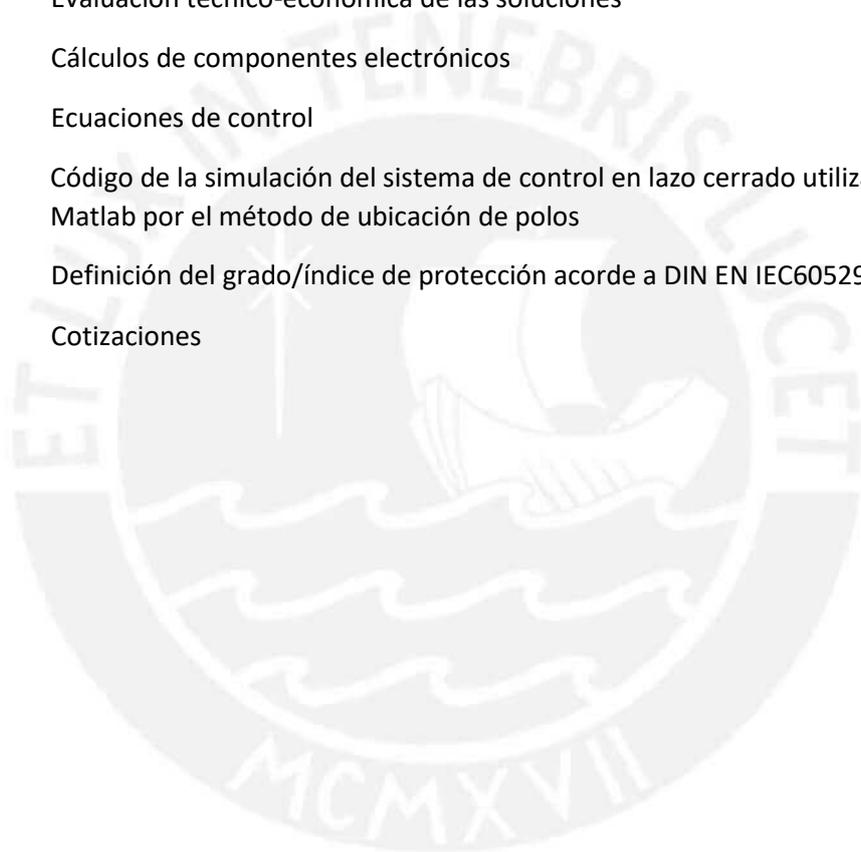


## ÍNDICE DE ANEXOS

<b>Anexo A:</b>	Marco Teórico
<b>Anexo B:</b>	Lista de Exigencias
<b>Anexo C:</b>	Estructura de funciones
<b>Anexo D:</b>	Matriz morfológica
<b>Anexo E:</b>	Conceptos de solución
<b>Anexo F:</b>	Evaluación técnico-económica de las soluciones
<b>Anexo G:</b>	Cálculos de componentes electrónicos
<b>Anexo H:</b>	Ecuaciones de control
<b>Anexo I:</b>	Código de la simulación del sistema de control en lazo cerrado utilizando Matlab por el método de ubicación de polos
<b>Anexo J:</b>	Definición del grado/índice de protección acorde a DIN EN IEC60529
<b>Anexo K:</b>	Cotizaciones



## Anexo A: Marco Teórico

### 1. Estudio de la roca

La palabra “roca” se puede definir como una composición de minerales relativamente constante. Estos minerales tienen un valor económico por su función en la sociedad. Su origen se encuentra en la superficie de la tierra, entre distintas actividades como:

#### a. Actividades volcánicas

El magma, a alta presión y temperatura en el interior de la tierra, fluye hacia la superficie. Este proceso forma dos tipos de estructuras:

- Estructuras extrusivas, donde el magma sale hacia la superficie de la tierra (lava). Generalmente la lava se enfría rápidamente, lo cual forma granos finos en la roca.
- Estructuras hipabisales, cuando el magma se introduce hacia lugares poco profundos. Se forman granos medios porque el enfriamiento no es tan rápido que el primero.

#### b. Estructuras plutónicas

Formadas por el flujo de magma hacia lugares muy profundos bajo la superficie. El enfriamiento se hace de forma muy lenta, por lo que el magma coexiste con las rocas formadas. Las rocas están formadas por un grano grueso.

#### c. Actividades en la superficie

Consiste en la interacción del clima, transporte de masas y la erosión. Esto genera la desintegración, fricción y movimiento de la roca.

#### 1.1. Tipos de rocas

Las rocas se pueden clasificar en tres grupos, según su origen [33]:

##### 1.1.1. Rocas sedimentarias

Generadas por factores físicos y climáticos. Además, este tipo de rocas se forma por la acumulación de materiales inorgánicos. Estas se subdividen en dos más:

a. Rocas sedimentarias detríticas

Formadas por la sedimentación de restos de otras rocas, luego de su transporte. Su clasificación se basa en el tamaño y forma de estos fragmentos:

**Tabla A.1:** Clasificación de las rocas sedimentarias detríticas según el tamaño de grano

Tamaño (mm)	Formación	Forma	Nombre de roca
>2	En grupos	Redondeados	Conglomerados
		Angulosos	Brechas
	Sueltos	Gravas	
0.06-2			Areniscas
<0.06			Limos
			Arcillas



**Figura A.1:** Tipos representativos de rocas sedimentarias detríticas [34][35][36][37].

b. Rocas sedimentarias no detríticas

Formadas por la acumulación de sustancias orgánicas o por precipitación de compuestos químicos en agua. Los tipos de roca más conocidos se presentarán en la tabla a continuación:

**Tabla A.2:** Clasificación de las rocas no detríticas

Tipo de roca	Origen	Variedad	Características	Uso
Caliza	Precipitación de carbonato cálcico	Toba calcárea	Contiene restos vegetales	Fabricación de cemento y uso en revestimientos
	Acumulación de fragmentos fósiles	Dolomía	Contiene Magnesio	
	Acumulación de caparzones de sílice	Sílex		Cerámica
Evaporita	Evaporación de agua en medios marinos	Yeso	Precipitación de sulfato cálcico	Revestimiento de parámetros
Organógena	Acumulación de materia orgánica	Carbón	Restos vegetales	Combustible
		Petróleo	Plancton marino	

1.1.2. Rocas Ígneas

Formadas por la solidificación del magma. Su clasificación depende de su posición cuando ocurre su enfriamiento:

**Tabla A.3:** Clasificación de las rocas ígneas

Tipo de roca	Formación	Estructura	Variedad	Características	Uso
Plutónica	Bajo la superficie terrestre	Rocas densas no porosas y cristales grandes	Granito	Mezcla de cuarzo, feldespato y mica	Construcción e industria funeraria
			Gabro	Ausencia de cuarzo	Ornamental
	Tono oscuro				
Volcánica	Sobre la superficie terrestre	Cristales pequeños o materia sin cristalizar	Basalto	Mezcla de silicato de magnesio y hierro	Construcción
				Bajo en sílice	
				Tono oscuro	
			Riolita	Mezcla de cuarzo y feldespato potásico	Construcción y aislante acústico
				Tono claro	
			Piedra pómez	Similar a la riolita	Elemento filtrante
				Alta porosidad	Polvos abrasivos
Obsidiana	Composición de óxido sílico	Joyería y adornos			
	Tono oscuro				
	Brillo vítreo				



a) Granito  
(Medina, 2016)



b) Gabro  
(Ejemplos, 2016)



c) Basalto  
(Educarex, 2016)



d) Obsidiana  
(Minerales de Colección S.L., 2016)

**Figura A.2:** Ejemplos de rocas ígneas [38][39][40][41].

### 1.1.3. Rocas metamórficas

Las rocas metamórficas se generan por cambios físicos y geológicos de rocas preexistentes. Este proceso además reajusta su estructura química, por lo que tiene propiedades diferentes. El proceso se realiza en estado sólido, creando una laminación en el material (foliación). Algunos tipos de rocas existentes son:

**Tabla A.4:** Clasificación de las rocas metamórficas

Tipos de roca	Formación	Estructura	Uso
Pizarras	Incremento bajo de temperatura	Foliación recta, paralela y fina	Placas para techar en construcción
	Presión por enterramiento		
Esquistos	Incremento de temperatura	Estructura foliada muy deformada	Construcción
	Presión elevada		
Gneis	Presión y temperatura muy elevadas	Cuarzo, feldespatos y micas orientados en bandas claras y oscuras	Tejas
Mármol	Incremento de temperatura y presión de la caliza y dolomía	Estructura cristalina	Construcción y decorativo
Cuarcita	Areniscas de cuarzo a presión	Estructura cristalina	Construcción y decorativo



**Figura A.3:** Tipos de rocas metamórficas [42][43][44][45].

## 2. Propiedades físicas de las rocas

Para los trabajos de perforación, el objetivo principal es taladrar la roca a la mayor velocidad de penetración posible, optimizando la vida útil de las herramientas de perforación [46]. Es por ello que los ingenieros clasifican a las rocas por su “perforabilidad” que engloba su densidad, resistencia a la compresión, dureza, coeficiente de fricción interna y abrasividad. Se estudiarán resultados de distintos ensayos en laboratorio por estándares ASTM realizados por Gokhale en su libro “Rotary Drilling and Blasting in Large Surface Mines”

### 2.1. Resistencia a la compresión

Se define como la propiedad física de un material para resistir a las fuerzas de compresión sin variar su estructura física. El ensayo se realizó aplicando una fuerza de compresión uniaxial a una muestra de un núcleo de roca hasta lograr su deformación. Esta es calculada por la siguiente fórmula:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{F}{\pi * \frac{d^2}{4}} \quad (1.1)$$

Donde:            F=Fuerza de compresión aplicada  
                       d=Diámetro de la máquina compresora

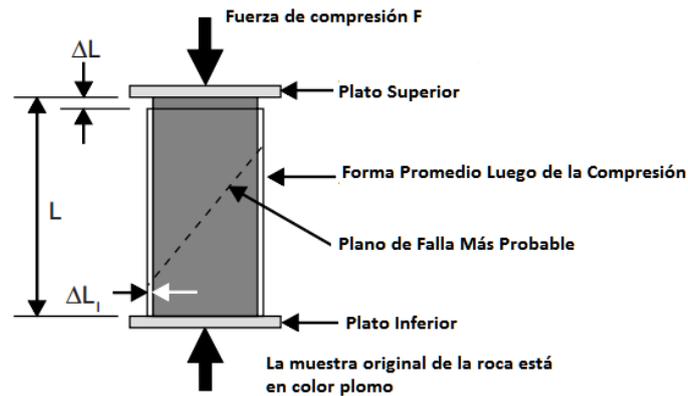
Y la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (1.2)$$

Donde:  $\varepsilon$ =deformación

L=longitud total

$\Delta L$ =cambio de longitud por la fuerza aplicada



**Figura A.4:** Ensayo uniaxial de compresión [46].

La máquina utilizada para este ensayo es la Universal Testing Machine. Los resultados se detallan a continuación, considerando las siglas UCS como Ensayo de Compresión Uniaxial (Uniaxial Compressive Strength en inglés):

**Tabla A.5:** Rango de compresión de rocas más comunes

Nombre de roca	Presión aplicada (Mpa)
Andesita	300-400
Basalto	250-400
Caliza	120-130
Conglomerado	140-150
Cuarcita	160-220
Diorita	170-300
Dolomita	150-170
Esquisto	60-400
Gabro	560-350
Gneis	140-300
Granito	200-350
Mármol	100-200
Pizarra	150-160
Riolita	120-130
Taconita	300-600

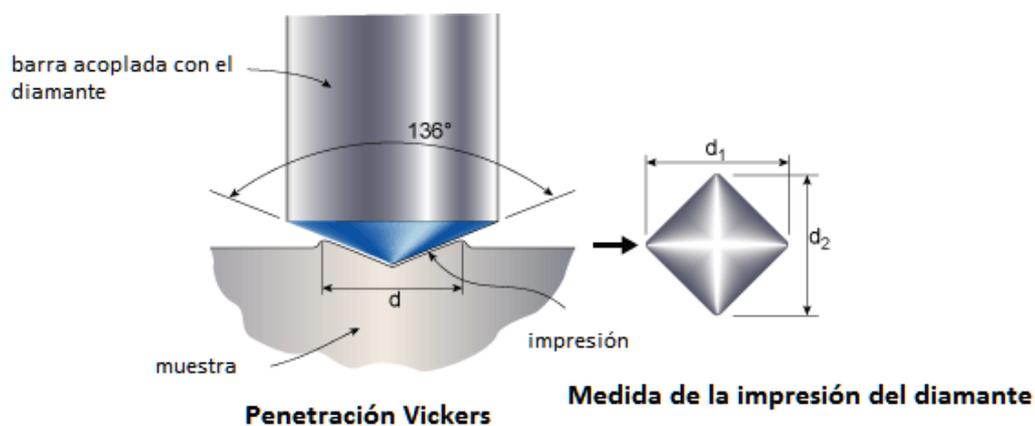
Para poder entender la magnitud de estas presiones ensayadas, se estima la capacidad de sufrir fuerzas de compresión axial sin ser deformadas [47]:

**Tabla A.6:** Capacidad de compresión estimada según Brown

Grado	Definición	Compresión(Mpa)	Grado de fuerza estimada
R6	Extremadamente fuerte	>250	Elemento sólo puede ser astillado por un martillo de roca
R5	Muy fuerte	100-250	Se necesita de varios golpes de un martillo de roca para fracturarla
R4	Fuerte	50-100	Necesita de más de un golpe para ser fracturado
R3	Medianamente fuerte	25-50	No puede ser raspado por un cuchillo de bolsillo, es fracturado por un solo golpe de un martillo de roca
R2	Débil	5-25	Puede ser raspado por un cuchillo de bolsillo con dificultad, pequeñas indentaciones son logradas con un firme golpe de un martillo de roca
R1	Muy Débil	1-5	Se desmorona con golpes firmes de un martillo de roca, puede ser raspado con un cuchillo de bolsillo
R0	Extremadamente Débil	0.25-1	Dividido por una uña del dedo

## 2.2. Dureza

Es la resistencia de un material a ser penetrado por otro elemento. Dado que la composición de la roca es variada respecto a la cantidad de minerales presentes en ella, el grado de dureza difiere en diferentes rocas de un mismo tipo. Se presentará los resultados del test de Vickers a distintos minerales. Este ensayo consiste en empujar un diamante de forma cuadrada, montado en la superficie de una barra, hacia la muestra de una roca con una fuerza pre-ajustada. El área de penetración es medida por un microscopio y determina la dureza del material mediante una tabla.



**Figura A.5:** Ensayo de dureza Vickers [48].

**Tabla A.7:** Dureza Vickers de los minerales más importantes [46].

Mineral	Dureza Vickers	Mineral	Dureza Vickers
Corindón	2300	Pirrotina	310
Cuarzo	1060	Fluorita	265
Granate	1060	Pentlandita	220
Crisolita	980	Esfalerita	200
Hematita	925	Calcopirita	195
Pirita	800	Crisotilo	175
Plagioclasa	800	Anhidrita	160
Diópsido	800	Calcita	125
Magnetita	730	Biotita	110
Ortoclasa	730	Galena	85
Augita	640	Calcita	65
Ilmenita	625	Clorita	50
Hiperstena	600	Yeso	50
Hornblenda	600	Talco	20
Cromita	600	Halita	17
Apatita	550	Silvina	10
Dolomita	365		

### 2.3. Elasticidad

Este comportamiento está basado en la ley de Hooke, que permite al material sufrir deformaciones reversibles al cesar la carga. Esto permite clasificar a las rocas en tres tipos [7]:

- a. Elasto-frágiles: obedecen a la Ley de Hooke.
- b. Plástico-frágiles: su ruptura es precedida de la deformación plástica (cuando no puede volver a su forma original).
- c. Altamente plásticas: su deformación plástica es insignificante.

Depende principalmente de su composición mineralógica, magnitud de carga y porosidad. Generalmente la elasticidad aumenta con el contenido de cuarzo, feldespato y minerales duros.

#### 2.4. Tenacidad

Para un material, la tenacidad es capacidad de resistir la propagación de grietas. Un ejemplo de roca muy tenaz es el basalto, muy difícil de romper, aunque no tiene una dureza elevada. La tenacidad se puede calcular por la siguiente fórmula:

$$y = \left( \frac{E}{E_{PL}} \right) * \sigma_{com} \quad (1.3)$$

Donde:

y= Tenacidad

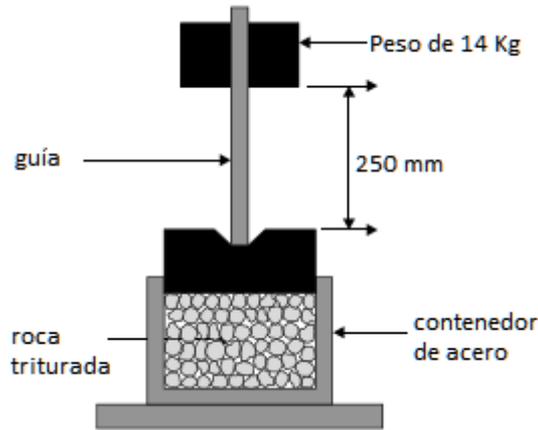
E= Módulo de elasticidad

E<sub>PL</sub>=Módulo de plasticidad

σ<sub>com</sub>=Esfuerzo de compresión

#### 2.5. Fragilidad

Referida a la habilidad relativa de un material a ser desintegrado ante un impacto de cargas. El ensayo que se realiza para evaluar esta propiedad es el test de impacto, donde los pedazos de roca triturada son seleccionados. Muestras mayores a 16mm son descartadas, mientras que alrededor de 0.5 Kg de muestra con partículas entre 11.2-16 mm es seleccionada para la prueba. Entonces este material es puesto en un contenedor de acero, donde se someterá a 20 impactos por un peso de 14 Kg que caerá a una altura de 250 mm. Finalmente, este material será seleccionado nuevamente por su tamaño (mayor a 11.2mm) por un tamiz y pesado.



**Figura A.6:** Test de impacto en rocas [46].

El indicador de fragilidad será calculado con la siguiente fórmula:

$$S_{20} = 100 * \frac{W_1 - W_2}{W_1} \quad (1.4)$$

Donde:

$S_{20}$ =Indicador de fragilidad

$W_1$ =Peso de la primera muestra (sin ensayar)

$W_2$ =Peso de la segunda muestra (ensayada)

## 2.6. Abrasividad

Referida como la propiedad de las rocas para que, al entrar en contacto con la superficie de la herramienta de corte, esta se desgaste. Existen diferentes pruebas para poder medir esta propiedad, por ahora se observará el Test de Abrasividad de Cerchar. Consiste en rayar la superficie del material de prueba con un pin de acero a una distancia de 10mm y carga de 70N. Luego, la abrasividad del material es calculada por el diámetro resultante del desgaste del pin por la siguiente fórmula:

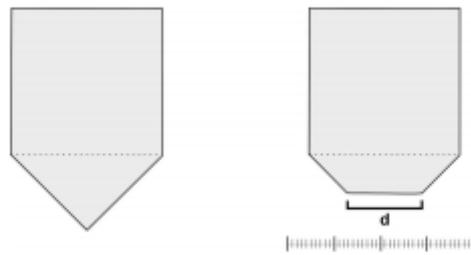
$$CAI = 10 * \frac{d}{c} \quad (1.5)$$

Donde:

CAI: Índice de Abrasividad Cerchar

d: Diámetro de la herramienta desgastada

c: Factor de corrección (c=1 mm)



**Figura A.7:** Pin de acero y su diámetro medido luego del desgaste [49].

Se muestran los resultados de las rocas más comunes en esta tabla [46]:

**Tabla A.8 :** Valor CAI de las rocas más comunes

Tipo de roca	Valor CAI
Basalto	1.7-5.2
Diabasa	3.8-5.4
Andesita	1.8-3.5
Diorita	3.0-5.6
Sienita	3.0-5.6
Granito	3.7-6.2
Caliza	0.1-2.4
Filita	1.3-4.3
Esquisto	1.8-5.0
Gneis	1.8-5.0
Anfibolita	2.8-3.7
Cuarcita	4.8-7.3

Se encontró una correlación entre las rocas que tenían el valor CAI mayor a 0.7 y su dureza Vickers por la siguiente fórmula:

$$V_H = 145 * CAI \quad (1.6)$$

Donde:

$V_H$ : Dureza Vickers

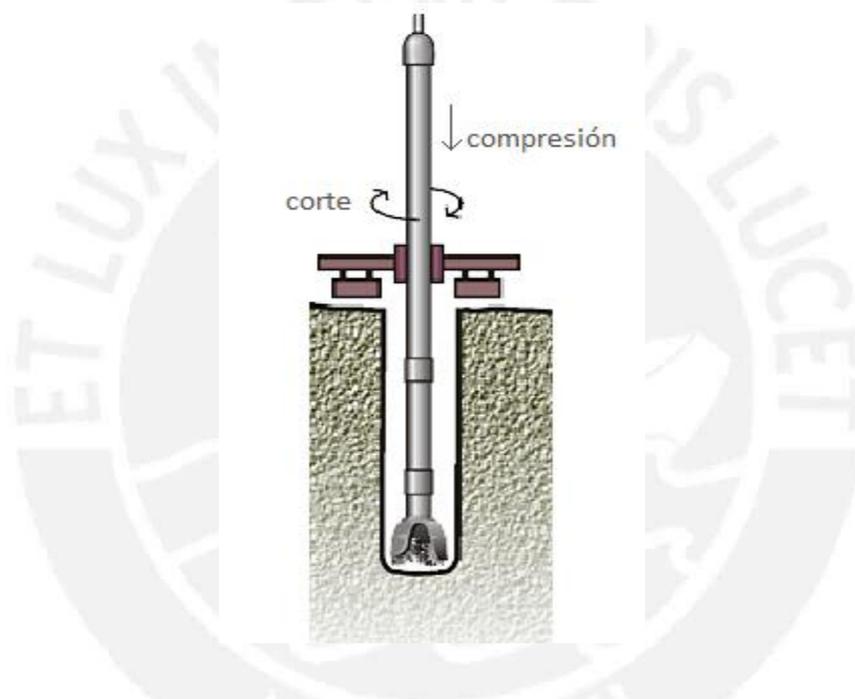
CAI: Índice de Abrasividad Cerchar

### 3. Otros sistemas de perforación

Se hará un breve repaso de los otros sistemas de perforación que se emplean en las labores mineras en el mundo

#### 3.1. Sistemas de perforación por rotación

Los sistemas de perforación por rotación interactúan con la roca comprimiéndola, cortándola o combinando ambos efectos. Las acciones básicas que define este sistema son: compresión de la roca por una fuerza aplicada a la herramienta (impulsado por un varillaje) y el corte de la misma por el giro aplicado. En la siguiente figura se mostrarán los pasos de la perforación por rotación:



**Figura A.8:** Acciones básicas de la perforación por rotación [50].

Según la herramienta de corte que se emplee en este sistema de perforación, existen tres variantes:

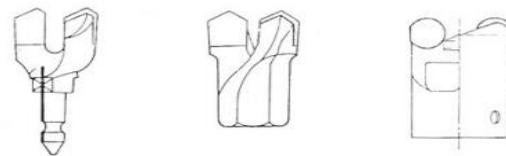
- Perforación rotativa por corte
- Perforación rotativa por tricono
- Perforación con corona de diamantes

Se analizará cada herramienta de corte a continuación.

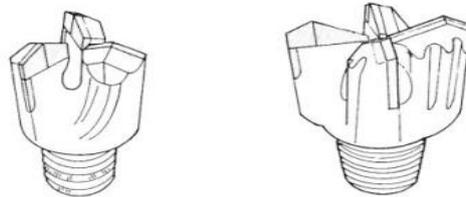
### 3.1.1. Perforación rotativa por corte

En esta variante, la herramienta de corte está compuesta por bocas de carburo de tungsteno, los cuales están puestos de forma conveniente, variando su forma y ángulo. Los tipos de bocas se detallan a continuación:

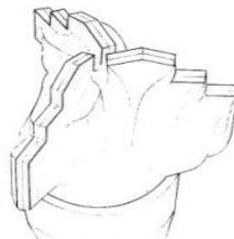
- Bocas bilabiales o de tenedor (de 36 – 50 mm de diámetro)
- Bocas trialetas o multialetas (de 50 – 115 mm de diámetro)
- Bocas de labios reemplazables (de 150 – 400 mm de diámetro)



a) Bocas bilabiales



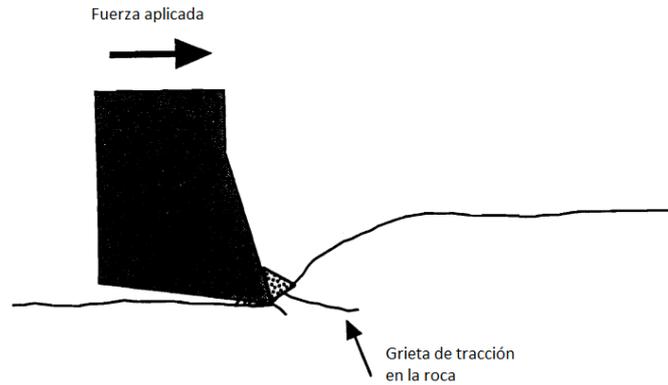
b) Bocas trialetas y múltiples



c) Boca escariadora

**Figura A.9:** Tipos de bocas para perforación por corte [50].

La interacción de la boca de corte en la roca genera deformaciones elásticas por torsión y deflexión, luego la superficie de contacto libera la tensión para que, finalmente se desprenda fragmentos.



**Figura A.10:** Acción de la fuerza de corte en la roca [46].

Se observa que los fragmentos son generados, básicamente, por los esfuerzos de corte en la roca. Dado que el par generado por la fuerza aplicada depende de la velocidad de giro, y ésta a su vez es proporcional a la velocidad de corte, se pueden alcanzar velocidades de perforación rápidas. El ciclo de perforación rotativa es continuo.

El diámetro del útil de corte determina el desgaste del elemento, ya que, a dimensiones más grandes, el torque aumenta. Es por ello que su aplicación generalmente se da en rocas blandas perforables con 500 N/mm. El desgaste de la herramienta será directamente proporcional a la velocidad de rotación.

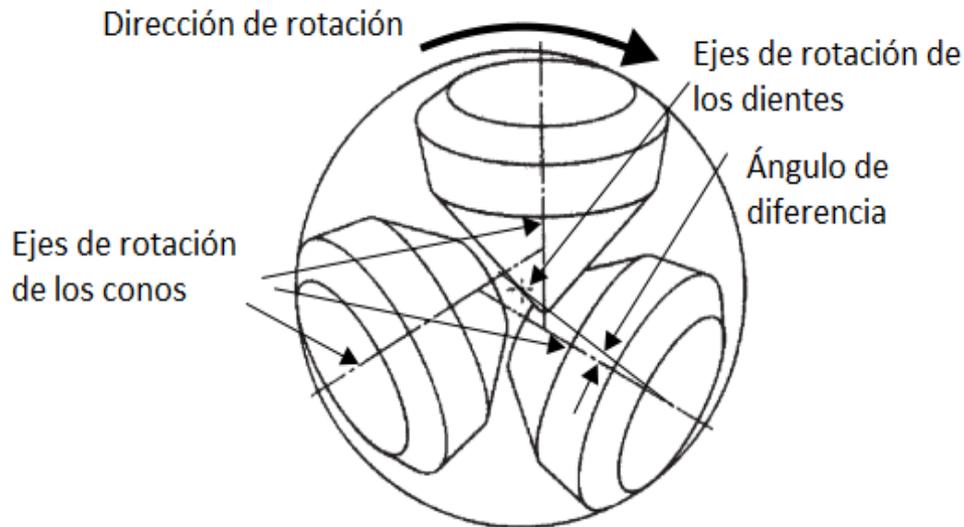
### 3.1.2. Perforación rotativa con tricono

Es el útil más usado en los sistemas de perforación por rotación, ya que alrededor de 2% de la perforación por rotación se hacen con bocas, el restante se hace con tricono. Consiste en tres elementos cónicos montados en rodamientos. La interacción con la roca y el torque aplicado causa el contacto con los tres elementos cónicos. Un fluido (sea aire o lodo de perforación) es conducido hacia la cara de la roca a alta velocidad. Este cumple la función de refrigerar el calor por el contacto de los materiales, de remover el detrito (descomposición de la roca) por el corte a la roca y de transportarlo hacia la superficie.



**Figura A.11:** Tricono de acero [51].

La explicación para el diseño de 3 conos es la siguiente: al tener una disposición más balanceada y teniendo un contacto radial, se disminuirán su desviación con respecto a usar una herramienta de corte. Además, la división equitativa de cargas aumenta su vida útil.



**Figura A.12:** Movimiento e interacción de los triconos [52].

El material de manufactura de los triconos es diverso, ya que, al estar sometido por distintos esfuerzos, depende de la aplicación. Los insertos están formados por una mezcla de carburo de tungsteno (84 a 96%) y cobalto. El primer componente es muy duro y resistente al desgaste, pero a la vez frágil. El cobalto actúa entre las partículas de carburo de tungsteno como unión para darle tenacidad a este componente.

Los fabricantes de triconos escogen diversos materiales para cada parte [52].

- Para el cono, ya que se necesita resistencia a la abrasión e impacto, se elige generalmente el ANSI 4817, con contenido de C, Si, Mn, Ni, Mo, S y P.
- Para la pata, es necesario su soldabilidad, resistencia al impacto y a la fatiga, por ello eligen el ANSI 8720, con contenido de C, Si, Mn, Ni, Cr, Mo, S y P.

Además, se somete a tratamiento térmico, para poder darle resistencia al desgaste. Se utiliza la carburación como tratamiento, donde el elemento es colocado en una caja cerrada con un componente rico en carbono y calentado a 92.5°C. El componente libera monóxido de carbono, lo cual penetra en el elemento por el proceso de difusión. Esto hace que el elemento tenga una dureza elevada y una resistencia al desgaste mejorada en su superficie (el carbono penetra entre 1.7mm y 3.3 mm a la superficie).

### 3.2. Sistemas de rotopercusión con martillo en cabeza

Este tipo de sistema se caracteriza porque la generación de la rotación y percusión se producen fuera del barreno (herramienta de corte). Estos movimientos se transmiten por el varillaje hacia la roca de perforación. Pueden ser neumáticos o hidráulicos.

#### 3.2.1. Perforadoras neumáticas

Método convencional accionado por aire comprimido. El martillo neumático incluye:

- Cilindro con porta barrenas y elemento retenedor del varillaje
- Pistón generador de la percusión
- Válvula direccional
- Mecanismo de rotación
- Sistema de barrido de aire

Ahora se observarán unas características promedio de los martillos neumáticos para poder compararlos con otros tipos de perforación:

**Tabla A.9:** Características medias de los martillos neumáticos

Parámetros de comparación	Valores
Relación diámetro del pistón/barreno	15-1.7
Carrera del pistón (mm)	35-95
Frecuencia de golpeo (golpes/min)	1500-3400
Velocidad de rotación (rev/min)	40-400

Su rango aplicación depende de la longitud del barreno, entre 3 a 15 m, y se utilizan generalmente bocas de 50 a 100 mm de diámetro para rocas duras, teniendo como principal límite el consumo de aire y los desgastes de los útiles de corte. Sus ventajas radican en la simplicidad y el bajo costo en mantenimiento y reparaciones.

### 3.3. Perforación con martillo en fondo

Este tipo de perforación está basado en el golpeteo directo del pistón al útil de perforación. Está impulsado con aire comprimido, la rotación puede ser neumática o hidráulica. Está diseñado para rocas duras y diámetro de perforación mayores a 160 mm. Su frecuencia de golpeo está en el rango de 600 y 1600 golpes por minuto.

Incorpora un sistema de cerrado del paso de aire cuando la boca no entra en contacto con la roca, para evitar la perforación en vacío.



**Figura A.13:** AirROC D45 con martillo neumático en fondo [53].

Las características medias de algunos ejemplos de martillos en fondo se detallarán a continuación:

**Tabla A.10:** Características medias de los martillos neumáticos en fondo

Parámetros de comparación	Valores				
Diámetro de perforación (mm)	100	125	150	200	300
Diámetro de pistón (mm)	75	91	108	148	216
Carrera del pistón (mm)	10	102	102	100	100
Peso del martillo (Kg)	38.5	68.5	106	177	624
Relación diámetro del barreno/pistón	1.33	1.37	1.39	1.35	1.39

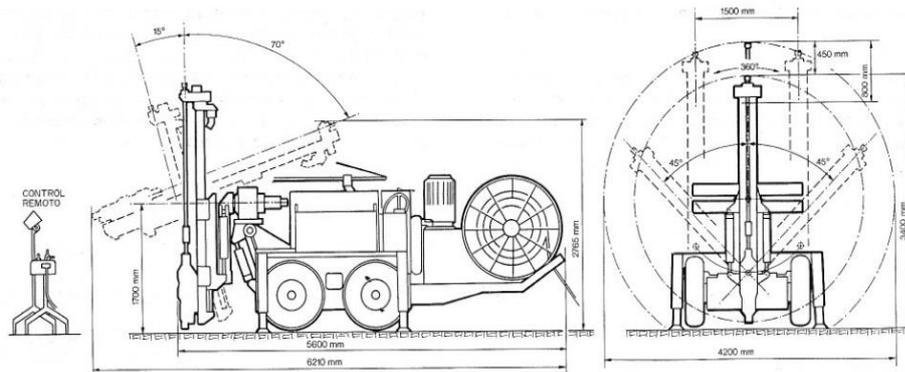
Este tipo de perforación presenta diferentes ventajas, por ejemplo:

- Velocidad de penetración constante
- Menor desgaste de los útiles de perforación y del varillaje
- Menor velocidad de rotación que otros métodos
- Disminución de ruido

Sus desventajas radican en las bajas velocidades de penetración, en la limitación de diámetros de perforación por el diseño y en el elevado consumo energético.

### 3.3.1. Perforadora de barrenos largos en abanico

Utilizado principalmente para la apertura de cámaras y hundimiento por subniveles, donde la perforación debe ser precisa en un largo de 20 a 30 m, dispuestos en abanicos verticales. Están compuestos por martillos hidráulicos montados sobre deslizaderas de tornillo sinfín que permite cubrir desde una posición establecida toda la zona de trabajo.



**Figura A.14:** Equipo de perforación de barrenos largos montado sobre chasis de neumáticos [4].

## 4. Sistemas de teleoperación de la perforación

Los sistemas de teleoperación son ampliamente utilizados por los operadores de maquinaria pesada en todas las minas en el mundo. Lamentablemente, hay poco desarrollo de esta tecnología en el Perú, y más que eso, un nulo uso de esta en las labores subterráneas, donde se presentan más riesgos para el personal. Entre los sistemas de teleoperación ofrecidas para el uso en perforadoras hidráulicas subterráneas tenemos los siguientes:

### 4.1. Sistema ARDVARC

Desarrollado por Flanders para las perforadoras de superficie, este sistema controla el equipo de manera autónoma, su posición e inclinación y presenta los resultados al operador. Además de ello recolecta los datos del proceso e interactúa con un HMI. La elaboración de patrones se realiza por un interfaz Web. Existen tres niveles de automatización ARDVARC:

ARDVARC Intelli-Rig: que contempla el posicionamiento del hoyo de perforación por GPS y una base de datos de los eventos sucedidos en la perforación.

ARDVARC One-Touch: convierte una máquina perforadora manualmente operada en una semiautomática, donde el operador sólo debe posicionar el equipo.

ARDVARC Fully Autonomous: la máquina es totalmente automatizada, donde el operador monitorea el trabajo en una distancia segura. Se genera el mapeo 3D de la zona de operación para evitar obstáculos. Además, el operador puede comandar varias máquinas a la vez.



**Figura A.15:** Sistema automático ARDVARC de Flanders [54].

#### 4.2. Teleoperación Hard-Line

Hard Line es una compañía establecida en 1996 en Canadá para proveer controles remotos y tele-control remotos para la industria minera. Esta empresa OEM tiene presencia en México, Perú, Chile y Australia para el sector minero. Entre sus productos de automatización se encuentran:

a. TELEOP TELE-REMOTE MINING SYSTEMS

Este sistema de control está diseñado para operar diferentes perforadoras en lugares distintos. Esto permite al personal calificado teleoperar maquinaria en serie, sin moverse de lugar.



**Figura A.16:** Equipo de control de teleoperación [55].

b. Sistema de control remoto RRC

Este sistema permite el control de una máquina minera a una distancia lejana. Es adaptable a todas las maquinarias, sin importar del fabricante, tamaño, o control existente. Diseñado para ambientes agresivos y es personalizable en sus funciones.



**Figura A.17:** Control remoto de un cargador frontal [56].

5. Sensores utilizados en la minería subterránea

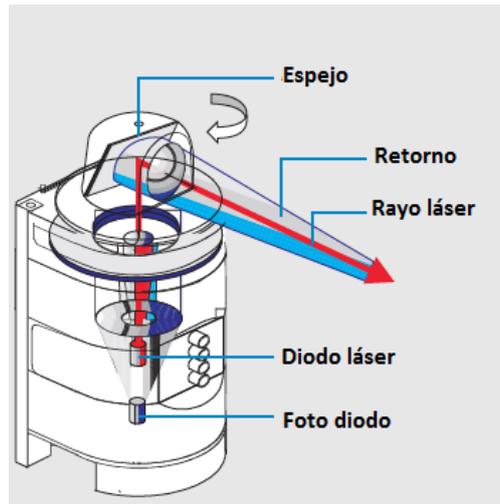
En este apartado se repasarán los sensores usados frecuentemente en las labores mineras para la medición de parámetros.

5.1. Escáneres 3D

El escáner 3D es un dispositivo que analiza un objeto o zona para coleccionar datos de su forma, con el fin de construir modelos digitales. Esto se crea a partir de una nube de puntos recolectados a partir de muestras geométricas. Las tecnologías actuales se basan si existe contacto entre el objeto o no. Se hará una breve descripción acerca de los distintos tipos de funcionamiento de los escáneres sin contacto activos, es decir, los que emiten una señal y analizan el entorno:

a. Time of flight

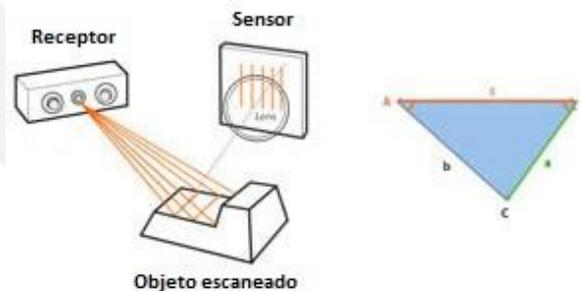
Se basa en la medición por puntos del objeto enviando un rayo láser y midiendo el tiempo que demora en rebotar. Entonces, teniendo la inclinación del escáner y el tiempo, se pueden sacar sus coordenadas relativas con respecto a este sensor. Tiene un grado de inclinación de 330 en un plano vertical. Generalmente el alcance es de 2 a 1000 metros, dependiendo del modelo y fabricante. Tienen una precisión submilimétrica y la frecuencia de captura de puntos oscila entre 10.000 a 100.000. Su desventaja es el prolongado tiempo que demora en tomar los datos.



**Figura A.18:** Funcionamiento de un escáner láser time-of-flight [57].

b. Triangulación

Usan una línea láser o un solo punto para escanear un objeto. Un sensor recoge la luz reflejada por el objeto, y utilizando la triangulación trigonométrica se puede calcular la distancia del objeto medido. Dado que la distancia entre el emisor y receptor es conocida, además del ángulo entre el láser y el sensor, se puede conocer en qué ángulo está reflejando el objeto, y consecuentemente su distancia. Es menos preciso que la primera tecnología y más ruidosa, aunque es más portable y menos sensible a la luz del ambiente. Su distancia entre el foco y objeto es menor a 1 metro.



**Figura A.19:** Principio de funcionamiento de un escáner tipo triangulación [58].

c. Diferencia de fase

Estos escáneres emiten un rayo láser hacia el objeto, pero a diferencia de la tecnología time-of-flight, lo que se mide es la diferencia de fase y el número de longitudes de ciclos internos por ecuaciones físicas. Su gran ventaja radica en la precisión de la medición (0.1mm) y la velocidad de puntos registrados (1 millón por segundo). El rango de alcance es de 100 m.

### 5.1.1. Escáneres 3D actualmente usados en minería

Los escáneres que se utilizan actualmente en minería utilizan las tecnologías mencionadas líneas arriba para distintas aplicaciones como detección de colisiones, mapeo 3D de las formaciones rocosas o evaluación del entorno. Los sistemas ofrecidos por las compañías para este sector son los siguientes:

#### a. Tunnel Collision Warning System

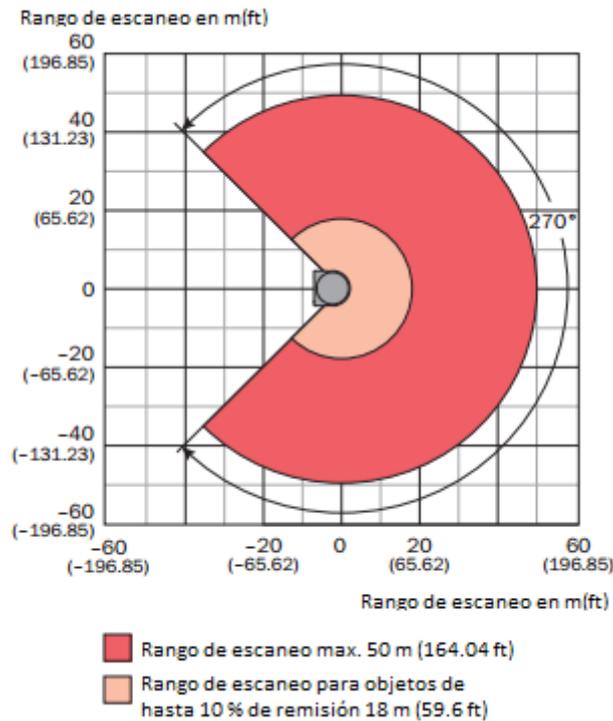
Sistema de asistencia del operador para vehículos en minería subterránea desarrollado por SICK para aumentar la seguridad en la operación. El sistema emite una alerta cuando existe un riesgo de colisión en el entorno subterráneo.



**Figura A.20:** Sistema de alerta de colisión en túneles SICK [59].

Emplea dos escáneres láser (Eye Safe Class 1) que emite información para ser interpretada y dispuesta en alertas para el operador en un interfaz, y así tomar acciones evasivas. Se dispone de alertas sonoras cuando la situación es crítica. Además, el sistema completo emplea un GPS para estimar velocidades y posiciones. Posee una interfaz Ethernet para el monitoreo y descarga de datos.

El escáner láser operado en este sistema es el LMS 151, el cual provee la forma del túnel y los límites de la operación minera. Emplea una frecuencia de escaneo de 50 Hz con un tiempo de respuesta de 20ms y conectividad serial RS 232.



**Figura A.21:** Rango de escaneo de los sensores láser LMS 151 [60].

b. Void Scanner 150 Mk3

Escáner 3D desarrollado para supervisión de trabajos mineros subterráneos por Renishaw, especialmente para la elaboración de perfiles mineros de operación. Cuenta con sistemas de estabilización para la toma de datos más exacto. El diodo láser es de clase 2M de gas.



**Figura A.22:** Escáner láser Void [61].

Posee un alcance de hasta 150 m para un objeto sin movimiento y un rango mínimo de 0.5, ideal para la digitalización de un túnel o galería subterránea. Está implementado con un encoder opto-electrónico con una precisión de 0.2° y un rango de 270°. Posee protección IP65.

## 5.2. Sensores de proximidad

Los sensores de proximidad son transductores que permiten detectar objetos o señales cercanos al elemento. Según el principio físico se pueden clasificar en distintos tipos:

### a. Sensor capacitivo

Señala un cambio del campo eléctrico. Pueden detectar objetos metálicos o no metálicos midiendo su capacitancia, la cual depende de la constante dieléctrica del material y sus propiedades físicas. Están basados en un oscilador RC. Se puede observar la variación de capacitancia, por tanto, su grado de cercanía del objeto.



**Figura A.23:** Tipos de sensores de proximidad en el mercado [62][63][64][65][66].

### b. Sensor inductivo

Diseñados para generar un campo magnético y detectar pérdidas de corriente por la introducción de objetos metálicos o no metálicos. Consta de una bobina con núcleo de ferrita y un oscilador. La salida es de tipo On-Off.

c. Sensor infrarrojo

Consta de dos partes: un emisor de luz infrarroja, y un receptor (fototransistor o fotodiodo). Estos funcionan con la interrupción de haz de luz, si algún objeto entra en el viaje de la luz infrarroja, entonces se emite una señal. Ambas partes pueden estar separadas o juntas en un mismo cuerpo.

d. Sensor ultrasónico

Se basan en el principio de emisión y reflexión de ondas acústicas, tal como un sensor infrarrojo de un cuerpo. Se emite un pulso ultrasónico y se cuenta el tiempo hasta el retorno de la onda. La respuesta se puede emitir de forma analógica o digital.

e. Sensores magnéticos

Usador para detectar objetos magnéticos con la posibilidad de detectarlos a grandes distancias. La exposición directa del objeto no es necesaria, ya que los campos magnéticos pueden pasar a través de objetos no magnéticos.

5.2.1. Sistemas actuales usados en minería

Los sistemas de detección de proximidad en minería generalmente usan sensores de tipo ultrasónicos, magnéticos e infrarrojo, en detrimento de los capacitivos e inductivos. Esto es debido a su robustez en ambientes agresivos y una mayor precisión en su medición. Ahora se verán los sistemas que se usan en maquinaria minería en la actualidad.

a. Proximity Alert System

Tecnología creada por la empresa PBE para mejorar la productividad de labores mineras, garantizando la seguridad de los trabajadores y equipos. Detecta la aproximación de cualquier persona o equipo cercano a la maquinaria, además de implementar alertas visuales, auditivas y monitoreo continuo por parte del operador.

Este sistema emplea sensores electromagnéticos, para la detección de maquinaria por sus materiales no ferromagnéticos, y radares, que usan el ultrasonido para detectar la proximidad de personal u obstáculos.



**Figura A.24:** Sistema de detección de proximidad desarrollado por PBE [67].

b. Detección de proximidad (PROX)

Este sistema de detección integrado, distribuido por la compañía Hard Line, está diseñado para prevenir accidentes detectando cuando un operador remoto entra a una zona alrededor de la maquinaria operada. Se compone de un sensor magnético que detecta el grado de proximidad del control remoto. Las zonas de detección son las siguientes:

La zona de alerta, en la cual el sistema emite una alerta audible y visual que advierte al operador su proximidad hacia la máquina. Esta alerta se detiene cuando el operador sale de esta zona.

La zona prohibida, puede ser configurada para parar o apagar la maquinaria. En los dos casos el operador debe salir de la zona y reiniciar los controles.



**Figura A.25:** Descripción de las zonas del sistema de detección de proximidad [68].

### 5.3. Sensores y actuadores para el control de posición

Los sensores de posición utilizados en minería se diferencian en la ubicación de la toma de datos. Los distintos tipos de control de posición son los siguientes:

#### a. Servo válvulas

Las servo válvulas hidráulicas ofrecen un control de caudal, presión, velocidad y recorrido. Esto se debe a una realimentación en su interior, lo cual permite un control de proceso. El control de esto se puede hacer de forma analógica o digital, lo cual permite la automatización de circuitos y actuadores hidráulicos. Su desventaja radica en el precio y en el mantenimiento de este componente. Dado que el ambiente minero conlleva a un grado de suciedad elevado del aceite, este componente debe de estar protegido por filtros finos y dialización continua del aceite hidráulico.



**Figura A.26:** Servoválvula hidráulica Rexroth [69].

#### b. Sensor de posición interno para cilindro hidráulico

Estos sensores inductivos generan una perturbación ultrasónica mediante una bobina. Una varilla acoplada se coloca un imán móvil para deslizarse, lo cual cambia de permeabilidad del medio hidráulico. Esto genera una reflexión de la onda ultrasónica, y con ello se detecta la distancia al imán por el tiempo en recibir la onda de rebote. La instalación se realiza en el cilindro y las señales que se emiten son analógicas.

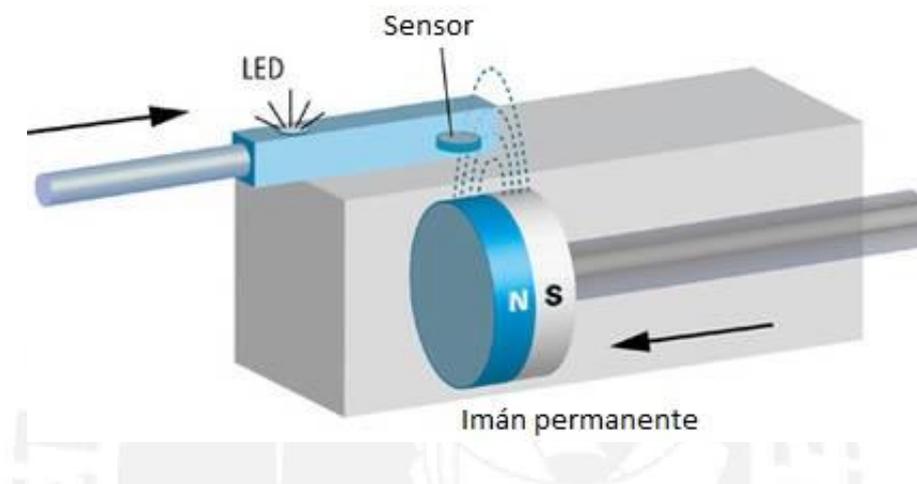


**Figura A.27:** Sensor de posición lineal magnetorestrictivo [70].

Con ello se puede elaborar un tipo de control teniendo la realimentación de la posición del émbolo. Su desventaja es que se debe maquinar el cilindro existente para que pueda montarse el sensor en su interior.

c. Sensor de posición interno para cilindro hidráulico

Este tipo de sensor elimina la necesidad del imán interno y es reemplazado por la tecnología de Efecto Hall. Esto se lleva a cabo con la posición de un pistón permanente con el pistón. El magneto propaga un campo magnético a través de la capa de acero del cilindro, obteniéndose así la posición del sensor. La ventaja es que no se necesita de maquinar el vástago y el grado de exactitud es de  $\pm 0.5\text{mm}$ .



**Figura A.28:** Modo de funcionamiento del sensor de posición externo por efecto Hall [71].

Anexo B: Lista de Exigencias

**Tabla B.1:** Lista de exigencias para la automatización de la maquinaria

LISTA DE EXIGENCIAS			Pág. 1 de 1
			Edición: 5
PROYECTO:	PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA		Fecha:26.04.16
			Elaborado: 04.04.2016
FECHA DE MODIFICACIÓN	EXIGENCIA O DESEO	CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
<b>ASPECTOS GENERALES</b>			
05/04/2016	E	Función Principal	El sistema mecatrónico deberá brindar la seguridad del trabajador limitando su ingreso a las zonas de riesgo
26/04/2016	E	Función Principal	El brazo del equipo de 1 grado de libertad deberá tener la capacidad de ser posicionada para la perforación
26/04/2016	E	Función Principal	El equipo deberá perforar los hoyos de forma automática en un área de 40 m <sup>2</sup>
05/04/2016	E	Geometría	Los sensores y equipamiento para el sistema automatizado deberán de ser lo suficientemente pequeños para ser anclados a los componentes del jumbo
<b>ASPECTOS DE ELECTRICIDAD Y ELECTRÓNICA</b>			
09/04/2016	E	Energía	Los sensores y equipamiento van a ser alimentados por la conexión de energía del jumbo de 24V
26/04/2016	E	Sensores	El sistema contará con dos sensores de mapeo en 3D del entorno para detectar obstáculos, con dimensiones de túnel máximos de 6000 mm de alto con 8000 mm de largo
09/04/2016	E	Seguridad	El sistema deberá sensar la presión del sistema en cada momento para detectar puntos críticos
<b>ASPECTOS MECÁNICOS</b>			
05/04/2016	E	Seguridad	El mando deberá tener un sistema de parada de emergencia y de encendido
26/04/2016	E	Seguridad	Los sensores y el sistema mecatrónico deberán tener protección mínima IP67 para soportar el ambiente agresivo subterráneo

ASPECTOS DE CONTROL			
05/04/2016	E	Función Principal	El sistema deberá proveer de 4 cámaras para la correcta operación del jumbo
11/04/2016	E	Seguridad	El sistema deberá contar con sistema anti colisión, alertando al operador en caso de existir obstáculos en la ruta o maniobras que generarían en choque del vehículo
05/04/2016	D	Software	El sistema proveerá un entorno de diseño de perforado



## Anexo C: Estructura de funciones

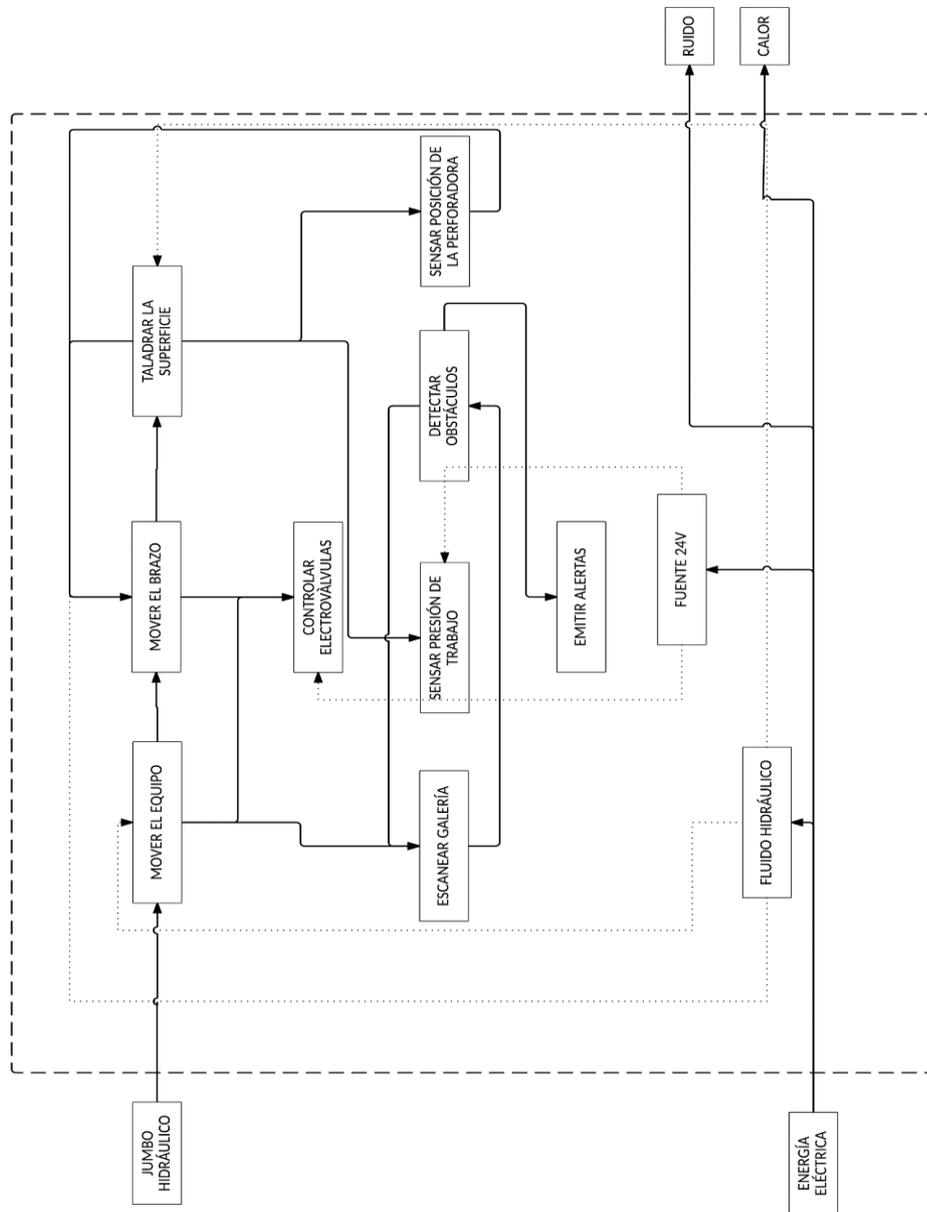
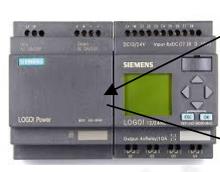
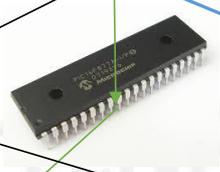
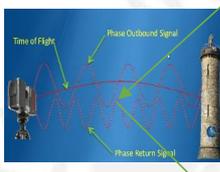
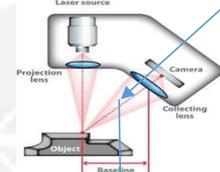
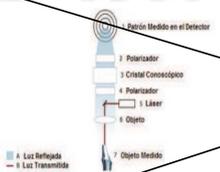
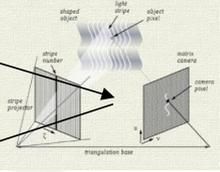
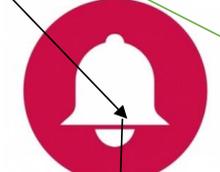
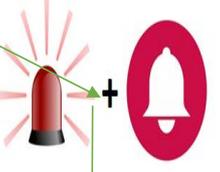
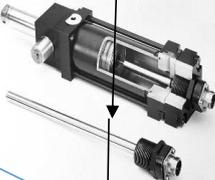
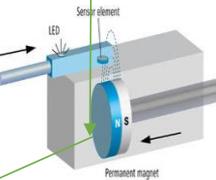
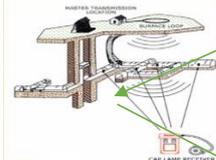
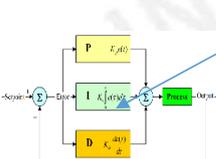
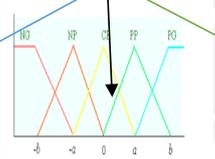
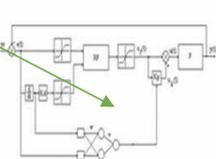
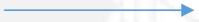


Figura C.1: Estructura de funciones del diseño automatizado

Anexo D: Matriz morfológica

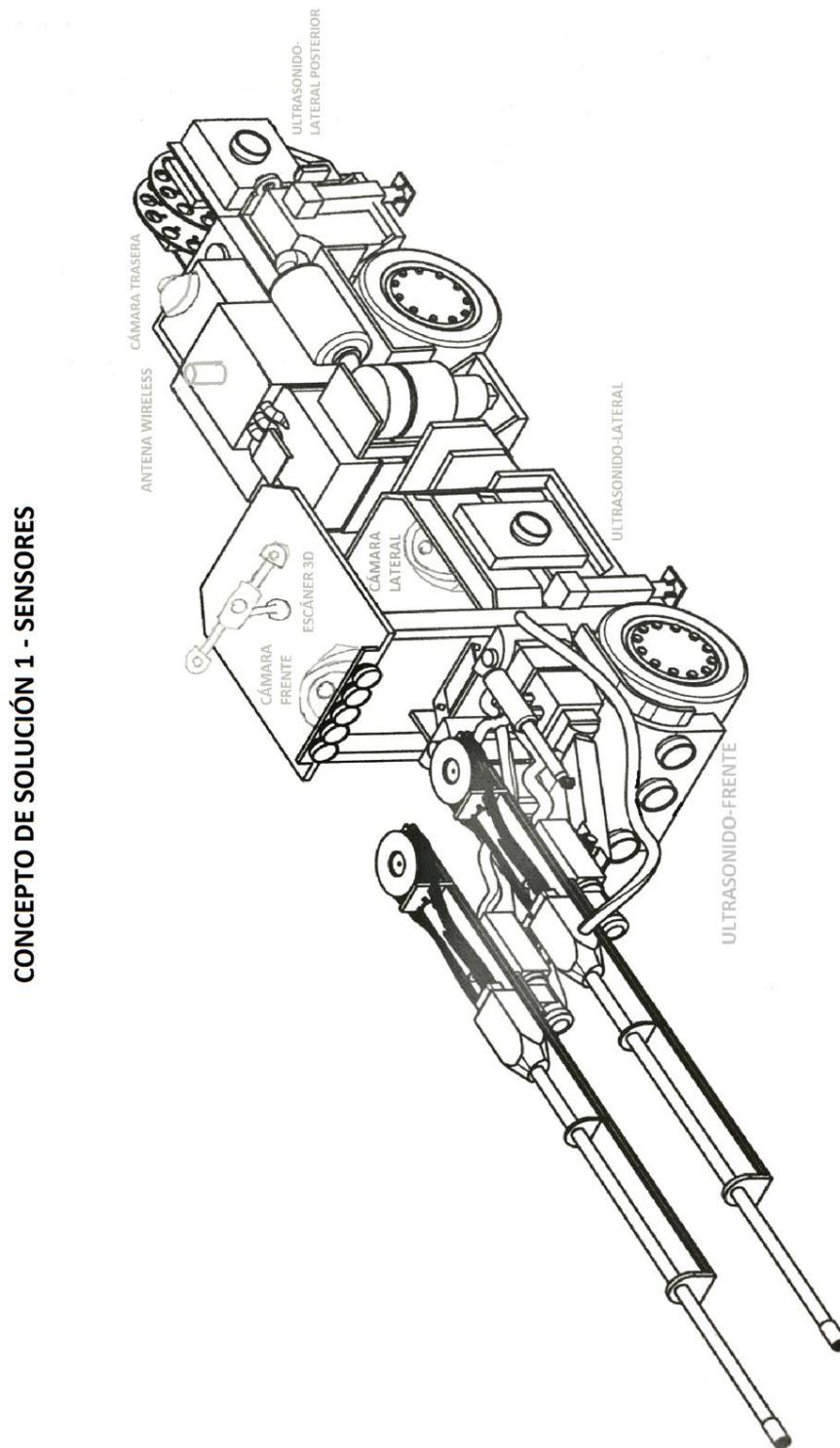
Tabla D.1: Matriz morfológica con los conceptos de solución planteados

FUNCIONES	ALTERNATIVAS DE SOLUCIÓN			
<p>MOVER EL EQUIPO</p>	 <p>Teleoperado estación</p>	 <p>Teleoperado control</p>	 <p>Automático</p>	
<p>CONTROLAR ELECTRO-VÁLVULAS</p>	 <p>PLC</p>	 <p>Microcontroladores</p>	 <p>Computadora</p>	
<p>ESCANEAR GALERÍA</p>	 <p>Tiempo de vuelo</p>	 <p>Triangulación</p>	 <p>Holografía conoscópica</p>	 <p>Luz estructurada</p>
<p>DETECTAR OBSTÁCULOS</p>	 <p>Sensor fotoeléctrico</p>	 <p>Sensor ultrasónico</p>	 <p>Sensor Inductivo</p>	 <p>Sensor Infrarrojo</p>
<p>SENSOR PRESIÓN DE TRABAJO</p>	 <p>Presostato</p>	 <p>Manómetro</p>		
<p>EMITIR ALERTAS</p>	 <p>Alertas visuales</p>	 <p>Alertas sonoras</p>	 <p>Alertas visuales y sonoras</p>	

<p>SENSAR POSICIÓN DE LA PERFORADORA</p>	 <p>Servoválvula</p>	 <p>Sensor lineal interno</p>	 <p>Sensor lineal externo</p>	
<p>COMUNICACIÓN ENTRE SISTEMAS</p>	 <p>Through-The-Earth radio</p>	 <p>Cableado</p>	 <p>Wireless</p>	
<p>ESTRATEGIA DE CONTROL</p>	 <p>PID</p>	 <p>Difuso</p>	 <p>Neurodifuso</p>	
<p>Leyenda</p>				
<p>Solución 1</p>				
<p>Solución 2</p>				
<p>Solución 3</p>				

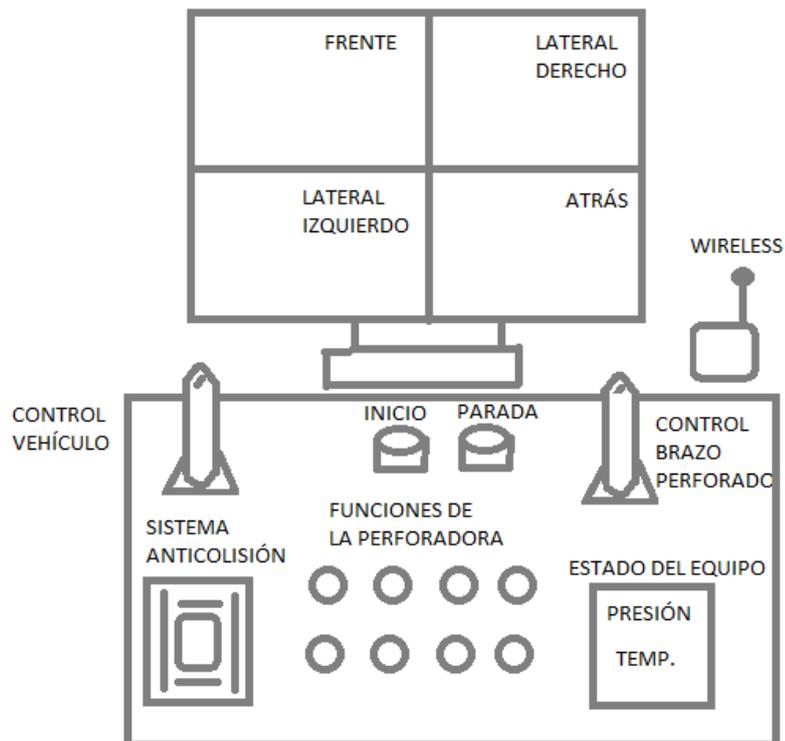
## Anexo E: Conceptos de solución

### 1. Concepto de solución 1



**Figura E.1:** Concepto de solución 1 - maquinaria

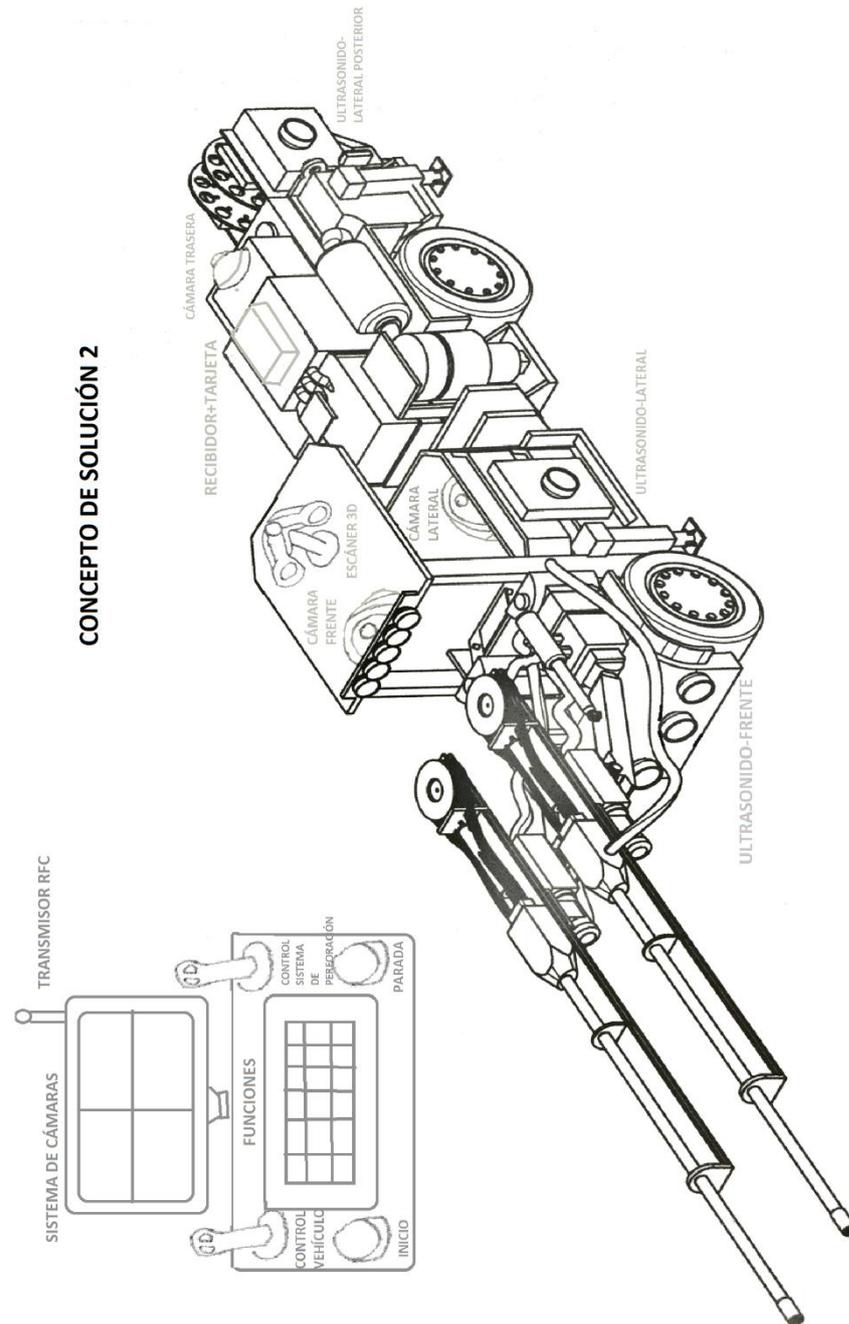
## CONCEPTO DE SOLUCIÓN 1 - MÓDULO DE TELEOPERACIÓN



**Figura E.2:** Concepto de solución 1 – módulo de control

En este concepto de solución se contempla una estación de teleoperación fuera de la labor subterránea, donde el control del equipo y sus funciones se puedan realizar en una computadora, con un tablero de control donde se operen las funciones de avance y posicionamiento del brazo perforador, así como la visualización de 4 frentes de la máquina (frontal, dos laterales y posterior) en una pantalla. Además, funcionará el sistema anticolidión, con los escáneres 3D por triangulación y 4 sensores de ultrasonido con corto alcance. Se mostrará en una pequeña pantalla el estado del equipo con parámetros de presión y temperatura. La comunicación se realizará por antena Wireless, contemplando repetidores en el túnel minero.

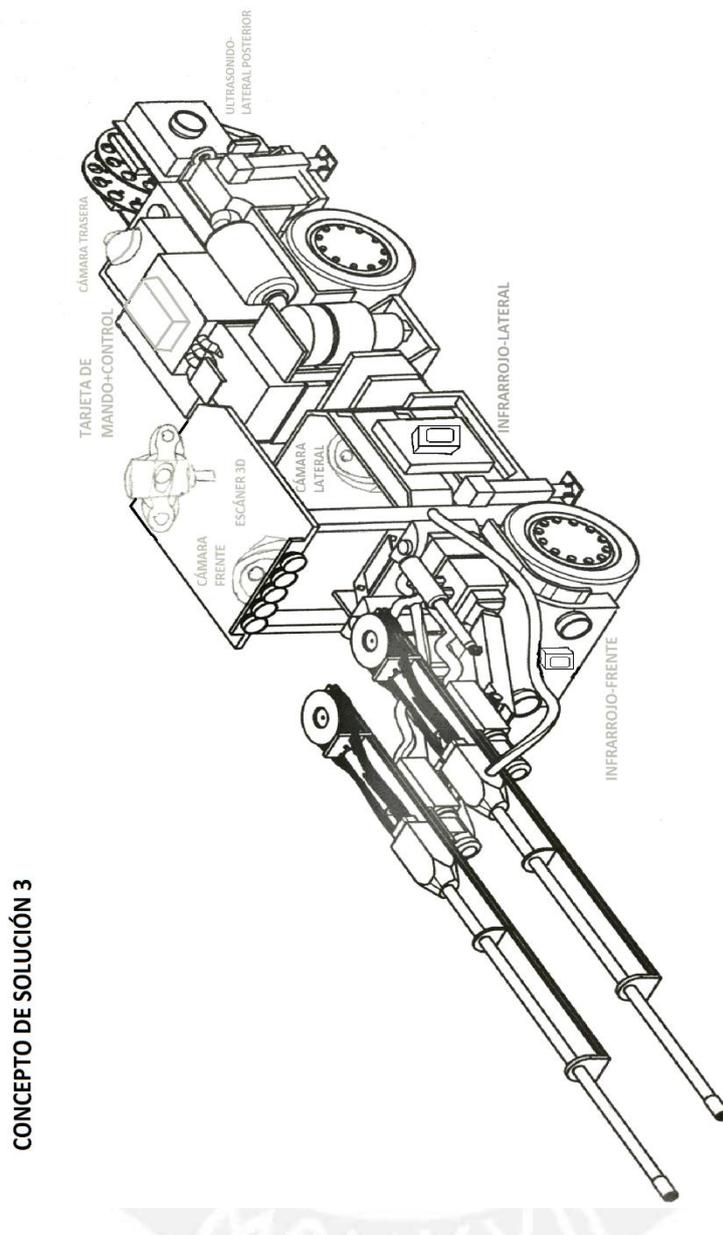
## 2. Concepto de solución 2



**Figura E.3.** Concepto de solución 2 - maquinaria y control

Este concepto de solución contempla el uso de un mando a distancia de teleoperación del equipo, donde se encuentren las funciones básicas visto anteriormente y el control de los actuadores del equipo para su posición y movimiento. En el equipo se contempla un escáner TOF 3D y 4 sensores ultrasónicos de corto alcance. La posición del vástago del cilindro hidráulico que controla la posición del brazo perforador estará controlada por un sensor lineal externo. Se cuenta con 4 cámaras en todos los frentes para su visualización en el mando a distancia, con comunicación por radiofrecuencia.

### 3. Concepto de solución 3



**Figura E.4:** Concepto de solución 3

Este concepto de solución contempla un control automático del manejo del equipo, así como la función de perforado. Se posee una tarjeta de control y otra de potencia posicionada en el lado posterior del equipo para su control total. Se compone con un escáner 3D de luz estructurada y 6 sensores infrarrojos, para la mejora del sistema anti-colisión. La posición del vástago del cilindro hidráulico que controla la posición del brazo perforador estará controlada por un sensor lineal interno. Se cuenta con 4 cámaras en todos los frentes para su visualización, que cuentan con procesamiento de imágenes y un sistema de posicionamiento global para el control de la velocidad del vehículo. Toda la comunicación es serial con protocolo RS 232.

Anexo F: Evaluación técnico-económica de las soluciones

1. Evaluación Técnica

**Tabla F.1:** Evaluación técnica del sistema

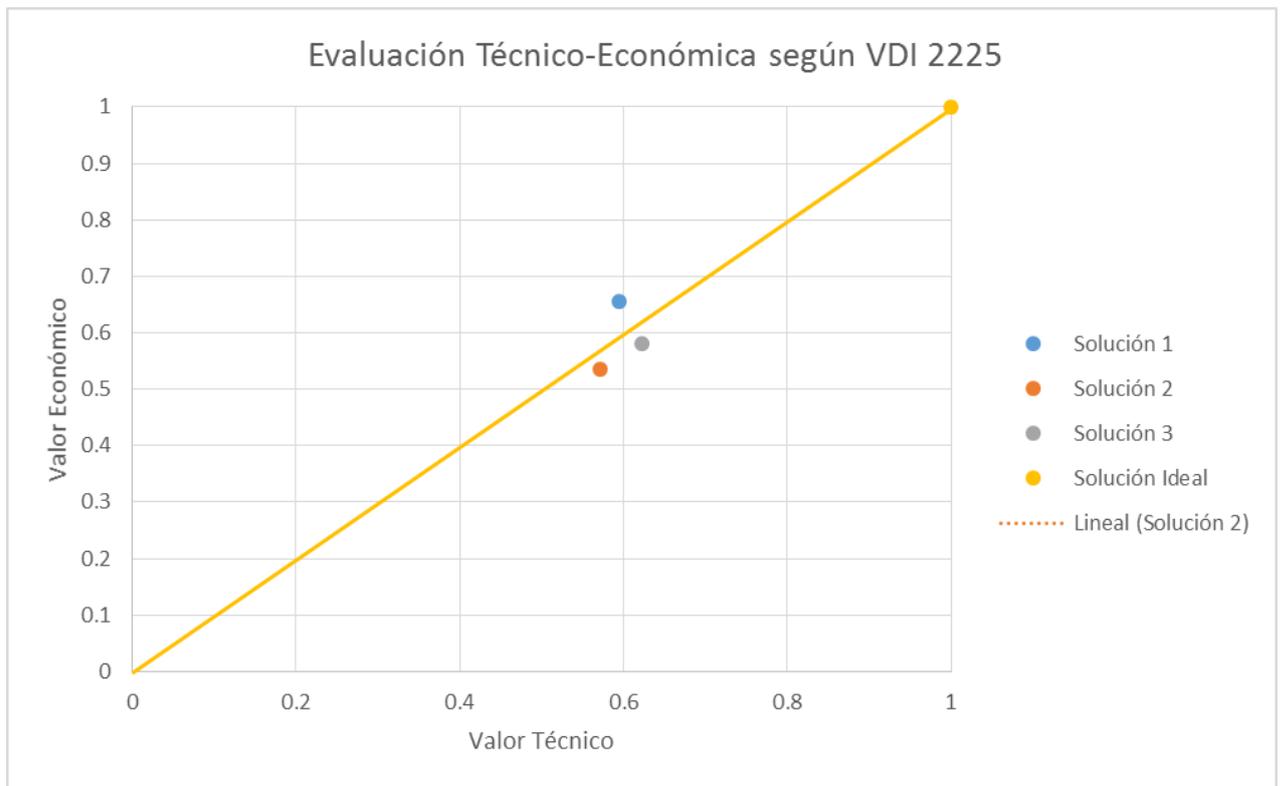
DISEÑO MECÁNICO - EVALUACIÓN DE PROYECTOS										Área de Diseño y Manufactura			
<b>Proyecto:</b> Perforadora de rocas automatizada para la minería profunda													
Escala de valores según VDI 2225 con puntaje <b>p</b> de 0 a 4:													
0=No Satisface, 1=Apenas aceptable, 2=Suficiente, 3=Bien, 4= Muy bien(ideal)													
Criterios técnicos de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos													
Variantes de Concepto/Proyectos			S <sub>1</sub>			S <sub>2</sub>			S <sub>3</sub>			S <sub>ideal</sub>	
N°	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	
1	Función	10	2	20	3	30	2	20	4	40			
2	Forma	8	3	24	3	24	2	16	4	32			
3	Diseño	9	2	18	2	18	3	27	4	36			
4	Seguridad	9	2	18	3	27	3	27	4	36			
5	Ergonomía	8	2	16	2	16	3	24	4	32			
6	Fabricación	7	2	14	2	14	2	14	4	28			
7	Montaje	9	3	27	2	18	3	27	4	36			
8	Transporte	6	3	18	3	18	3	18	4	24			
9	Uso	9	3	27	2	18	2	18	4	36			
10	Mantenimiento	9	2	18	1	9	2	18	4	36			
Puntaje Máximo			200			192			209			336	
Valor Técnico			0.5952381			0.5714286			0.6220238			1	
Orden			2			3			1				
S <sub>i</sub> Soluciones / g Peso Ponderado / p Puntaje / x <sub>i</sub> Valor técnico / y <sub>i</sub> Valor económico													

## 2. Evaluación Económica

**Tabla F.2:** Evaluación económica del sistema

DISEÑO MECÁNICO - EVALUACIÓN DE PROYECTOS										Área de Diseño y Manufactura		
<b>Proyecto:</b> Perforadora de rocas automatizada para la minería profunda												
Escala de valores según VDI 2225 con puntaje <b>p</b> de 0 a 4:												
0=No Satisface, 1=Apenas aceptable, 2=Suficiente, 3=Bien, 4= Muy bien(ideal)												
Criterios técnicos de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos												
Variantes de Concepto/Proyectos			S <sub>1</sub>			S <sub>2</sub>			S <sub>3</sub>		S <sub>ideal</sub>	
N°	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp
1	Diseño	10	2	20	2	20	2	20	2	20	4	40
2	Fabricación	7	3	21	2	14	2	14	2	14	4	28
3	Transporte	7	3	21	3	21	3	21	3	21	4	28
4	Mantenimiento	9	2	18	2	18	3	27	3	27	4	36
5	Costos	8	3	24	2	16	2	16	2	16	4	32
6	Plazos	9	3	27	2	18	2	18	2	18	4	36
Puntaje Máximo			131			107			116		200	
Valor Económico			0.655			0.535			0.58		1	
Orden			1			3			2			
S <sub>i</sub> Soluciones / g Peso Ponderado / p Puntaje / x <sub>i</sub> Valor técnico / y <sub>i</sub> Valor económico												

### 3. Evaluación de las soluciones



**Figura F.1:** Evaluación técnico-económica de las soluciones presentadas.

De acuerdo al diagrama de solución según VDI 2225 se llega a la conclusión de que la solución 1 tiene un mejor balance técnico económico.

## Anexo G: Cálculos de componentes electrónicos

### 1. Cálculo del consumo de los componentes de control

El cálculo de la corriente máxima que deberá proveer el regulador de voltaje de 12Vdc se calculará de acuerdo a la cantidad de pines por la corriente máxima, la cual es de 20mA:

$$54 \text{ pines} \times 20 \text{ mA} = 1.08 \text{ A} \times 2 \text{ Arduinos} = 2.16 \text{ A}$$

$$\text{Sobrecarga: } 2.16 \times 1.25 = 2.7 \text{ A}$$

### 2. Cálculo de los componentes del regulador de voltaje LM2576-5

$$V_{in} = 24 \text{ V}$$

$$V_{reg} = 5 \text{ V}$$

$$I_{carga} = 2.7 \text{ A}$$

Del datasheet del integrado LM2576, se obtiene el valor recomendado del inductor.

$$L = 150 \text{ uH @ } 2.7 \text{ A}$$

Condensador:

$$C_{in} = 100 \text{ uF, } 25\text{V Vishay (por recomendación del fabricante)}$$

Cout:

$$C_{OUT} \geq 13300 * \frac{V_{IN}(Max)}{V_{OUT} * L(\mu H)} (\mu F) \quad (2.1)$$

$$C_{OUT} \geq 13300 * \frac{24}{5 * 150} = 425.6 \mu F \quad (2.2)$$

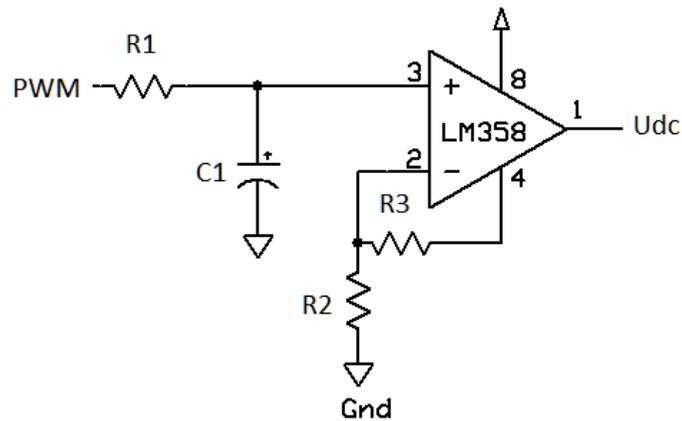
Escogeremos un capacitor electrolítico de 680 uF de la marca Panasonic.

Diodo de protección:

Por catálogo se escoge el diodo 1N5821 (30V – 3A) de la marca SCHOTTKY

### 3. Cálculo del convertidor de señal PWM a analógica

Siendo una señal de entrada PWM de 0-5Vdc, se necesita rectificarla y escalarla a 0-24Vdc. Para ello se hará uso de un filtro pasabajos y un amplificador operacional.



**Figura G.1:** Convertidor de señal PWM a analógica.

- Cálculo del filtro pasa-bajos

Para la frecuencia de la señal PWM del Arduino de 31250Hz (8 bit-8Mhz) se calculará el filtro de primer orden con una frecuencia de corte de al menos 20 veces menos la frecuencia de la señal PWM. Esto es para filtrar la señal PWM de la final.

$$F_c < \frac{F_{pwm}}{20} \quad (2.3)$$

$$F_c < \frac{31250Hz}{20} = 1562.5Hz \quad (2.4)$$

Entonces, expresando la frecuencia de corte en términos de la resistencia y la capacitancia del circuito:

$$F_c = \frac{1}{2 * \pi * R1 * C1} \quad (2.5)$$

$$1562.5 = \frac{1}{2 * \pi * R1 * C1} \quad (2.6)$$

Escogiendo una capacitancia de 100nF en (2.6), tenemos:

$$R1 = \frac{1}{2 * \pi * 100 * 10^{-9} * 1562.5} = 1018.59\Omega \quad (2.7)$$

Con una resistencia de 1K alcanza, pero el rizado es de 0.4V, lo cual es contraproducente. Con una resistencia de 10K, el rizado será de 0.04. La constante de tiempo se calcula:

$$\tau = R1 * C1 = 10 * 10^3 * 100 * 10^{-9} = 0.001s \quad (2.8)$$

Tiempo de establecimiento 0-95%:

$$T_{es} = 3 * \tau = 0.003s \quad (2.9)$$

- Cálculo del amplificador operacional

Para que la señal Udc esté en el rango de 0-24Vdc, se necesita amplificarla en un factor:

$$K = \frac{24}{5} = 4.8 \quad (2.10)$$

Para ello las resistencias R2 y R3 deberán tener la siguiente relación:

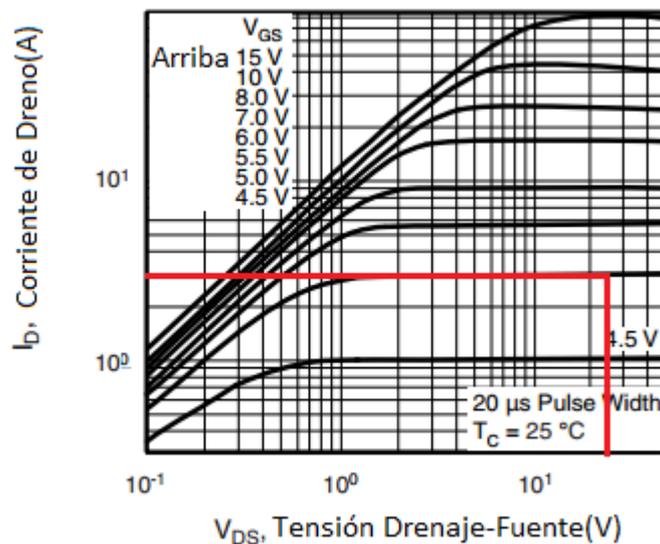
$$K = 1 + \frac{R3}{R2} \quad (2.11)$$

Con (2.10) en (2.11) y escogiendo resistencias comerciales de R2=2.2K y R3=8.2K se tiene K=4.72. Esto quiere decir que la señal de salida será de 0-23.64V, lo cual está dentro de los parámetros de funcionamiento.

#### 4. Cálculo y análisis del transistor para el control de las válvulas ON/OFF

Para el control de estas válvulas se trabajarán con la salida digital del microcontrolador (que va de 0 a 5Vdc) para conectar y desconectar una bobina de 24 VDC, con una corriente de consumo de 0.35A aproximadamente. Para tal fin, se seleccionó el transistor IRF530, el cual tiene las características siguientes para la operación:

A una tensión VDS de 24V y VGS de 5V tenemos una corriente de 2A, suficientes para alimentar la carga. La máxima disipación de calor del componente es de 88W, entonces no se necesitará de un disipador, ya que la carga sólo consume 8W.



**Figura G.2:** Características de conducción del IRF 530 [72].

#### 5. Cálculo del consumo de las válvulas electrohidráulicas

Cada válvula electrohidráulica Danfoss consume 8 W. Considerando 12 de estos elementos, el consumo total del sistema hidráulico adicional será de 96 W.



$$\theta^* = \theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right) \quad (3.1)$$

$$tg(\alpha) = \frac{l_{ac} + l_{bc} \cdot \text{sen}(\theta^*)}{l_{bc} \cos(\theta^*)} \quad (3.2)$$

$$\alpha = \arctg\left(\frac{l_{ac} + l_{bc} \cdot \text{sen}(\theta^*)}{l_{bc} \cos(\theta^*)}\right) \quad (3.3)$$

$$lab * \cos(\alpha) = l_{bc} * \cos(\theta^*) \quad (3.4)$$

Combinando (1.3) y (1.1) en (1.4) y despejando lab

$$lab = \frac{l_{bc} \cdot \cos\left(\theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right)\right)}{\cos\left(\arctg\left(\frac{l_{ac} + l_{bc} \cdot \text{sen}\left(\theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right)\right)}{l_{bc} \cos\left(\theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right)\right)}\right)\right)} \quad (3.5)$$

Dado que lab cambiará de longitud, debido a que el cilindro se extenderá para poder inclinar el brazo, se tendrán dos componentes:

$$lab = lab^* + x \quad (3.6)$$

Entonces, combinando las ecuaciones (3.6) en (3.5) se tiene finalmente:

$$x = \left( \frac{l_{bc} \cdot \cos\left(\theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right)\right)}{\cos\left(\arctg\left(\frac{l_{ac} + l_{bc} \cdot \text{sen}\left(\theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right)\right)}{l_{bc} \cos\left(\theta - \arctg\left(\frac{lb_d}{l_{cd}}\right)\right)}\right)\right)} \right) - lab^* \quad (3.7)$$

A esta ecuación se la nombrará: "Transformación geométrica 1".

Dado que se quiere controlar el movimiento vertical del brazo, debemos de realizar una transformación de la posición deseada en un ángulo de inclinación. Para esta tesis, se tomará como referencia el centro de gravedad del brazo perforador.

Entonces se tiene:

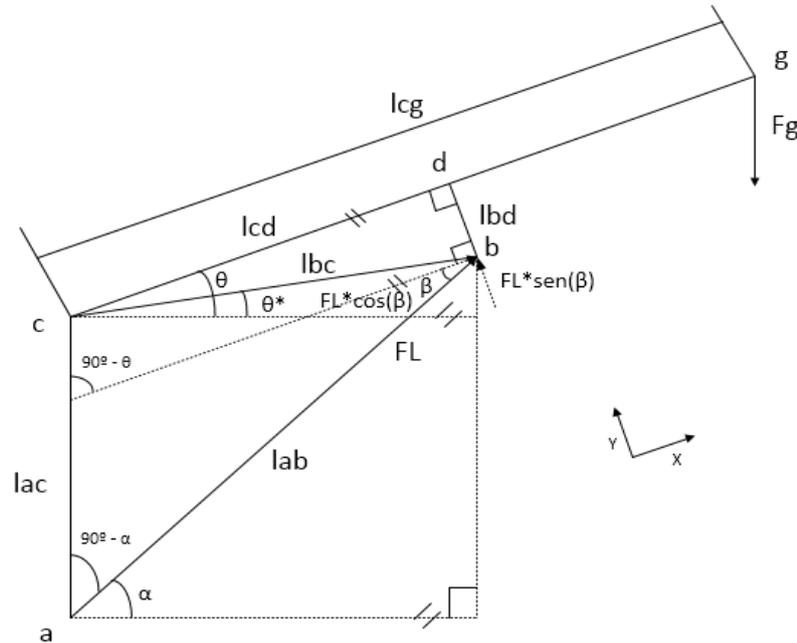
$$p_y = l_g * \text{sen}(\theta) \quad (3.8)$$

$$\theta = \arcsen\left(\frac{p_y}{l_g}\right) \quad (3.9)$$

A esta ecuación se la denominará: "Transformación geométrica 2"

## 1.2. Análisis cinemático del brazo

Se determinará el balance de momentos que deberá ser alcanzado por el brazo perforador para su posicionamiento con una velocidad constante.



**Figura H.3:** Esquema de fuerzas del brazo perforador

Del gráfico:

$$(90 - \alpha) + \beta = 90 - \theta \quad (4.1)$$

Despejando  $\beta$  en (4.1):

$$\beta = \alpha - \theta \quad (4.2)$$

$$Fg = Mc * g \quad (4.3)$$

Se calculan los momentos con respecto al punto fijo C

$$FL * \text{sen}(\beta) * lcd + FL * \text{cos}(\beta) * lbd - Fg * lcg * \text{cos}(\theta) \quad (4.4)$$

Combinando (2.2), (2.3), (1.1) y (1.3) en (2.4) y despejando FL:

$$FL = \frac{Mc * g * lcg * \text{cos}(\theta)}{lcd * \text{sen} \left( \arctg \left( \frac{lac + lbc * \text{sen} \left( \theta - \arctg \left( \frac{lbd}{lcd} \right) \right)}{lbc * \text{cos} \left( \theta - \arctg \left( \frac{lbd}{lcd} \right) \right)} \right) - \theta \right) + lbc * \text{cos} \left( \arctg \left( \frac{lac + lbc * \text{sen} \left( \theta - \arctg \left( \frac{lbd}{lcd} \right) \right)}{lbc * \text{cos} \left( \theta - \arctg \left( \frac{lbd}{lcd} \right) \right)} \right) - \theta \right)} \quad (4.5)$$

A esta ecuación se la nombrará: "Transformación geométrica 3".

2. Modelamiento del sistema de control del sistema hidráulico

Tomando como base la figura 68, se plantearán las distintas ecuaciones para el control del cilindro hidráulico y su servo válvula.

Ecuaciones de flujo en la servo válvula [29]:

$$Q_{L1} = C_q * W * x_V \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_S - P_1)} \quad (5.1)$$

$$Q_{L2} = C_q * W * x_V \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_2)} \quad (5.2)$$

Linealizando las ecuaciones (5.1) y (5.2) en los puntos de operación (P.O.):

$$Q_{L10} = 0$$

$$Q_{L20} = 0$$

$$P_{10} = 0$$

$$P_{20} = 0$$

$$x_{V0} = 0$$

$$Q_{L1} = K_{q1} * x_V - K_{c1} * P_1 \quad (5.3)$$

$$Q_{L2} = K_{q2} * x_V + K_{c2} * P_2 \quad (5.4)$$

Donde:

$$K_{q1} = \left. \frac{\partial Q_{L1}}{\partial x_V} \right|_{P.O.}$$

$$K_{q1} = C_q * W * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_S - P_{10})} \quad (5.5)$$

$$K_{q2} = \left. \frac{\partial Q_{L2}}{\partial x_V} \right|_{P.O.}$$

$$K_{q2} = C_q * W * \sqrt{\frac{2}{\rho} * (P_{20})} \quad (5.6)$$

$$K_{c1} = - \left. \frac{\partial Q_{L1}}{\partial P_1} \right|_{P.O.}$$

$$K_{c1} = \frac{C_q * W * x_V}{\sqrt{2 * \rho * (P_S - P_{10})}} \quad (5.7)$$

$$K_{c2} = - \left. \frac{\partial Q_{L2}}{\partial P_2} \right|_{P.O.}$$

$$K_{c2} = \frac{C_q * W * x_V}{\sqrt{2 * \rho * P_{20}}} \quad (5.8)$$

Ecuación de continuidad de flujo en el cilindro hidráulico [29]:

$$Q_{L1} = A_1 * \dot{x} + \frac{V_1}{\beta} * \dot{P}_1 \quad (5.9)$$

$$-Q_{L2} = -A_2 * \dot{x} + \frac{V_2}{\beta} * \dot{P}_2 \quad (5.10)$$

Combinando (5.3) en (5.9) y (5.4) en (5.10)

$$K_{q1} * x_V - K_{c1} * P_1 = A_1 * \dot{x} + \frac{V_1}{\beta} * \dot{P}_1 \quad (5.11)$$

$$K_{q2} * x_V + K_{c2} * P_2 = A_2 * \dot{x} - \frac{V_2}{\beta} * \dot{P}_2 \quad (5.12)$$

Segunda ley de Newton en el cilindro hidráulico:

$$A_1 * P_1 - A_2 * P_2 - B_p * \dot{x} - FL = (M_c + M_t) * \ddot{x} \quad (5.13)$$

Dinámica de la servo válvula de primer orden [30]:

$$\dot{x}_V = \frac{-1}{\tau} * x_V + \frac{K_{sp}}{\tau} * u \quad (5.14)$$

Considerando la matriz de estados siguiente:

$$[x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5]^T = [x \quad \dot{x} \quad x_V \quad P_1 \quad P_2]^T \quad (5.15)$$

Reemplazando los estados (5.15) en las ecuaciones (5.11), (5.12), (5.13) y (5.14)

$$K_{q1} * x_3 - K_{c1} * x_4 = A_1 * x_2 + \frac{V_1}{\beta} * \dot{x}_4$$

$$\dot{x}_4 = \frac{\beta * K_{q1}}{V_1} * x_3 - \frac{\beta * K_{c1}}{V_1} * x_4 - \frac{\beta * A_1}{V_1} * x_2 \quad (5.16)$$

$$K_{q2} * x_3 + K_{c2} * x_5 = A_2 * x_2 - \frac{V_2}{\beta} * \dot{x}_5$$

$$\dot{x}_5 = -\frac{\beta * K_{q2}}{V_2} * x_3 - \frac{\beta * K_{c2}}{V_2} * x_5 + \frac{\beta * A_2}{V_2} * x_2 \quad (5.17)$$

$$A_1 * x_4 - A_2 * x_5 - B_p * x_2 - FL = (M_c + M_t) * \dot{x}_2$$

$$\dot{x}_2 = \frac{A_1}{(M_c + M_t)} * x_4 - \frac{A_2}{(M_c + M_t)} * x_5 - \frac{B_p}{(M_c + M_t)} * x_2 - \frac{FL}{(M_c + M_t)} \quad (5.18)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{-1}{\tau} * x_3 + \frac{K_{sp}}{\tau} * u \quad (5.19)$$

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (5.20)$$

$$y = x_1 \quad (5.21)$$

## Anexo I: Código de la simulación del sistema de control en lazo cerrado utilizando Matlab por el método de ubicación de polos

### 1. Programa principal

```
close all;clear all;clc;
% Parámetro de simulación
t = 0:0.01:10;
% entrada
Py=-900*ustep(t)+1800*ustep(t-1)-300*ustep(t-3)-1200*ustep(t-6);
% constantes del sistema hidráulico
D1=0.125;
D2=0.085;
A1=(D1^2*pi)/4;
A2=(D2^2*pi)/4;
V1=A1*0.536/2;
V2=A2*0.536/2;
Bp=0.05;
% masas del vástago y del brazo perforador
Mc=1750;
Mt=8.5;
% parámetros de la válvula proporcional
tau=0.005;
Ksp=0.05;
b=10^9;
Cq=0.65;
W=0.005;
% parámetros del sistema
p=780;
Ps=82*10^5;
% cálculo de las constantes de control
[Kc1,Kc2,Kq1,Kq2]=Constantes(Cq,W,p,Ps);
% constantes geométricas
Lg=2100;
lac=492;
lbd=134;
lcd=1195;
lbc=(lcd^2+lbd^2)^0.5;
lab1=1005;
% transformaciones geométricas del sistema
theta=TG2(Py,Lg);
x=TG1(lac,lbc,lcd,lab1,theta);
% Espacio de estados del sistema
A=[0 1 0 0 0;
    0 -Bp/(Mc+Mt) 0 A1/(Mc+Mt) -A2/(Mc+Mt);
    0 0 -1/tau 0 0;
    0 -b*A1/V1 b*Kq1/V1 -b*Kc1/V1 0;
    0 b*A2/V2 -b*Kq2/V2 0 -b*Kc2/V2];
B=[0;0;Ksp/tau;0;0];
D=[1 0 0 0 0];
% Se tienen dos estados no controlables (P1 y P2) pero
estabilizables
[Ac,Bc,Cc,Tc,k]=ctrbf(A,B,D);
Ad=Ac(4:5,4:5);
Bd=Bc(4:5,1);
Cd=Cc(1,4:5);
```

```

% Parámetros del sistema:máximo sobreimpulso<20%,tiempo de
establecimiento
% <1s
P=[-4+10.71j -4-10.71j ];
% Posicionamiento de los polos y cálculo de ganancias
K1=acker(Ad,Bd,P);
% Control del sistema en lazo cerrado
sys_cl = ss(Ad-Bd*K1,Bd,[1 0],0,'OutputDelay',0.1);
% Escalamiento de la entrada
Nbar = rscale(sys_cl,K1);
% Gráfica de la entrada
[y1]=lsim(sys_cl,Nbar*x,t);
plot(t,y1,t,x);
xlabel('Tiempo (s)')
ylabel('Extensión del vástago del cilindro (mm)')

```

## 2. Transformación geométrica 1

```

function [x] = TG1(lac,lbc,lcd,lab1,theta)

% Esta función devuelve la extensión del vástago a alcanzar
% con respecto al ángulo de inclinación deseada
lbd=(lbc^2-lcd^2)^0.5;
A1=lbc*cos(theta-atan(lbd/lcd));
A2=cos(atan((lac+lbc*sin(theta-atan(lbd/lcd)))/(lbc*cos(theta-
atan(lbd/lcd)))));
x=(A1/A2)-lab1;

end

```

## 3. Transformación geométrica 2

```

function [theta] = TG2(Py,Lg)

% Esta función transforma la posición vertical a alcanzar por el
brazo
% perforador con la inclinación deseada. El punto de referencia
es el
% centro de gravedad del brazo perforador

theta=asin(Py/Lg);

end

```

## Anexo J: Definición del grado/índice de protección acorde a DIN EN IEC60529

Estos niveles de protección están representado por un código, el cual se compone de dos letras constantes “IP” y dos números indicando el grado de protección. En la imagen siguiente se muestran los distintos índices de protección contenidos en la norma mencionada:

Grado de protección contra la introducción de cuerpos sólidos			Grado de protección al agua		
Primer Índice	Descripción	Alcance de la protección	Segundo Índice	Descripción	Alcance de la Protección
0	<b>Sin protección</b>	Sin especial protección para personas contra un contacto directo de piezas móviles internas y las externas con vida. Sin protección a los equipamientos contra el ingreso de objetos sólidos externos.	0	<b>Sin protección</b>	Sin ninguna protección especial
1	<b>Protección contra los cuerpos sólidos grandes</b>	Protección contra el contacto accidental de grandes áreas con vida y partes interiores con movimiento, por ejemplo: la parte posterior de la mano. Pero sin protección contra el acceso deliberado del mismo. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor que 50 mm.	1	<b>Protección contra el goteo de agua vertical (condensación)</b>	La caída vertical de gotas de agua no debe causar daños
2	<b>Protección contra los cuerpos sólidos medianos</b>	Protección contra el contacto entre los dedos y las partes interiores móviles. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 12,5mm.	2	<b>Protección contra el goteo de agua inclinada verticalmente</b>	La caída de gotas de agua con hasta un ángulo de 15° de la vertical desde cualquier dirección, no debe causar daño.
3	<b>Protección contra los cuerpos sólidos pequeños</b>	Protección contra el contacto entre las piezas móviles internas y herramientas, cables, hilos... con un espesor mayor a 2,5mm. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 2,5mm.	3	<b>Protección contra agua en spray</b>	La caída de gotas de agua con hasta un ángulo de 60° de la vertical desde cualquier dirección, no debe causar daño. (lluvia)
4	<b>Protección contra los cuerpos sólidos muy pequeños (granulados)</b>	Protección contra el contacto entre las piezas móviles interiores y herramientas, cables, hilos... con un espesor mayor a 1mm. Protección contra el ingreso de objetos sólidos con un diámetro mayor a 1mm.	4	<b>Protección contra las salpicaduras de agua</b>	Las salpicaduras de agua desde cualquier dirección, no deben de causar daños al interior.
5	<b>Protección contra los residuos de polvo</b>	Protección contra el contacto entre las piezas móviles interiores y el ingreso de polvo. El ingreso no se previene completamente, pero el polvo no puede penetrar en tales cantidades que puedan afectar al funcionamiento correcto del mismo.	5	<b>Protección contra chorros de agua de cualquier dirección con manguera</b>	Los chorros de agua producidos con manguera y desde cualquier dirección, no deben de causar daño al interior.
6	<b>Protección total contra la penetración de cualquier cuerpo sólido (estanqueidad)</b>	Protección total contra el contacto de las piezas móviles interiores. Protección contra cualquier ingreso de polvo.	6	<b>Protección contra inundaciones</b>	La cantidad de agua que se introduzca, en casos de inundación esporádica o temporal, no debe dañar el interior, por ejemplo, los golpes de mar.
			7	<b>Protección contra la inmersión temporal</b>	La cantidad de agua que se introduzca, en caso de sumergir el equipamiento en específicas condiciones de presión entre 1 y 30 minutos, no debe dañar las piezas internas del mismo.
			8	<b>Protección durante inmersión continua</b>	El agua que se pueda introducir, si sumergimos el equipamiento al menos con 2 horas y con una presión de 2 bares (para los racores HelaGuard IP68 No Metálicos) y de 5 horas y con una presión de 5 bares (para los racores HelaGuard IP68 Metálicos), no deben producir daño en el interior.
			9k	<b>Protección contra la introducción de agua usando pistolas de limpieza de alta presión</b>	El agua que se introduzca en el interior, producida al utilizar pistolas de limpieza con agua de alta presión, no deben causar daño interior.

Figura J.1: Grados de protección contra la introducción de cuerpos sólidos y contra el agua [73].

## Anexo K: Cotizaciones



SAMCON Prozessleittechnik GmbH · Schillerstrasse 17 · 35102 Lohra

HDI SAC  
Mr Pizaro Mendoza  
Av. Elmer Faucett 725  
22435 Callao  
PERU

Schillerstrasse 17  
35102 Lohra

Phone: +49 6426 9231 83  
Fax: +49 6426 9231 31  
E-Mail: h.helland@samcon.eu

### OFFER

Number: 101399  
Date: 16.06.2016  
Commission: 16290  
Customer-No.: 10651

Dear Mr Mendoza,

According to your inquiry, please find below our non-binding offer. In case you have any queries, please feel free to contact us at any time.

Pos.	Qty.	Description	Price	Discount	Total EUR
1	4	ExCam IPM3014 T03-AL-C-005-K-L Network camera in an aluminum housing in accordance with Directive 2014/34/EU (ATEX) Minimal illumination: 1.0 lx Horizontal angle: 80° fix Video compression: H.264, MJPEG Resolution: 1280 x 800 to 160 x 90 Power supply: PoE, IEEE 802.3af Klasse 1 Max. power: 3.84W Explosion protection (gas): Ex II 2G Ex d IIC T6 Gb Explosion protection (dust): Ex II 2D Ex t IIIIC T80°C Db IP67 Protection level: IP 67 (IEC / EN 60529) Ambient temperature limit: -20°C < Tamb < 50°C See data sheet for technical data - www.samcon.eu Product group: A, tariff number: 8525 8019 5 m of the applicable digital system cable are already included	2.298,00	20,00%	7.353,60
		<b>**Optional**</b>			
2	4	Wall bracket WMB-S-AL (stainless steel) Manual pan angle: 360° Manual tilt angle: 90° Includes hinge and mounting material. Product group: A, tariff number: 8529 9092	160,00	20,00%	512,00
		<b>**Optional**</b>			
3	4	Hood WPR-AL (stainless steel) Includes mounting material. Product group: A, tariff number: 8529 9092	80,00	20,00%	256,00
		<b>**Optional**</b>			
4	0	SKD02-T System cable digital (price per meter) Special explosion proof wiring in accordance with DIN EN 60079-14. Outer diameter: ø 9,1 ±0.2 mm Maximum bending radius: 10 mm Material outer cable sheath: PUR - flame retardant in accordance with IEC 60322-1-2 1KW flame Composition: 4 x 2 x AWG22/1 shielded Temperature range (fixed installation): -60°C to +80°C Perfect for PoE cameras and cameras with normal power supply. See data sheet for technical data - www.samcon.eu Product group: A	8,00	20,00%	0,00
		<b>**Optional**</b>			
5	4	Ex-e terminal box ExTB-2 Terminal box for analog and digital ExCam systems Gas - Explosion proof: Ex II 2 G Ex e II T6 Dust - Explosion proof: Ex II 2 D Ex tD A21 IP66 Material: Polyester resin, dimensions: 115 mm x 115 mm x 64 mm Protection level: IP 66 Ambient temperature limit: - 60°C to + 55°C Max. power supply: 690 V Max. diameter: 2.5 mm² 10 pcs. terminal clamp UT 2,5, description: 1-10 2 pcs. conductor terminal USLKG 5 1 pc. TS35 carrier rail TS35 100 mm 2 pcs. M20 screw connection (bw) Product group: C	98,00	10,00%	352,80
<b>Total amount:</b>					<b>7.353,60</b>

Figura K.1: Cotización por las cámaras IPM 3014 SamCom y accesorios



**Cotizacion No: 22098**

FECHA: 01/09/2016

Razon Social **ABB S.A.**  
 Direccion : AV. ARGENTINA NRO. 3120 Z.I.  
 LIMA 01 - CERCADO  
 CONDICIONES: CONTADO  
 SUCURSAL : NO TIENE SUCURSAL  
 ATENCION : SR. PIERO MENDOZA  
 TRANSPORTE : 20510942559

Ruc : 20100022142  
 TELEFONO: 4155100 anx 1113 pagos  
 VENDEDOR: JHONNY HUAMAN  
 DSCTO : 0 + 0  
 LISTA : 1 - LISTA DOLARES  
 OT: REF:

HDI S.A.C.

Codigo	Descripcion	Cantidad	P.UNIT	DSCT+	DSCT	TOTAL
* 157B5311	TAPA ENTRADA PVP-32 CENTRO CERRADO	11.00	541.12	30.00%		4,166.62
* 157B6130	CUERPO VCHECK S/COMP/S=PVB-32	11.00	409.29	30.00%		3,151.53
* 157B2100	VALVULA CHOQ/AC 100BAR=PVG-32	1.00	62.08	30.00%		43.46
* 157B2175	VALVULA CHOQ/AC 175BAR=PLVP-32	1.00	51.26	30.00%		35.88
* 157B2190	VALVULA CHOQ/AC 190BAR=PLVP-32	4.00	64.99	30.00%		181.97
* 157B2080	VALVULA CHOQ/AC 80BAR=PVG-32	7.00	62.08	30.00%		304.19
* 157B2150	VALVULA CHOQ/AC 150BAR=PLVP-32	9.00	62.08	30.00%		391.10
* 157B7004	SPOOL CIL 100LPM S/LS=PVG-32	11.00	76.44	30.00%		588.59
* 157B2014	TAPA FINAL BSPP=PVSI-32	11.00	149.76	30.00%		1,153.15
157B8003	KIT ARMADO 3CPOS=PVAS-32	1.00	66.14	30.00%		46.30
157B4228	ACTUADOR ON/OFF 24V=PVEO-32	7.00	430.98	30.00%		2,111.80
157B4128	ACTUADOR MED/PROP 24V=PVEM-32	4.00	866.30	30.00%		2,425.64
* 97036	Armar Comando de Valvulas PVG.	1.00	111.04	%		111.04
* 88H01	Insumo Hidráulico	1.00	37.33	%		37.33
* 97039	Prueba Hid. C.adic. Valv. PVG	11.00	28.83	%		317.13
* 162F1310	JOYSTICK PVRE 2F PROP + 2 ON-OFF	2.00	598.53	30.00%		837.94
* 155U2600	CONECTOR JOYSTICK PVREL	2.00	50.91	30.00%		71.27
<b>V. VENTA</b>						<b>15,974.94</b>
<b>IGV</b>						<b>2,875.49</b>
<b>TOTAL US\$</b>						<b>18,850.43</b>

PREPARADO POR

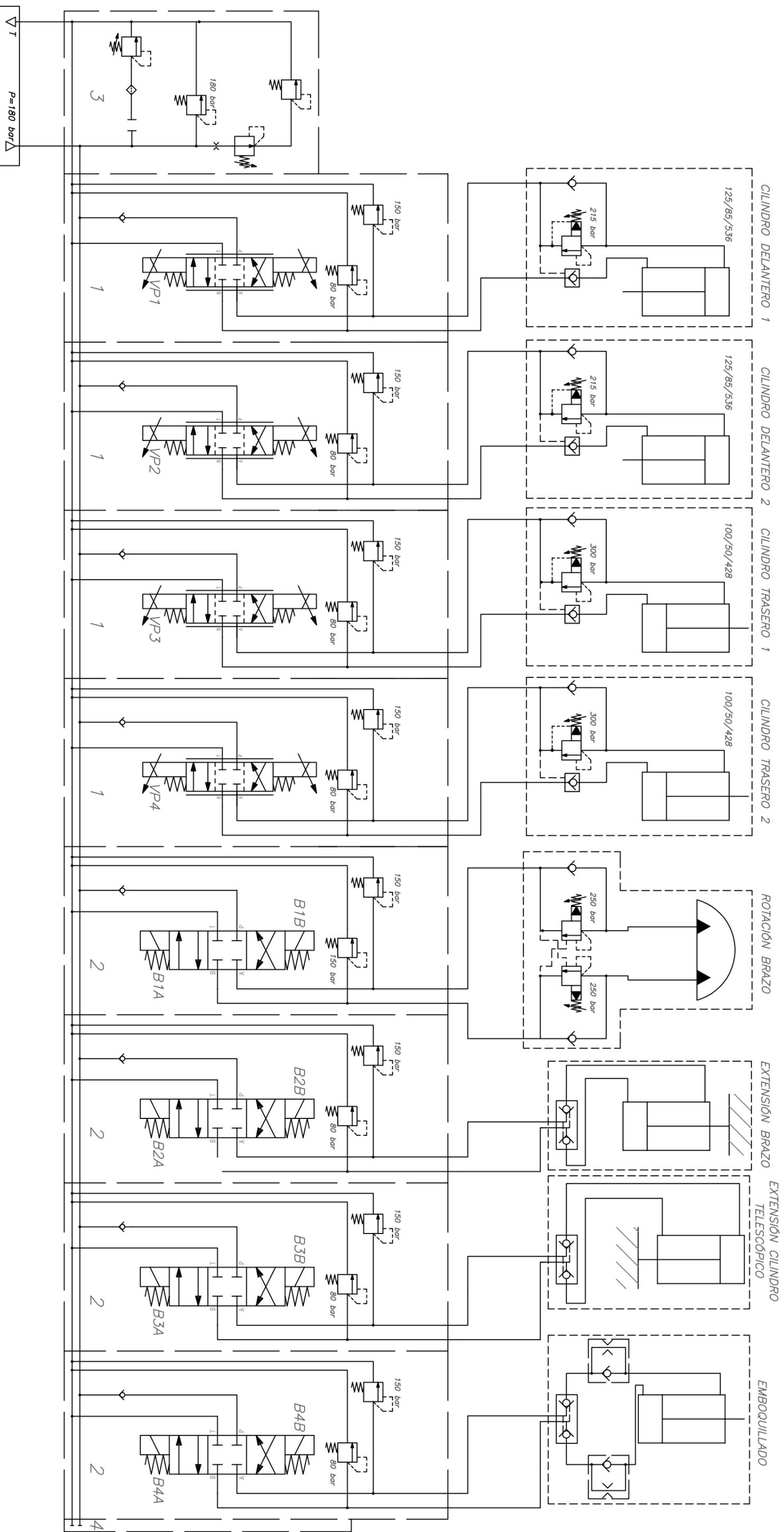
VERIFICADO POR

**OBSERVACIONES**

- Validez de la Oferta 15 dias
- Stock sujeto a variación

Figura K.2: Cotización por los elementos Danfoss





PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

PERFORADORA DE ROCAS TELEOPERADA PARA LA  
MINERÍA PROFUNDA, CON CONTROL AUTÓNOMO DEL  
BRAZO HIDRÁULICO EN UN GRADO DE LIBERTAD

ESCALA

A3

COMANDO DE VÁLVULAS PARA EL MOVIMIENTO DEL

BRAZO PERFORADOR

FECHA:  
13/09/2016

ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO FABRIZIO

LAMINA:

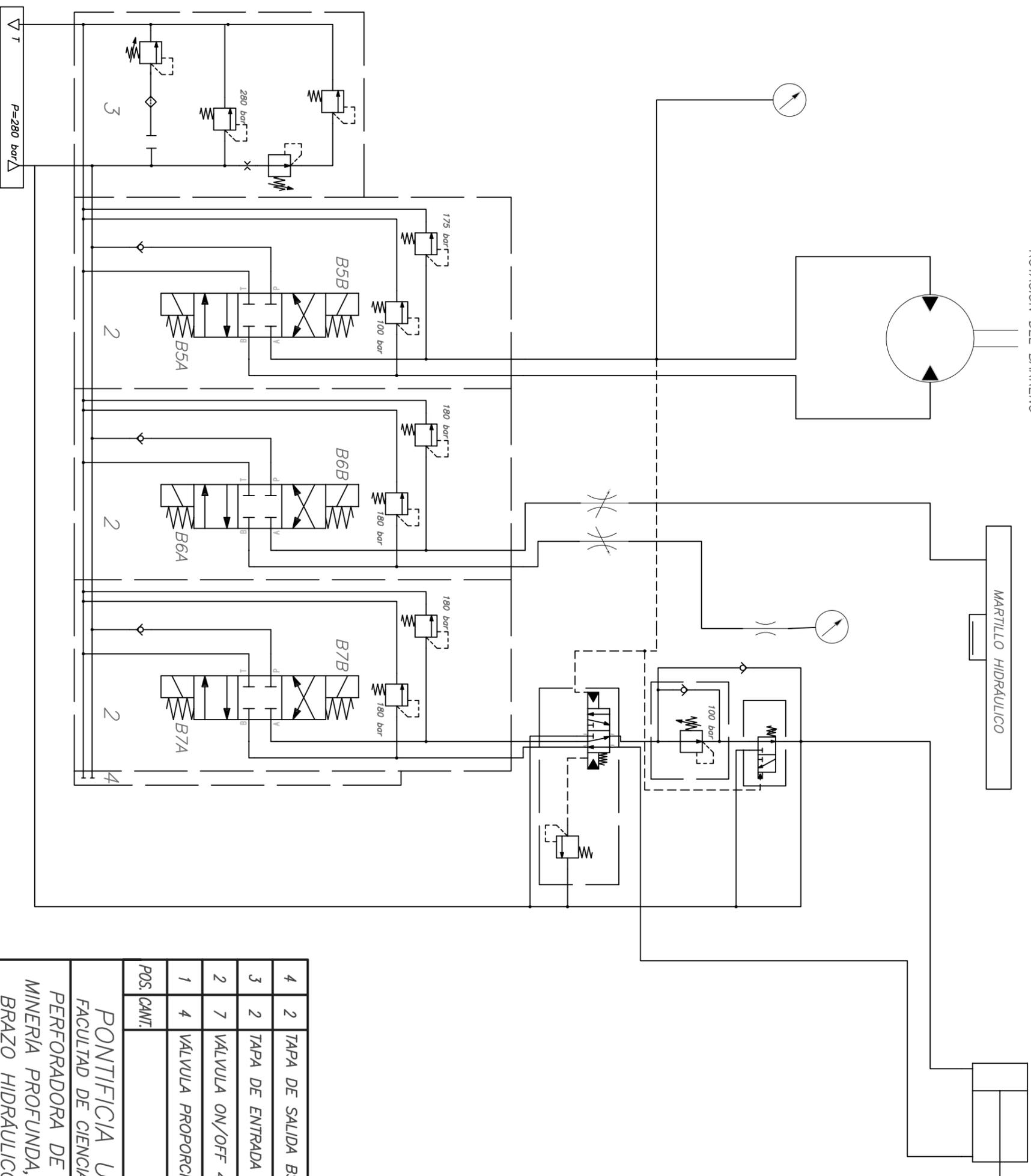
REVISADO POR: Meng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO SUMIYOSHI

2:2

ROTACIÓN DEL BARRENO

MARTILLO HIDRAULICO

CILINDRO DE AVANCE DEL BARRENO



POS.	CANT.	DESCRIPCIÓN	OBSERVACIONES
4	2	TAPA DE SALIDA BSP SIN CONEXIONES	PVG 32 DANFOSS 157B2000
3	2	TAPA DE ENTRADA BOMBA C. ABIERTO P= G1/2	PVG 32 DANFOSS 157B5010
2	7	VALVULA ON/OFF 4/3 C.CERRADO 24 VDC	PVG 32 DANFOSS 3-8 CPOS.
1	4	VALVULA PROPORCIONAL 4/3 C.CERRADO 24 VDC	PVG 32 DANFOSS 8 CPOS.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA – ESPECIALIDAD: ING. MECATRÓNICA

PERFORADORA DE ROCAS TELEOPERADA PARA LA  
 MINERÍA PROFUNDA, CON CONTROL AUTÓNOMO DEL  
 BRAZO HIDRÁULICO EN UN GRADO DE LIBERTAD

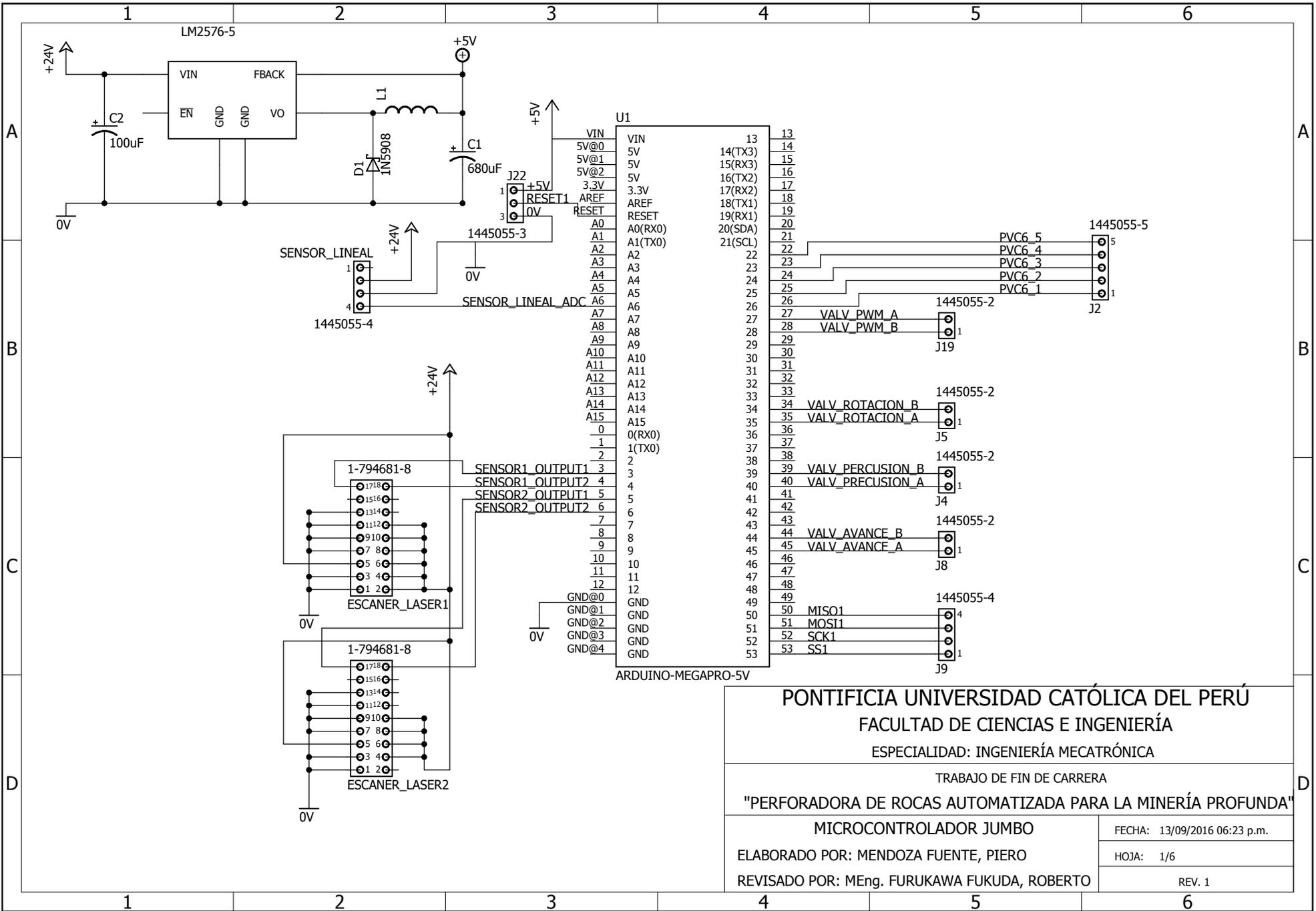
ESCALA  
 A3

COMANDO DE VALVULAS PARA EL ACCIONAMIENTO  
 DE LAS FUNCIONES DE PERFORACIÓN

FECHA:  
 13/09/2016

ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO FABRIZIO  
 REVISADO POR: Meng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO SUMIYOSHI

LAMINA:  
 1:2

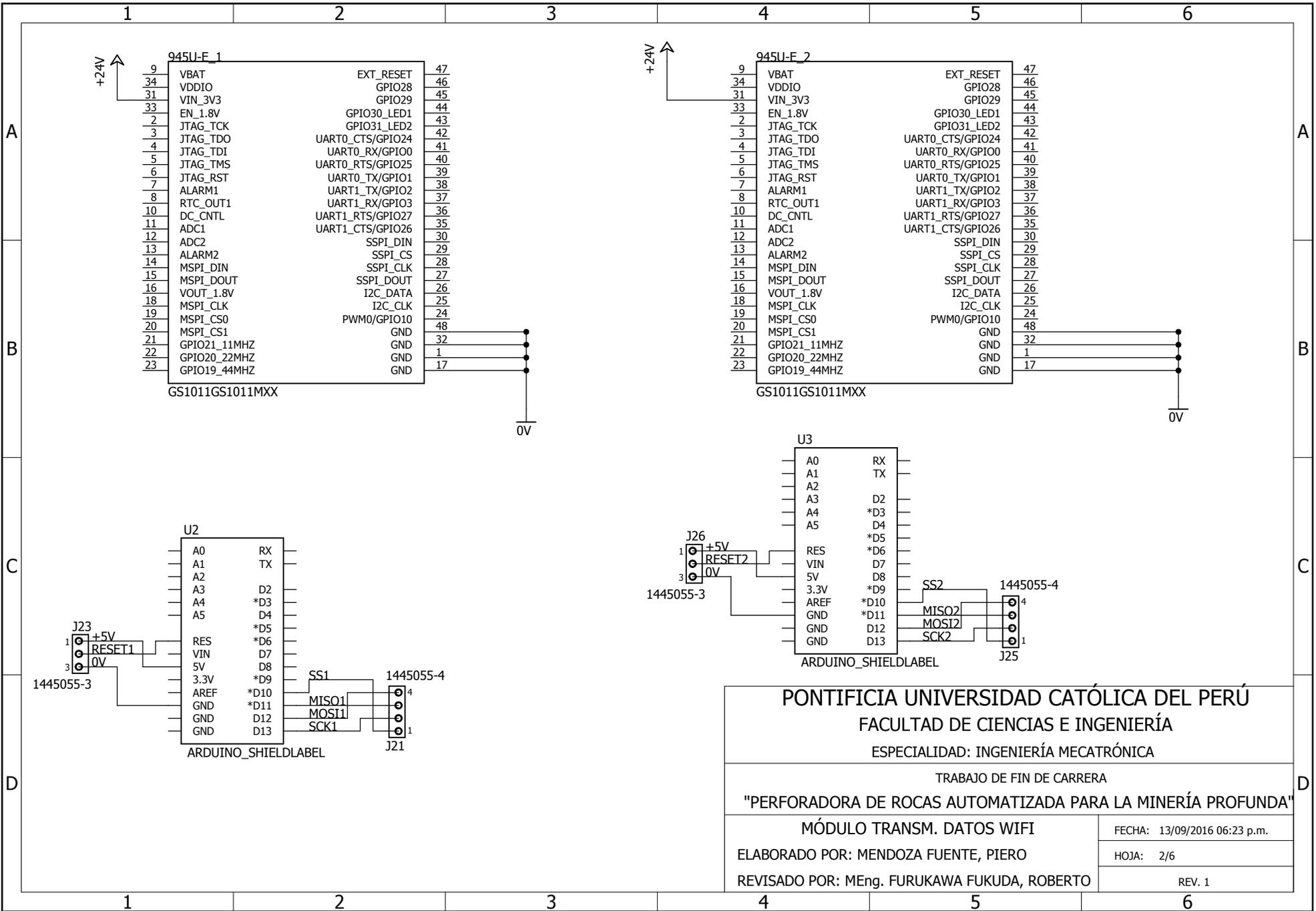


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**ESPECIALIDAD: INGENIERÍA MECATRÓNICA**

---

TRABAJO DE FIN DE CARRERA  
**"PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA"**

<b>MICROCONTROLADOR JUMBO</b>	FECHA: 13/09/2016 06:23 p.m.
ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO	HOJA: 1/6
REVISADO POR: MEng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO	REV. 1

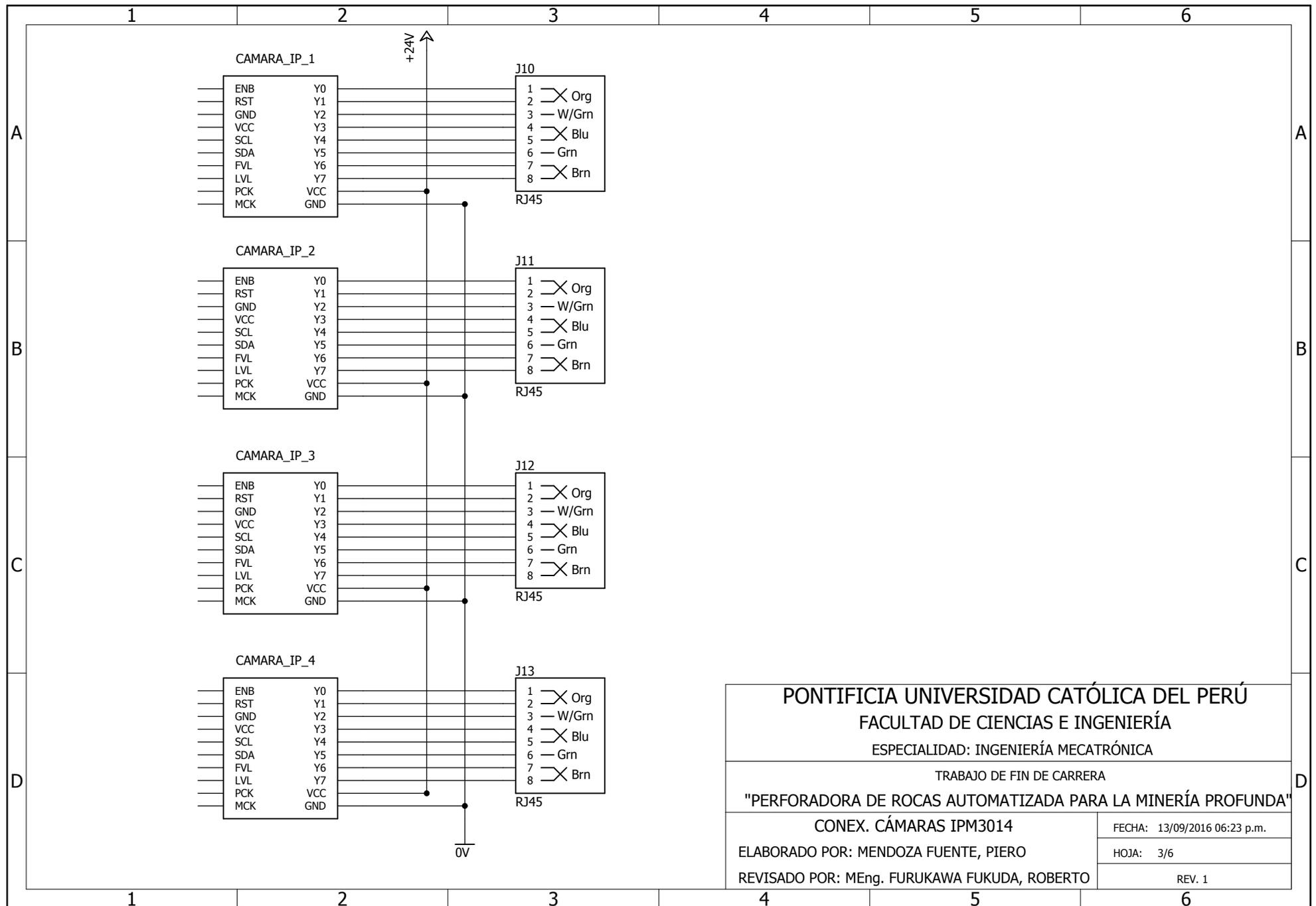


**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**  
**ESPECIALIDAD: INGENIERÍA MECATRÓNICA**

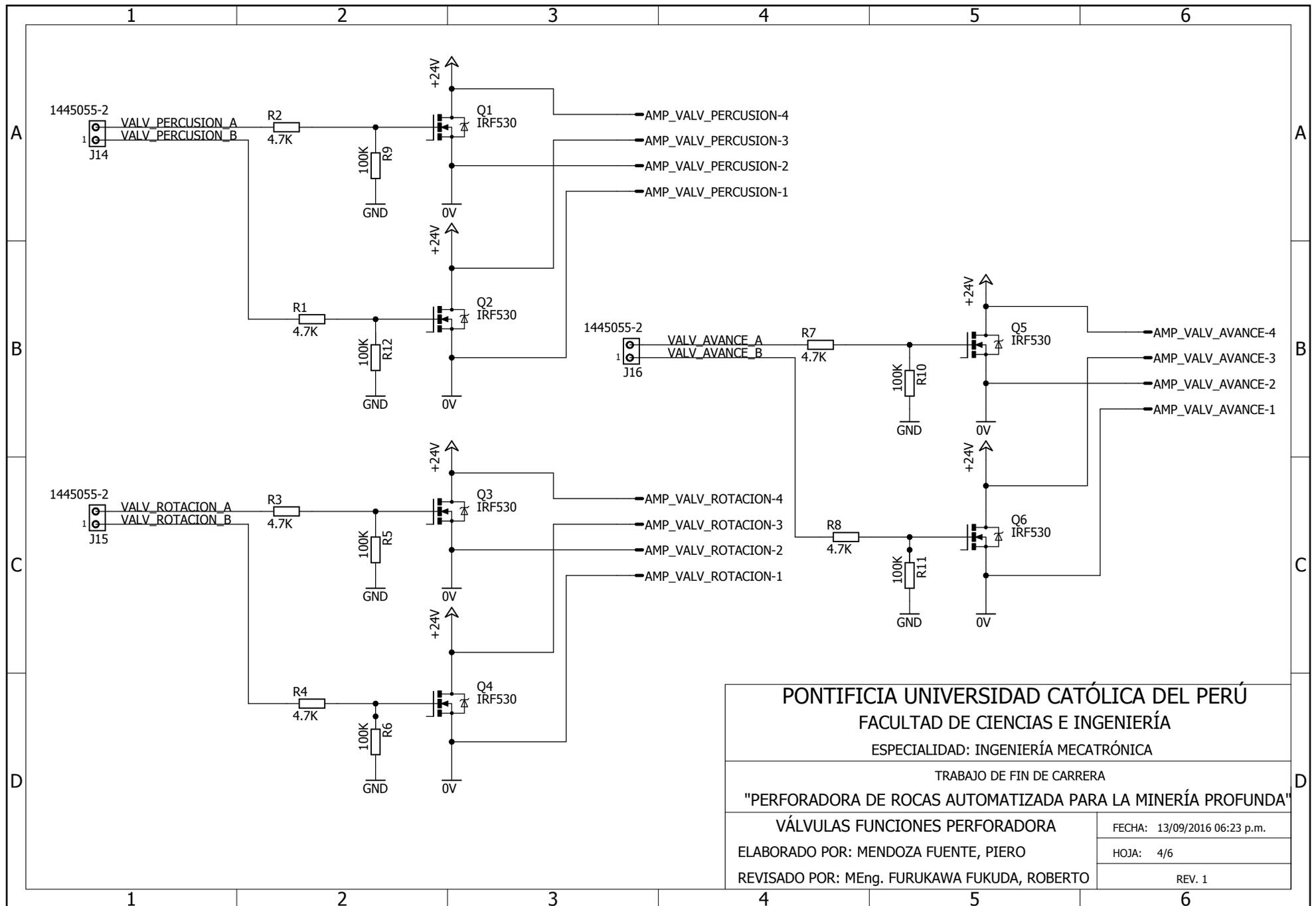
TRABAJO DE FIN DE CARRERA  
**"PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA"**

**MÓDULO TRANSM. DATOS WIFI**  
 ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO  
 REVISADO POR: MEng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO

FECHA: 13/09/2016 06:23 p.m.  
 HOJA: 2/6  
 REV. 1



<b>PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ</b> <b>FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA</b> <b>ESPECIALIDAD: INGENIERÍA MECATRÓNICA</b>	
TRABAJO DE FIN DE CARRERA <b>"PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA"</b>	
<b>CONEX. CÁMARAS IPM3014</b>	FECHA: 13/09/2016 06:23 p.m.
ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO	HOJA: 3/6
REVISADO POR: MEng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO	REV. 1



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
 ESPECIALIDAD: INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

"PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA"

VÁLVULAS FUNCIONES PERFORADORA

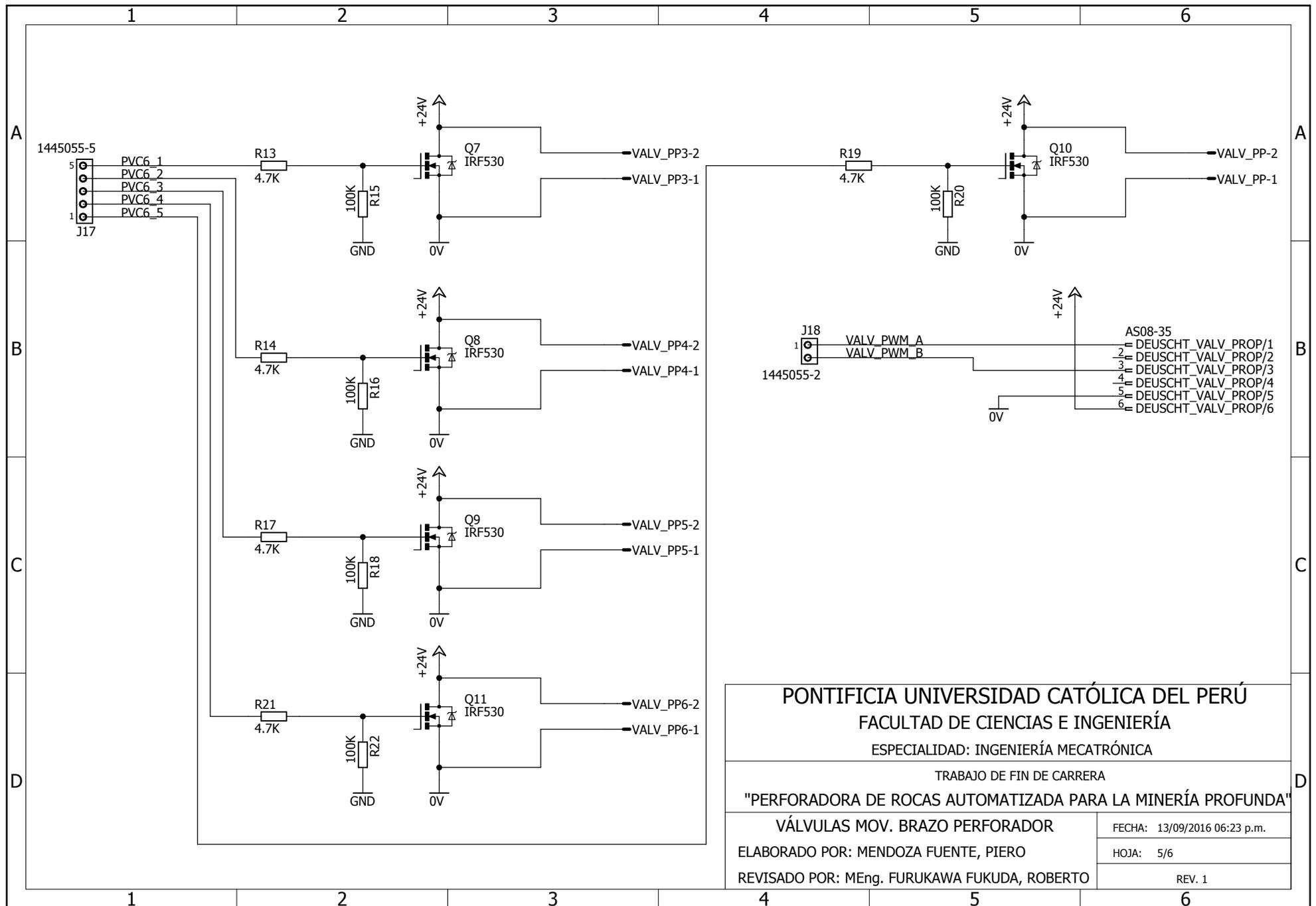
FECHA: 13/09/2016 06:23 p.m.

ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO

HOJA: 4/6

REVISADO POR: MEng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO

REV. 1



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIDAD: INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA

"PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA"

VÁLVULAS MOV. BRAZO PERFORADOR

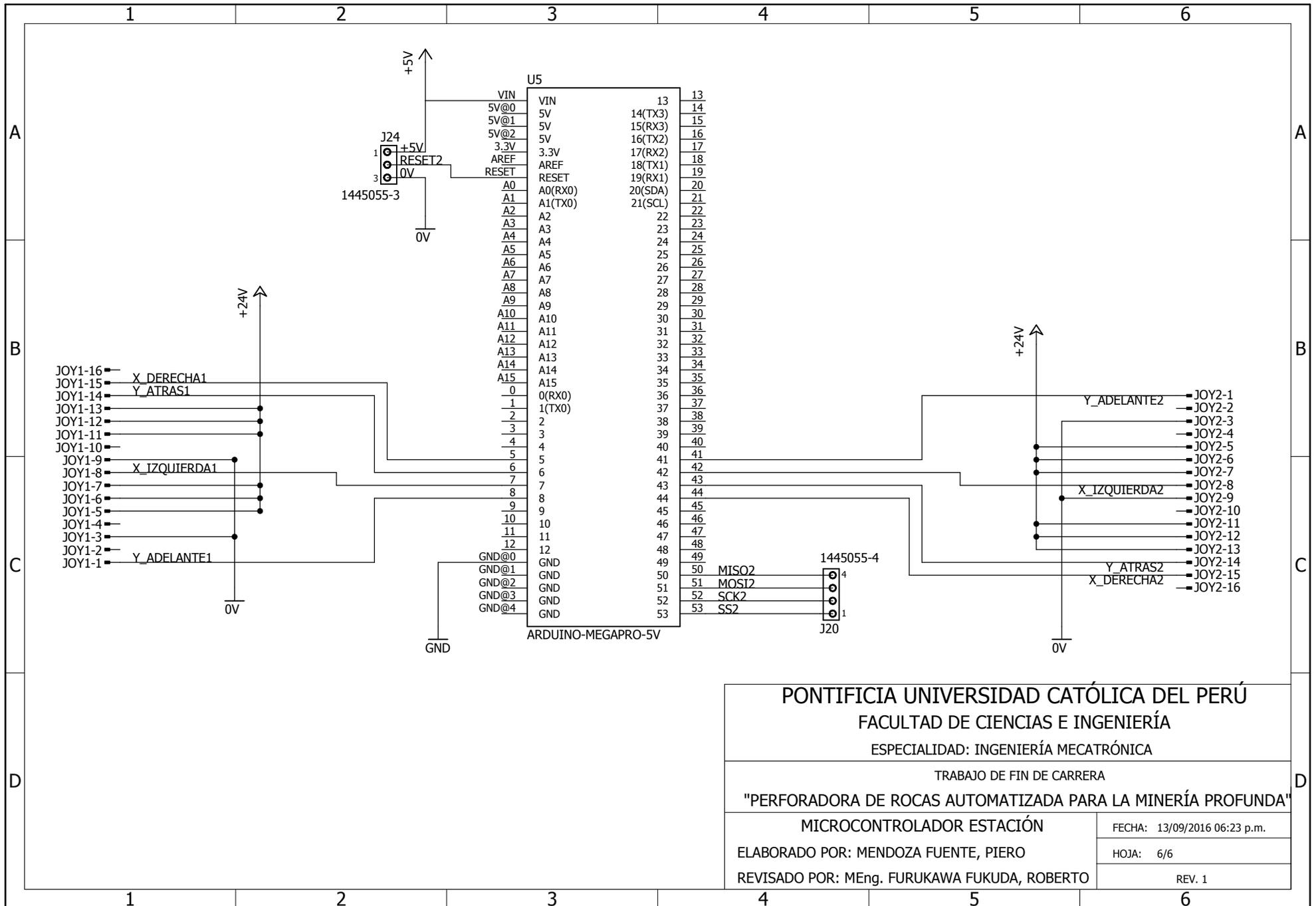
FECHA: 13/09/2016 06:23 p.m.

ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO

HOJA: 5/6

REVISADO POR: MEng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO

REV. 1



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
 FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
 ESPECIALIDAD: INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO DE FIN DE CARRERA  
 "PERFORADORA DE ROCAS AUTOMATIZADA PARA LA MINERÍA PROFUNDA"

MICROCONTROLADOR ESTACIÓN  
 ELABORADO POR: MENDOZA FUENTE, PIERO  
 REVISADO POR: MEng. FURUKAWA FUKUDA, ROBERTO

FECHA: 13/09/2016 06:23 p.m.  
 HOJA: 6/6  
 REV. 1