

**DISEÑO DE MÁQUINA PARA LIMPIEZA EXTERIOR
DE BARRAS DE PERFORACIÓN**



MUÑOZ, Lucas Emmanuel

PROYECTO INTEGRADOR PROFESIONAL

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

DISEÑO DE MÁQUINA PARA LIMPIEZA EXTERIOR DE BARRAS DE PERFORACIÓN

MUÑOZ, Lucas Emmanuel

Director: Dr. Ing. **STEIMBREGER, Ceferino**

Co-directora: Ing. **GARRIDO, Rocío**

Presentado a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del
Comahue como requisito para la obtención del grado de
INGENIERO MECÁNICO

Neuquén - Argentina

AÑO 2024

DISEÑO DE MÁQUINA PARA LIMPIEZA EXTERIOR DE BARRAS DE PERFORACIÓN

MUÑOZ, Lucas Emmanuel

Aprobado en fecha 10 de mayo de 2024

Tribunal evaluador:

- Dra. Ing. ZALAZAR, Mónica
- Ing. RAMOSKA, Leandro
- Ing. CAMPOS, Damián

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Pamela y Damián, mis hermanos Josué y Aldana, y toda mi familia por saber acompañarme y desear siempre lo mejor para mí.

A mis amigos y compañeros de la Facultad, por el tiempo de estudio y los buenos momentos compartidos en esta importante etapa.

A los docentes de la Facultad por el conocimiento que me brindaron. En particular, agradezco a Ceferino Steimbregger, Rocio Garrido y Damián Campos por el tiempo y paciencia que me dedicaron para lograr el objetivo.

A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, por el uso de sus instalaciones y equipos.

DISEÑO DE MÁQUINA PARA LIMPIEZA EXTERIOR DE BARRAS DE PERFORACIÓN

Autor: MUÑOZ, Lucas Emmanuel

Director: Dr. Ing. STEIMBREGER, Ceferino

Co-Directora: Ing. GARRIDO, Rocio

Resumen

Las barras de perforación cumplen un rol fundamental en los equipos de perforación empleados en la industria hidrocarburífera. Debido a las condiciones de servicio exigentes, las barras deben ser inspeccionadas periódicamente para asegurar la aptitud para el trabajo.

Uno de los servicios que brinda una Empresa de la zona, es la inspección de barras de perforación con el fin de asegurar la confiabilidad y calidad de las mismas. Dentro de las tareas realizadas por la Empresa, el proceso de limpieza de las barras se realiza actualmente de forma manual, lo cual evidencia una notable oportunidad de mejora. En este sentido surge la necesidad de diseñar una máquina que permita optimizar dicho proceso y mejorar así las condiciones laborales de los operarios involucrados en las tareas.

En este trabajo, se adoptó la metodología de proyecto propuesta por [Ulrich, K. & Eppinger, S. \(2013\)](#). Se completó satisfactoriamente la etapa de Diseño Conceptual, en la cual se incluyeron pruebas experimentales para relacionar parámetros operativos de la máquina con el grado de limpieza alcanzado. Finalmente, en la etapa de Ingeniería Básica, el Comitente decidió dar por finalizado el proyecto en virtud de cambios en los objetivos específicos de la organización. El desarrollo alcanzado proporciona una base sólida, si se decide en algún momento, avanzar con la fabricación de la máquina.

Palabras clave: Barras de perforación, limpieza mecánica, diseño de máquinas.

MACHINE DESIGN FOR EXTERNAL CLEANING OF DRILL PIPES

Author: MUÑOZ, Lucas Emmanuel

Advisor: Dr. Ing. STEIMBREGER, Ceferino

Co-Advisor: Ing. GARRIDO, Rocio

Summary

Drill pipes play an important role in drilling equipments used in the oil and gas industry. Due to the demanding working conditions, bars must be periodically inspected to ensure their fitness for service.

One of the services provided by a company in the area is the inspection of drill pipes to ensure reliability and quality. Among the tasks performed by the Organization, the cleaning process of the bars is currently performed manually, which evince a significant opportunity for improvement. In this sense, the need arises to design a machine that optimize this process and improve working conditions.

This work adopted the project methodology proposed by [Ulrich, K. & Eppinger, S. \(2013\)](#). The conceptual design stage was satisfactorily completed, which included experimental tests that relate machine operating parameters to the degree of cleanliness achieved on the bar. Finally, at the Basic Engineering stage, the Client decided to terminate the project due to changes in the Organization's specific objectives. The development achieved in this work provides a solid base if it is decided to move forward with manufacturing the machine in the future.

Keywords: Drill pipes, mechanical cleaning, machine design.

Índice

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA	4
3. OBJETIVO	8
3.1. Objetivo General	8
3.2. Objetivos Específicos	8
4. MARCO TEÓRICO	9
4.1. Limpieza de Superficies	9
4.2. Metodología de Proyecto	10
4.2.1. Declaración de Misión	11
4.2.2. Desarrollo del Concepto	11
4.2.3. Ingeniería Básica	16
4.2.4. Ingeniería de Detalle	17
4.2.5. Fabricación	17
4.2.6. Pruebas y Refinamiento	17
5. DESARROLLO	18
5.1. Declaración de Misión	18
5.2. Diseño Conceptual	19
5.2.1. Identificación de Necesidades	19
5.2.2. Normativa de Referencia	22
5.2.3. Especificaciones Técnicas Objetivo	23
5.2.4. Generación de Conceptos	33
5.2.5. Selección del Concepto Solución	47
5.2.6. Especificaciones Técnicas Finales	50
5.2.7. Análisis de Parámetros Operativos del Proceso de Limpieza	51
5.3. Ingeniería Básica	57
5.3.1. Determinación del Estado de Cargas	57

5.3.2. Diseño del Circuito Hidráulico	66
5.4. Redefinición del Alcance del Proyecto	69
5.5. Evaluación Final	70
6. CONCLUSIONES	71
7. BIBLIOGRAFÍA	72
A. ANEXO I: Resultados de las Pruebas Experimentales	74
B. ANEXO II: Reacciones de Vínculo en el Banco de Ruedas	92
C. ANEXO III: Circuito Hidráulico	97
C.1. Detalle de los Motores y Ruedas	97
C.2. Cilindros	98
C.2.1. Cilindros C1, C2, C3 y C4	98
C.2.2. Cilindro C5	99
C.2.3. Cilindros C6 y C7	100
C.3. Motor del cepillo	100
C.4. Bomba 1	101
C.5. Bomba 2	102
C.6. Válvula reguladora de caudal	102
C.7. Válvula direccional	103
C.8. Funcionamiento	104
C.8.1. Puesta en marcha de las bombas	104
C.8.2. Desplazamiento lateral de la barra con C1, C2, C3 y C4	108
C.8.3. Funcionamiento del banco de ruedas	116
C.8.4. Funcionamiento del motor del cepillo MC	122
C.8.5. Funcionamiento MC y C5	125
C.8.6. Banco de ruedas, MC y C5 en simultáneo	132
C.8.7. Desplazamiento lateral con C6 y C7	132

Índice de Figuras

1.	Componentes principales de un equipo de perforación (Gatlin, 1965).	1
2.	Partes de una barra de perforación típica (API RP 7G-2, 2015).	2
3.	Bobina para magnetización.	5
4.	Detalle equipamiento de inspección.	5
5.	Procedimiento de Inspección por EMI.	6
6.	Metodología proyectual (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).	11
7.	Fase de Desarrollo del Concepto (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).	12
8.	Método de generación de conceptos adaptado (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).	13
9.	Caja negra (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).	14
10.	<i>Hub City Iron Works PCM-LT</i>	24
11.	<i>R&R Manufacturing, Base Model 10500.016</i>	25
12.	<i>R&R Manufacturing PUP MAX</i>	26
13.	<i>HTR Inc. Cleaning Machine</i>	27
14.	Caja negra de la máquina.	34
15.	Diagrama de funciones o caja transparente.	34
16.	Bloques funcionales.	35
17.	Disposiciones espaciales posibles.	38
18.	Matriz morfológica.	39
19.	Concepto [1A].	40
20.	Concepto [1B].	41
21.	Concepto [1C].	42
22.	Concepto [2].	43
23.	Concepto Solución - Máquina para limpieza e inspección de barras de perforación.	48
24.	Componentes concepto solución.	48
25.	Disposición general de la máquina.	49
26.	Dispositivo para la medición de la fuerza de cepillado con amoladora ma- nual.	51

27.	Registro Fotográfico muestra F1.	53
28.	Fuerza total aplicada vs tiempo (Muestra F1).	53
29.	Porcentaje de limpieza obtenido en función de la fuerza de cepillado aplicada $[kg]$ y el tiempo de limpieza $[s]$	55
30.	Porcentaje de limpieza obtenido vs fuerza promedio.	55
31.	Características geométricas de una barra de perforación (API 5DP, 2015).	58
32.	Modelo Barra.	58
33.	Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de la barra.	59
34.	Reacciones de vínculo.	62
35.	Diagrama de Corte (Caso 1).	63
36.	Diagrama de Momento (Caso 1).	63
37.	Diagrama de Cuerpo Libre (Caso 2).	64
38.	Diagrama de Corte (Caso 2).	64
39.	Diagrama de Momento (Caso 2).	64
40.	Diagrama de Cuerpo Libre (Caso 3).	65
41.	Diagrama de Corte (Caso 3).	65
42.	Diagrama de Momento (Caso 3).	65
43.	Esquema del Circuito Hidráulico.	69
44.	Barra 1 - E1.	74
45.	Barra 1 - E1.	74
46.	Barra 1 - F1.	75
47.	Barra 1 - F1.	75
48.	Barra 1 - G1.	76
49.	Barra 1 - G1.	76
50.	Barra 2 - E2.	77
51.	Barra 2 - E2.	77
52.	Barra 2 - F2.	78
53.	Barra 2 - F2.	78
54.	Barra 2 - G2.	79
55.	Barra 2 - G2.	79
56.	Barra 2 - H2.	80

57.	Barra 2 - H2.	80
58.	Barra 2 - I2.	81
59.	Barra 2 - I2.	81
60.	Barra 3 - E3.	82
61.	Barra 3 - E3.	82
62.	Barra 3 - F3.	83
63.	Barra 3 - F3.	83
64.	Barra 3 - G3.	84
65.	Barra 3 - G3.	84
66.	Barra 3 - H3.	85
67.	Barra 3 - H3.	85
68.	Barra 3 - I3.	86
69.	Barra 3 - I3.	86
70.	Barra 4 - E4.	87
71.	Barra 4 - E4.	87
72.	Barra 4 - F4.	88
73.	Barra 4 - F4.	88
74.	Barra 4 - G4.	89
75.	Barra 4 - G4.	89
76.	Barra 4 - H4.	90
77.	Barra 4 - H4.	90
78.	Barra 4 - I4.	91
79.	Barra 4 - I4.	91
80.	Motor ruedas	98
81.	Sistema de desplazamiento lateral de la barra.	99
82.	Motor del cepillo.	101
83.	Bomba 1.	102
84.	Válvula reguladora de caudal	103
85.	Válvula direccional	103
86.	Código de colores	104
87.	B1.	104

88.	B2.	104
89.	VP1.	105
90.	VP2.	105
91.	VD1,VD2,VD3,VD4 y VD6.	105
92.	Arranque bombas.	106
93.	B1 estabilizado.	107
94.	Sistema estabilizado.	107
95.	Configuración cilindro.	108
96.	Parámetros cilindro.	108
97.	Carga externa cilindro.	109
98.	Perfil de fuerza.	109
99.	Configuración VP3.	109
100.	Apertura VD1.	110
101.	Flujo hacia C1, C2, C3 y C4.	111
102.	Avance de los cilindros.	111
103.	Máxima extensión de los cilindros.	112
104.	Perfil de fuerza en retroceso.	112
105.	Retroceso. Cambio de posición VD1	113
106.	Inicio retroceso de los cilindros.	113
107.	Retroceso finalizado.	114
108.	Selección centro VD1.	115
109.	Selección centro VD1.	115
110.	Motor 1.	116
111.	Movimiento de los motores.	117
112.	Motores estabilizados.	117
113.	Ambos bancos funcionando en simultáneo.	119
114.	Ambos bancos funcionando en simultáneo.	120
115.	Ambos bancos funcionando en simultáneo.	120
116.	Ambos bancos funcionando en simultáneo.	121
117.	Ambos bancos funcionando en simultáneo.	121
118.	Ambos bancos funcionando en simultáneo.	122

119. Motor del cepillo.	122
120. Apertura VD3.	123
121. Sistema estabilizado.	124
122. Funcionamiento en sentido inverso.	124
123. Perfil de fuerza C5.	125
124. VP4.	125
125. VP5.	125
126. Avance C5.	126
127. Avance C5.	127
128. Máxima extensión C5.	127
129. Funcionamiento sin VP4.	128
130. Funcionamiento sin VP4.	129
131. Perfil de fuerza en retroceso.	129
132. Retroceso C5.	130
133. Retroceso C5.	131
134. Retroceso C5.	131
135. Ingreso de barra a zona de amolado.	132
136. Perfil de fuerza.	133
137. Apertura VD6.	133
138. Avance C6 y C7.	134
139. Máxima extensión C6 y C7.	134
140. Perfil de fuerza en retroceso.	135
141. Retroceso.	135
142. Retroceso.	136

Índice de Tablas

1.	Necesidades del Cliente.	20
2.	Escala de ponderación.	21
3.	Necesidades y su importancia relativa.	21
4.	Métricas.	23
5.	Resumen de la información recopilada en el análisis de <i>Benchmarking</i> . . .	28
6.	Especificaciones Técnicas Objetivo.	31
7.	<i>Brainstorming</i> : movimientos para limpieza de la barra.	37
8.	Combinaciones de movimientos posibles para la limpieza.	37
9.	Comparación de conceptos.	44
10.	Especificaciones Técnicas Finales.	50
11.	Datos obtenidos en las pruebas experimentales.	54
12.	Características Barras Rango 2.	58
13.	Resultados obtenidos para las reacciones de vínculo.	62
14.	Comparación de las cargas para los casos 1, 2 y 3.	66
15.	Descripción de los componentes del Circuito Hidráulico.	68
16.	Condiciones de frontera.	94
17.	Caída de presión en los motores.	97
18.	Cilindros 3L.	98
19.	Comparación caída de presión en los motores.	118
20.	Caída de presión en los motores en funcionamiento inverso.	118

1. INTRODUCCIÓN

Los equipos de perforación de petróleo son una parte fundamental en la extracción de hidrocarburos. La Figura 1 muestra sus componentes principales. A grandes rasgos, consiste en un taladro rotativo que perfora las rocas hasta la profundidad deseada. Un motor genera el movimiento de rotación y lo transmite al taladro a través de las barras de perforación (*drill pipes*). Por su interior circula un flujo de lodo que tiene como objetivo enfriar y lubricar el taladro, transportar a la superficie fragmentos de la roca perforada e impedir la salida violenta de gas, petróleo o agua cuando el depósito es alcanzado.

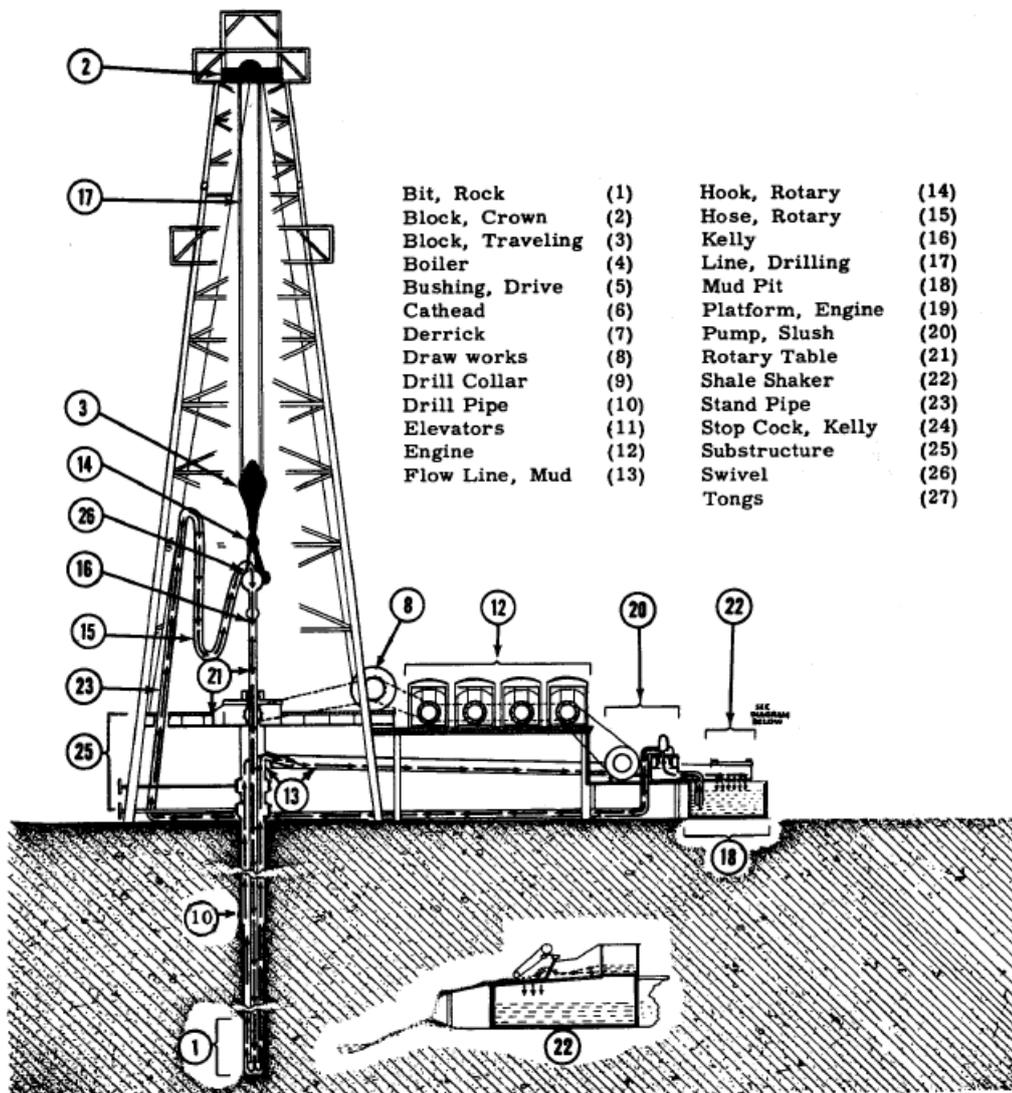


Figura 1. Componentes principales de un equipo de perforación (Gatlin, 1965).

Cada barra de perforación se identifica con un número de serie estampado en el PIN.

En la Figura 2 se muestra una barra de perforación y sus partes componentes, donde:

1. Barra de perforación (*drill pipe*).
2. Conexión hembra (*tool joint BOX*).
3. Cuerpo de la barra de perforación, entre el PIN y el BOX (*drill pipe body*).
4. Conexión macho (*tool joint PIN*).
5. Cuerpo de la barra de perforación con diámetro interno constante (*pipe body*).
6. Soldadura.

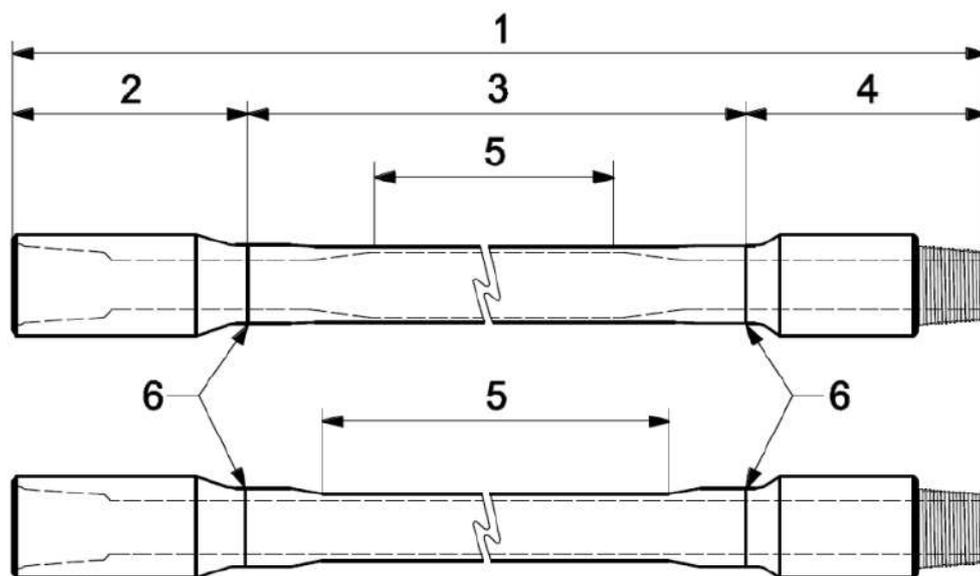


Figura 2. Partes de una barra de perforación típica (API RP 7G-2, 2015).

Las barras de perforación pueden tener tres longitudes distintas, cada una asociada a un rango específico, y también pueden poseer distintas propiedades mecánicas (designadas con las letras E, X, G ó S). Las especificaciones de cada una se encuentran en la norma [API 5DP \(2015\)](#).

Las barras de perforación cumplen un rol fundamental, por lo cual deben ser inspeccionadas periódicamente, bajo el procedimiento descrito en la norma [API RP 7G-2 \(2015\)](#), para asegurar la aptitud para el trabajo. El objetivo de la inspección es detectar daños que

puedan volverse críticos en un futuro, provocando reparaciones costosas, daños ambientales y, lo más importante, lesiones en personas.

Uno de los servicios que brinda una PyME de la zona, es la inspección de barras de perforación con el fin de asegurar la confiabilidad y calidad de las mismas. El proceso consiste en una limpieza interior y exterior de las barras, seguida de una serie de Ensayos No Destructivos (END). Dicho proceso lo realizan tres operarios manualmente, a la intemperie, lo cual restringe la cantidad de barras inspeccionadas por día. Por este motivo, se evidencian como problemáticas principales el tiempo demandado en la tarea de limpieza y el entorno de seguridad e higiene apropiado para los operarios.

Como consecuencia del crecimiento de las tareas de extracción de petróleo y gas en la zona, la empresa tiene una creciente demanda de inspecciones. Este contexto impulsa el desarrollo de tecnologías adecuadas a la demanda actual, de manera de conseguir mejorar la eficiencia del proceso de limpieza, y con ello reducir el tiempo de inspección y aumentar la productividad.

A partir de esto, surge la solicitud por parte de la empresa al Área Diseño Mecánico de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional del Comahue, de diseñar una máquina a instalar en el espacio disponible en el predio de la empresa, que permita optimizar dicho proceso y mejorar las condiciones laborales de los operarios involucrados en las tareas.

2. PRESENTACIÓN DEL PROBLEMA

Tal como se mencionó en la sección anterior, el presente trabajo surge de la necesidad de una empresa (Comitente) de optimizar el tiempo y la forma en la que se realiza la limpieza de barras de perforación, para su posterior inspección mediante la aplicación de técnicas de END.

En este caso, resulta necesario limpiar la superficie de las barras de perforación, es decir, remover los residuos sólidos que se depositan sobre estas durante el servicio, para poder realizar luego la inspección de las mismas y evaluar, en base a ello, su continuidad o no en servicio.

Actualmente, dicho proceso lo realizan tres (3) operarios, empleando amoladoras eléctricas manuales, provistas de cepillos con cerdas metálicas para tal fin. En particular, se emplean cepillos tipo copa trenzados (*cup brush-twist knots*), con cerdas de acero (www.sitbrush.com).

Este trabajo se desarrolla a la intemperie, en una zona del predio de la empresa dispuesta para ello. Empleando un autoelevador se posicionan las barras sobre caballetes, para que los empleados puedan realizar el trabajo de pie. Una vez completada la limpieza de las barras, las mismas avanzan (sobre los caballetes) a la etapa de inspección.

En particular, la inspección se realiza empleando la técnica de Inducción Electromagnética (EMI, por sus siglas en inglés *Electromagnetic Inspection*). La misma consiste en magnetizar linealmente la barra y detectar las distorsiones en el campo generadas por la presencia de defectos, como pueden ser: fisuras, corrosión y pérdida de espesor, entre otros (Collins, 1995). La magnetización se realiza mediante la utilización de una bobina, como la que se presenta en la Figura 3.

Por otro lado, en la Figura 4, se presenta el resto del equipamiento empleado para realizar la inspección. Las distorsiones del campo magnético son detectadas por un cabezal con sensores magnéticos (Figura 4a). Un carrito con motores de corriente continua, denominado *Buggy*, mueve el cabezal (ver Figura 4a) y la bobina (Figura 3). Desde la mesa de operaciones (Figura 4b) se guía el *Buggy* y se controla la bobina magnética. La señal de salida de los sensores magnéticos ingresa en la mesa de operaciones, es procesada por los circuitos electrónicos y enviada al *software* para los cálculos y la visualización.

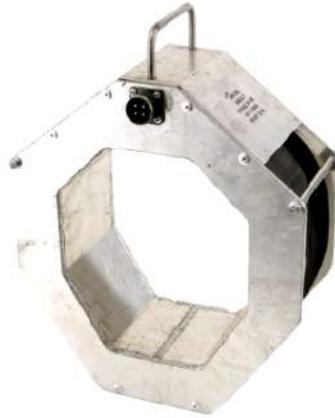


Figura 3. Bobina para magnetización.



(a) Cabezal con sensores magnéticos (1), *Buggy* (2) y Barra a inspeccionar (3).



(b) Mesa de operaciones.

Figura 4. Detalle equipamiento de inspección.

El procedimiento para realizar el ensayo (ver Figura 5) implica que dos operarios se posicionen en los extremos de la barra (2), y uno de ellos coloque el equipo de inspección portátil (3) en el cuerpo de la misma.

El cabezal se selecciona en función del diámetro del cuerpo de la barra (que es menor al del *tool joint*), y es por esto que el mismo debe ser cerrado en el cuerpo.

Luego, los operarios elevan la barra mediante dos pistones hidráulicos (1) y se da la señal de encendido (ON) para que el equipo de inspección (conjunto *Buggy*-Cabezal-Bobina) avance y realice la inspección. Al llegar al otro extremo se hacen descender los pistones, para que la barra apoye sobre los caballetes, y se pueda retirar el equipo.

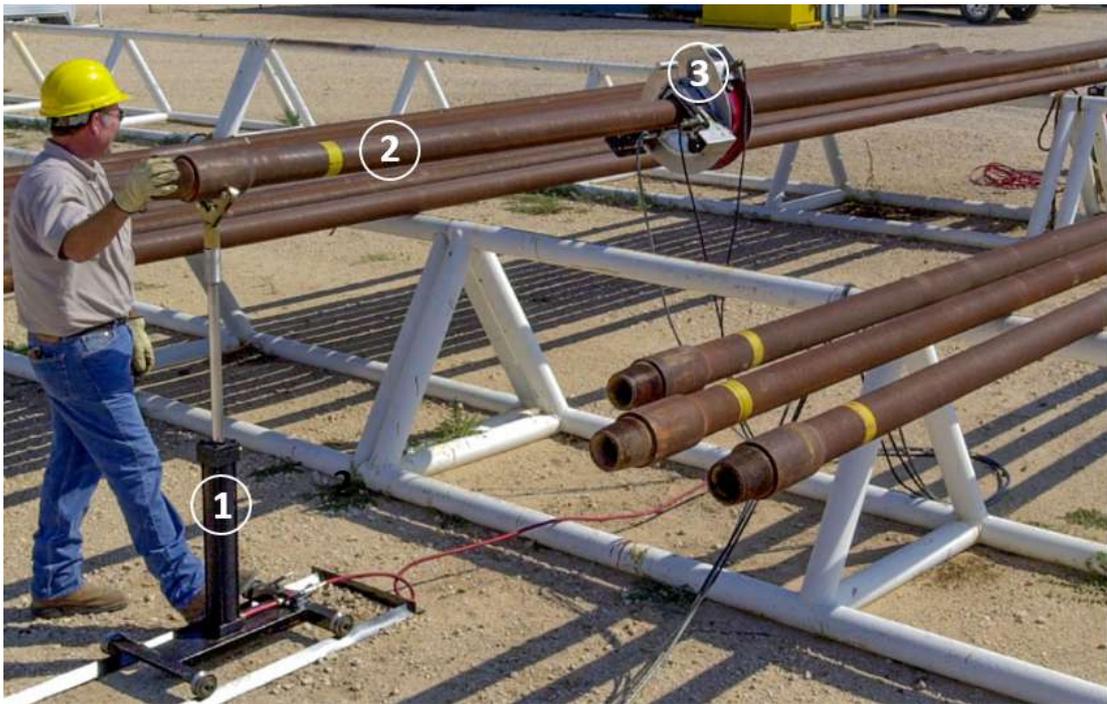


Figura 5. Procedimiento de Inspección por EMI.

Nota: (1) pistones hidráulicos, (2) barra de perforación, y (3) equipo de inspección portátil.

Todas las actividades detalladas precedentemente, asociadas al proceso de limpieza e inspección, presentan una serie de desventajas dadas sus características, a saber:

- La carga de trabajo es desgastante, debido en gran parte al esfuerzo que requiere realizar la limpieza en forma manual, y por otro lado, debido al peso del equipo de inspección.
- Las tareas involucradas se vuelven tediosas por la cantidad de barras que deben inspeccionarse por día en estas condiciones.
- Los tiempos muertos asociados al correcto posicionamiento del equipo para realizar la inspección ralentizan el proceso, afectando de forma directa la productividad.

En particular, esta manera de realizar las tareas restringe la cantidad de barras inspeccionadas por día (la cual ronda un total de 40 barras aproximadamente), ya que depende de varios factores: las condiciones climáticas (frío, calor, lluvia, viento) que afectan directamente el rendimiento de los trabajadores y el normal desempeño de la tarea, el cansancio inherente al desarrollo de la tarea, y los tiempos muertos asociados al posicionamiento de

las barras sobre los caballetes y al montaje del equipo de inspección sobre la barra, entre otros.

En virtud de lo expuesto, surge la necesidad de diseñar una máquina que permita brindar soluciones a las problemáticas planteadas, mediante la aplicación de herramientas metodológicas específicas para mejorar los procesos involucrados, prestando especial atención a las condiciones de seguridad e higiene laboral, y a lograr una mejora en la productividad a partir de una adecuada coordinación de las tareas de limpieza exterior e inspección de las barras de perforación.

3. OBJETIVO

3.1. Objetivo General

Diseñar una máquina para limpieza exterior de barras de perforación.

3.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar los procesos de limpieza mecánica e inspección a realizar. Caracterizar el tipo de barra de perforación a inspeccionar y el resultado a obtener con la máquina de limpieza.
 - En base a un análisis funcional, desarrollar alternativas de solución (diseño conceptual), que permitan establecer la arquitectura de la máquina para llevar a cabo la limpieza mecánica en la superficie exterior de barras de perforación.
 - Elaborar la ingeniería básica de la máquina en función de la arquitectura definida precedentemente.
-

4. MARCO TEÓRICO

A continuación, se exponen los conceptos fundamentales sobre los que se basa el desarrollo del proyecto.

4.1. Limpieza de Superficies

Cuando se habla de componentes mecánicos se hace especial hincapié en la importancia de las superficies durante la fabricación del mismo, y en los efectos de las capas depositadas o adsorbidas de diversos elementos y contaminantes sobre las características superficiales una vez que este entra en servicio.

El término limpieza implica la eliminación de contaminantes sólidos, semisólidos o líquidos de una superficie y es una parte importante de las operaciones de fabricación y de la economía de la producción ([Kalpakjian, S. & Schmid, S. R., 2014](#)).

El tipo de proceso de limpieza necesario depende del tipo de residuos fluidos y contaminantes que deban eliminarse. Por ejemplo, los fluidos a base de agua son más fáciles y menos costosos de eliminar que los fluidos a base de aceite. Los contaminantes pueden consistir en óxido, cascarilla, virutas (y otros residuos metálicos y no metálicos), lubricantes sólidos, pigmentos, y elementos ambientales en general.

Básicamente, existen tres tipos de métodos de limpieza:

1. Limpieza mecánica: Esta operación consiste en perturbar físicamente los contaminantes, a menudo con cepillos de alambre o fibras, chorro abrasivo o chorro de vapor. Muchos de estos procesos son muy efectivos para remover óxido, cascarilla y otros contaminantes sólidos. La limpieza ultrasónica también pertenece a esta categoría.
 2. Limpieza electrolítica: En este proceso, al componente que se va a limpiar se le aplica una solución acuosa (frecuentemente alcalina) que produce burbujas de hidrógeno u oxígeno (dependiendo de la polaridad), las cuales se liberan en la superficie del mismo. Las burbujas son abrasivas y ayudan a retirar los contaminantes.
 3. Limpieza química: Por lo general, comprende la remoción de aceite y grasa de las superficies. La operación consiste en uno o más de los siguientes procesos: solución,
-

saponificación, emulsificación, dispersión y agregación.

La palabra limpieza o el grado de limpieza de una superficie es algo difícil de definir, como así también una superficie limpia puede tener efectos tanto beneficiosos como perjudiciales. Aunque una superficie que no está limpia puede reducir la tendencia a la adhesión y a la excoiación, la limpieza suele ser fundamental para una aplicación más efectiva de recubrimientos, pintura, unión con adhesivos, soldadura, así como para el funcionamiento confiable de partes manufacturadas en maquinaria, operaciones de ensamble y contenedores de alimentos y bebidas (Kalpakjian, S. & Schmid, S. R., 2014).

4.2. Metodología de Proyecto

Para llevar a cabo un proyecto, distintos autores (Ulrich, K. & Eppinger, S. (2013), Pahl, G. and Beitz, W. (2007), y Ullman, D. G. (2010), entre otros) recomiendan aplicar una metodología proyectual que permite evitar ciertos problemas comunes que suelen surgir en el desarrollo del mismo. Como por ejemplo: considerar sólo una o dos alternativas solución, no considerar cuidadosamente la utilidad de los conceptos empleados en otros productos, integración ineficiente de soluciones parciales prometedoras, y no considerar categorías enteras de soluciones, entre otros (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).

Según Ulrich, K. & Eppinger, S. (2013), los métodos estructurados reducen la probabilidad de problemas costosos y son valiosos por tres razones:

- Hacen explícito el proceso de toma de decisiones, permitiendo entender las razones fundamentales de la decisión y permiten así reducir la posibilidad de avanzar con decisiones no fundamentadas.
- Al actuar como *checklist* (listas de verificación) de los pasos claves en una actividad de desarrollo, aseguran que no se olviden los aspectos importantes.
- Son sumamente auto documentados, es decir, en el proceso de ejecutar el método, se crea un registro del proceso de toma de decisiones para consulta en el futuro.

Para abordar el proceso de desarrollo de un producto Ulrich, K. & Eppinger, S. (2013) define seis pasos o etapas, tal como se indica en la Figura 6.



Figura 6. Metodología proyectual (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).

4.2.1. Declaración de Misión

En esta primera etapa se debe recolectar información acerca del proyecto, con el objetivo de clarificar la tarea. Para ello, se deben realizar reuniones con el cliente, en las que se establecen las suposiciones básicas y limitaciones del proyecto.

La Declaración de Misión contiene la siguiente información:

- Breve descripción de la máquina, en la que se explica la función básica de la misma.
- Propuesta de valor, que es la razón crítica por la cual se diseña la máquina.
- Objetivo de la máquina.
- Suposiciones y restricciones.
- Demandante.

4.2.2. Desarrollo del Concepto

Una vez definida la Declaración de Misión del proyecto, se pasa a la fase de Desarrollo del Concepto, también conocida como Diseño Conceptual. Un concepto es una descripción de la forma, función y características de un producto, y por lo general esta acompañado de un conjunto de especificaciones, un análisis de productos de la competencia y una justificación económica del proyecto.

Ulrich, K. & Eppinger, S. (2013) propone una serie de actividades para llevar a cabo esta fase, que en raras ocasiones avanza en forma puramente secuencial, completando cada actividad antes de comenzar la siguiente, sino que consiste más bien en un proceso iterativo.

En esta etapa se identifican las necesidades del cliente (requisitos que debe cumplir el producto), se las evalúa y se definen las especificaciones técnicas objetivo. Luego, se

generan conceptos alternativos y se selecciona uno para su posterior desarrollo. Una vez seleccionado el concepto, se realiza un revisión de las especificaciones obteniendo las especificaciones técnicas finales. La Figura 7 muestra la secuencia de actividades antes mencionadas.



Figura 7. Fase de Desarrollo del Concepto (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).

A. Identificación de Necesidades

Identificar las necesidades del cliente es una parte fundamental del proceso de desarrollo de un producto. Las necesidades del cliente (en este caso el cliente sería el Comitente) deben ser expresadas en términos de *lo qué* el producto (máquina) tiene que hacer, y no en términos de *cómo* debe hacerlo. Este principio deja máxima flexibilidad para generar y seleccionar conceptos del producto.

Existen distintas maneras de identificar las necesidades del cliente, en particular en este proyecto se propone realizar entrevistas con el Comitente, a saber: la gerencia de la empresa (quienes solicitan la máquina) y los operarios (quienes son los encargados de realizar las tareas de limpieza de las barras).

B. Especificaciones Técnicas Objetivo

Tal como se mencionó anteriormente, las necesidades del cliente se expresan en “lenguaje del cliente” (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013), sin embargo, estas dejan mucho margen de interpretación subjetiva. Por esta razón, se busca traducir las necesidades del cliente a un conjunto de especificaciones precisas y mensurables, lo que permite que, al cumplir esas especificaciones se logre la satisfacción de las necesidades del cliente. Las Especificaciones Técnicas se definen a partir de una métrica y un valor (ideal y marginal).

Como ilustra la Figura 7, las especificaciones objetivo se establecen después de que se han identificado las necesidades del cliente, pero antes de que los conceptos del producto se hayan generado y se haya seleccionado el más prometedor.

El proceso de establecer las especificaciones objetivo consiste en los siguientes pasos:

- Paso 1: Elaborar la lista de métricas, considerando que: la métrica debe ser completa, deben ser variables dependientes (no independientes), y deben ser prácticas. Cabe destacar que algunas métricas no se pueden traducir fácilmente en métricas cuantificables.
- Paso 2: Búsqueda y análisis de productos existentes en el mercado (*Benchmarking*).
- Paso 3: Establecer valores meta ideales y marginalmente aceptables. El valor ideal es el mejor resultado que se puede esperar, mientras que el valor marginalmente aceptable es el valor de la métrica que haría viable el producto desde el punto de vista económico.

C. Generación de Conceptos

El concepto de un producto es una descripción aproximada de la tecnología, principios de trabajo y forma del producto. Es una descripción concisa de la forma en que el producto va a satisfacer las necesidades del cliente (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013). La Figura 8 muestra un esquema adaptado que permite explorar en forma sistemática el espacio de conceptos solución.

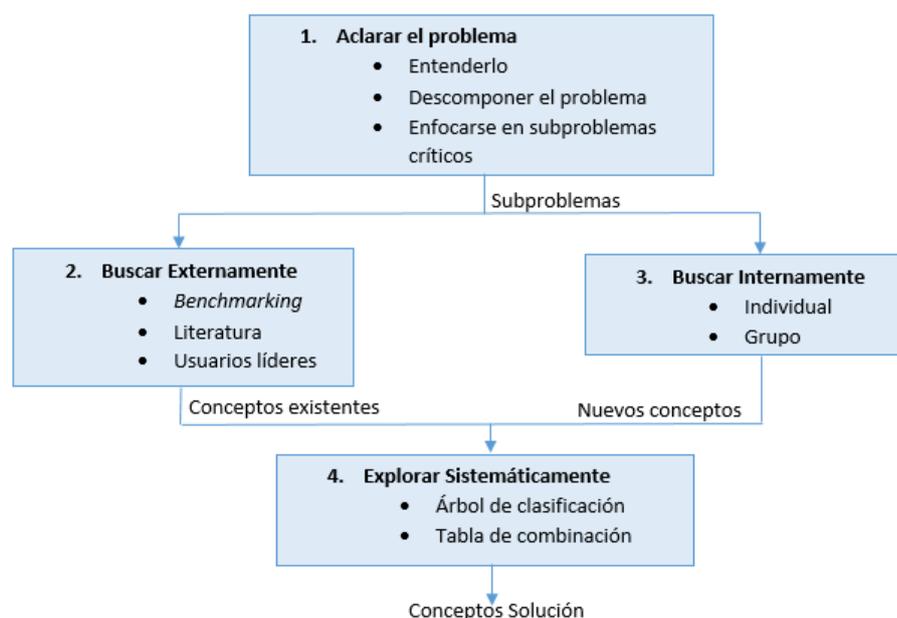


Figura 8. Método de generación de conceptos adaptado (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).

Existen retos en el diseño de un producto que son muy complejos para ser resueltos como un solo problema y se pueden dividir en varios subproblemas más sencillos (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013). El primer paso para la generación de conceptos es aclarar el problema, y para ello se emplea el proceso denominado descomposición. En este trabajo se realiza una descomposición funcional, la cual consiste en representar un problema como una caja negra (ver Figura 9) que opera con flujos de materia, energía y señales.



Figura 9. Caja negra (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013).

Luego, se debe descomponer la caja negra en subfunciones para crear una descripción más específica de lo que el producto debe hacer pero sin implicar un principio tecnológico específico. Este proceso se repite hasta que la subfunción sea lo suficientemente sencilla como para trabajar con ella. Cabe destacar que cada subfunción se expresa en forma tal que no implique ningún concepto particular de solución física. El resultado final, es un Diagrama de Funciones, en el cual se representa mediante una caja cada subfunción, y mediante flechas diferenciadas, cada flujo de materia, energía e información (señales). En el diagrama existe un orden lógico de actividades de izquierda a derecha.

Una vez que se completa la descomposición del problema, se agrupan las funciones afines en bloques y se proponen conceptos solución para cada bloque individualmente. El equipo escoge los subproblemas que sean más críticos para el éxito del producto, y se concentra en ellos a la hora del desarrollo del concepto.

El segundo paso para la generación de conceptos, acorde a lo mostrado en la Figura 8, es buscar externamente para encontrar soluciones existentes al problema general y a los subproblemas específicos. En realidad, este paso se presenta de manera continua en todo el proceso de desarrollo, y está directamente relacionado con el análisis de *benchmarking*.

El tercer paso consiste en el uso del conocimiento personal y del equipo de diseño para generar conceptos solución. Se suele llamar lluvia de ideas (*brainstorming*) y Ulrich,

[K. & Eppinger, S. \(2013\)](#) proponen seguir cuatro directrices para mejorar esta búsqueda: suspender el juicio, generar muchas ideas, aceptar ideas que puedan parecer no factibles, y usar medios gráficos y físicos para registrar y comunicar las ideas.

Por último, en el cuarto paso, se debe explorar sistemáticamente el espacio solución. Este paso consiste en organizar y sintetizar todas las soluciones a los subproblemas obtenidas de la búsqueda interna y externa, y combinarlos para obtener distintos conceptos del producto o máquina en general.

D. Selección del Concepto Solución

En esta instancia se deben evaluar los conceptos con respecto a las necesidades del cliente y otros criterios (a definir por el equipo de diseño), comparando sus puntos fuertes y débiles, y seleccionando uno o más para su posterior investigación, prueba o desarrollo ([Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013](#)).

E. Especificaciones Técnicas Finales

Una vez seleccionado el concepto, se elabora el plan de desarrollo para continuar el proceso de diseño y se revisan las especificaciones técnicas. Las especificaciones que originalmente eran sólo objetivos expresados como amplios rangos de valores son ahora refinadas y se hacen más precisas ([Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013](#)).

Finalizar las especificaciones es difícil debido a las concesiones, es decir, relaciones inversas entre dos especificaciones que son inherentes en el concepto seleccionado del producto. Las concesiones ocurren con frecuencia entre diferentes métricas técnicas de rendimiento, y casi siempre se presentan entre métricas técnicas de rendimiento y costo. La parte difícil de refinar las especificaciones es decidir cómo resolver esas concesiones.

Como resultado de la etapa de Diseño Conceptual, se obtiene una primera aproximación de la arquitectura del producto en base al concepto solución seleccionado. La arquitectura de un producto es el esquema por el cual los elementos funcionales del producto se acomodan en módulos o subsistemas físicos que interactúan entre sí. A partir de esto, se define luego la descomposición del producto en componentes físicos, los cuales se definen con un mayor nivel de aproximación en la etapa de Ingeniería Básica.

4.2.3. Ingeniería Básica

En esta etapa, una vez seleccionado el concepto de solución, se determina la configuración de diseño global y definitiva del producto. Este paso es crucial, ya que proporciona una visión general de los materiales, formas, dimensiones y el proceso de fabricación necesarios para concretar el producto final.

Los tres elementos principales que se deben considerar en esta etapa son:

1. **Materiales:** La elección de materiales es esencial para cumplir con las características deseadas del producto, incluyendo resistencia, durabilidad, peso, y costo. Los materiales seleccionados deben ser adecuados para el diseño y las condiciones de funcionamiento del producto.
2. **Formas y dimensiones:** El diseño del producto debe considerar formas y dimensiones que sean funcionales, ergonómicas, y eficientes. Además, se deben buscar soluciones que reduzcan el número de piezas y la complejidad de la fabricación, sin comprometer la funcionalidad.
3. **Proceso de fabricación:** Es importante seleccionar un proceso de fabricación que sea eficiente y rentable para la producción del producto. La elección del proceso puede influir en el diseño del producto y viceversa, por lo que se deben tomar decisiones cuidadosamente.

Durante esta etapa, los trabajos se centran en actividades típicas de los departamentos de diseño, como el uso de nuevas técnicas de modelización y simulación (CAD/CAE), prototipado y ensayos. Los profesionales en esta etapa desarrollan las piezas, elementos y conjuntos que compondrán el producto.

Las actividades de diseño son iterativas, es decir, implican un ciclo de diseño, prueba, evaluación y ajuste continuo hasta alcanzar un diseño óptimo en función de los recursos disponibles. En las fases de simulación y evaluación de las soluciones, es recomendable, de ser requeridos, desarrollar prototipos funcionales y realizar pruebas de fiabilidad, durabilidad y rendimiento del producto.

Estos esfuerzos permiten a los diseñadores optimizar el diseño del producto y asegurarse de que cumpla con los requisitos de calidad y rendimiento establecidos, al tiempo

que se mantienen dentro de los límites de costos y recursos establecidos.

La salida de esta fase por lo general comprende un diseño geométrico del producto, una especificación funcional de cada uno de los subsistemas del producto y un diagrama de flujo preliminar del proceso para el ensamble final.

4.2.4. Ingeniería de Detalle

Es la especificación completa de la geometría, materiales y tolerancias de todas las partes únicas del producto y la identificación de todas las partes estándar a ser adquiridas por proveedores. La salida de esta fase es la documentación de control de la máquina, es decir, los planos de las piezas a fabricar, especificaciones de piezas compradas y planes del ensamble del producto.

4.2.5. Fabricación

Consiste en la fabricación de las partes de diseño *ad-hoc* y/o adquisición de todos los componentes estándar necesarios para realizar el posterior ensamble y puesta en marcha de la máquina.

4.2.6. Pruebas y Refinamiento

En este paso se ponen a punto todos los parámetros de control de la máquina para su óptimo funcionamiento.

5. DESARROLLO

En este capítulo se presenta el desarrollo de las distintas etapas según la metodología propuesta. Siguiendo las pautas expuestas en el marco teórico se procedió, en primera instancia, a recolectar información acerca del proyecto. En este sentido, la misma se obtuvo a partir de visitas a la empresa, en las que se mantuvieron reuniones con la gerencia y con el personal afectado a las tareas. También se realizó una búsqueda bibliográfica y revisión de documentación.

5.1. Declaración de Misión

A partir de las consideraciones que motivan el desarrollo de este proyecto, y de la primera entrevista que se mantuvo con el personal de la empresa, se definió la Declaración de Misión. A continuación, se detallan las directrices que guiarán el desarrollo del proyecto:

Título del Proyecto:

- Máquina para limpieza exterior de barras de perforación.

Descripción del Proyecto:

- Máquina que remueve el óxido de la superficie exterior de barras de perforación.

Propuesta de Valor del Proyecto:

- Limpiar barras de perforación en forma autónoma y con mayor rapidez que el método manual comúnmente empleado.

Demandante:

- Empresa que presta servicios de metalmecánica y Ensayos No Destructivos (END).

Suposiciones y Restricciones:

- Fuente de potencia eléctrica.
 - Diseño modular.
-

- Superficie disponible para su instalación.
- Limpieza mecánica (considerando que es práctica habitual en la industria realizar este tipo de limpieza para remover los residuos que se depositan sobre las barras de perforación).

Involucrados:

- Personal técnico de la Empresa.
- Docentes investigadores.

5.2. Diseño Conceptual

Una vez definida la Declaración de Misión, se pasa a la etapa de Desarrollo del Concepto. En esta etapa, tal como se mostró en la Figura 7, se desarrollan las siguientes tareas específicas:

- Identificación de las necesidades del cliente.
- Definición de las especificaciones técnicas objetivo.
- Generación de los conceptos alternativos.
- Selección de un concepto solución, para su posterior desarrollo.
- Definición de las especificaciones técnicas finales.

5.2.1. Identificación de Necesidades

Con el objetivo de identificar las necesidades del cliente, se realizaron diversas reuniones con el Comitente. En las mismas se entrevistó a la gerencia y al personal involucrado, y se observó la secuencia de tareas realizadas para la limpieza e inspección de las barras de perforación.

La Tabla 1 muestra los enunciados del cliente y las necesidades interpretadas. Cabe destacar que muchas de las expresiones vertidas en la tabla fueron obtenidas directamente de comentarios realizados por distintas personas de la empresa, y no como resultado estricto de un cuestionario.

Tabla 1. Necesidades del Cliente.

Expresión del cliente	Necesidad interpretada
<i>Trabajamos con barras rango 2 y 3, de 9.6 y 14.3 m de largo respectivamente.</i>	La máquina cepilla barras rango 2 y 3.
<i>Las barras pesan entre 400 y 500 kg cada una.</i>	La máquina debe soportar el peso de al menos una barra (400-500 kg).
<i>Se limpian barras de 3 1/2", 4", 4 1/2" y 5" de diámetro en cuerpo.</i>	La máquina limpia barras de 3 1/2", 4", 4 1/2" y 5" de diámetro en cuerpo.
<i>Si bien ustedes se van a encargar de la parte de la limpieza, se debería tener en cuenta que el proceso posterior de inspección demanda mucho tiempo.</i>	La máquina permite mover la barra para realizar la inspección por Inducción Electromagnética (EMI).
<i>Con lluvia no se puede amolar ni inspeccionar, es un problema.</i>	La máquina funciona normalmente a la intemperie.
<i>Se debe limpiar el extremo de la barra donde el diámetro es mayor que en el cuerpo.</i>	La máquina permite la limpieza de distintos diámetros en una misma barra (<i>tool joint</i> y cuerpo).
<i>La limpieza exterior de la barra se realiza mediante amolado, la interior por soplado y la de la rosca es de forma manual.</i>	La máquina permite la limpieza exterior de las barras.
<i>El lado del PIN de la barra tiene el número de serie de la barra es por esto que se amola un poco más.</i>	La máquina permite la limpieza tal que el número de serie de la barra quede visible.
<i>Actualmente limpiamos e inspeccionamos 40 barras por día y nos gustaría llegar a 100.</i>	La máquina limpia 100 barras por día.
<i>Tenemos dos "cuellos de botella": amolado exterior y la inspección con "Buggy".</i>	La máquina permite optimizar el tiempo de limpieza de la barra y de la inspección por inducción electromagnética.
<i>Se utilizan 20 cepillos por mes.</i>	La máquina optimiza el uso de los cepillos para limpieza.
<i>Utilizamos la norma DSI.</i>	El grado de limpieza obtenido cumple con los requerimientos de la norma DSI.
<i>Me gustaría en lo posible utilizar motores que no usen carbones.</i>	La máquina emplea motores trifásicos sin carbones.
<i>Tenemos un espacio disponible aproximado de 40 × 15 m.</i>	La máquina tiene dimensiones acordes para ser instalada en un espacio de 40 × 15 m.

Para continuar con el proyecto, una vez identificadas las necesidades del cliente se debe establecer la importancia relativa de las mismas, lo cual permite obtener una valoración numérica de cada necesidad (Ulrich, K. & Eppinger, S., 2013). Para ello, se utiliza el método menos preciso pero más veloz, que consiste en basarse en la experiencia del equipo de diseño. La escala de ponderación se presenta en la Tabla 2. En la Tabla 3 se muestran las necesidades interpretadas con su importancia relativa.

Tabla 2. Escala de ponderación.

Coficiente	Importancia atribuida a la necesidad
1	Indeseable
2	No es importante
3	No es necesaria
4	Altamente deseable
5	Crítica

Tabla 3. Necesidades y su importancia relativa.

Nº	Necesidad interpretada	Imp
1	La máquina cepilla barras rango 2 y 3.	5
2	La máquina debe soportar el peso de al menos una barra (400-500 kg).	5
3	La máquina limpia barras de 3 1/2, 4, 4 1/2 y 5 in de diámetro en cuerpo.	5
4	La máquina permite mover la barra para realizar la inspección por inducción electromagnética (EMI).	5
5	La máquina funciona normalmente a la intemperie.	3
6	La máquina permite la limpieza de distintos diámetros en una misma barra (<i>tool joint</i> y cuerpo).	5
7	La máquina permite la limpieza tal que el número de serie de la barra quede visible.	4
8	La máquina limpia 100 barras por día.	5
9	La máquina permite optimizar el tiempo de limpieza de la barra y la inspección por EMI.	3
10	La máquina optimiza el uso de los cepillos para limpieza.	2
11	El grado de limpieza obtenido cumple con los requerimientos de la norma DS1.	5
12	La máquina emplea motores con una larga vida útil.	3
13	La máquina tiene dimensiones acordes para ser instalada en un espacio de 40 × 15 m.	5

A continuación, y dadas las características del proyecto, se realizó una búsqueda de la normativa de aplicación con el objetivo de identificar requerimientos específicos previo a la definición de las especificaciones técnicas de la máquina.

5.2.2. Normativa de Referencia

En este apartado, se detallan los aspectos de mayor relevancia obtenidos de las siguientes normas analizadas:

- Norma [API 5DP \(2015\)](#) - *Petroleum and natural gas industries — Steel drill pipe*.

Esta norma especifica las condiciones técnicas de suministro de barras de perforación de acero con extremos del cuerpo recalcados y *tool-joints* soldados, para uso en operaciones de perforación y producción en las industrias del petróleo y del gas natural, para tres niveles de especificación PSL (por sus siglas en inglés, *Product Specification Level*), a saber: PSL-1, PSL-2 y PSL-3, siendo este último el más exigente en cuanto a los requisitos establecidos por la norma.

También, detalla la configuración típica de una barra de perforación indicando sus componentes principales. En este sentido, proporciona información referente a:

- Dimensiones generales,
 - Masas asociadas, y
 - Propiedades mecánicas,
 - Entre otros.
- Norma [API RP 7G-2 \(2015\)](#) - *Recommended Practice for Inspection and Classification of Used Drill Stem Elements*.

Esta práctica recomendada especifica la inspección requerida para cada nivel de especificación (según clasificación indicada en la misma), así como los procedimientos específicos y los ensayos requeridos para cada elemento de la barra de perforación.

- Norma [DS-1 \(2004\)](#) - *Drill Stem Inspection*.

Esta norma define treinta y un métodos de inspección, entre los cuales se incluyen: inspección visual, control dimensional, medición de espesores por ultrasonido, inspección electromagnética, e inspección con líquidos penetrantes, entre otros. Cada uno de estos métodos se desarrolla considerando:

- Próposito del ensayo.
- Equipo de Inspección.
- Preparación.
- Calibración.
- Procedimiento de Inspección.
- Criterios de Aceptación.
- Registros.

En particular, para el caso de ensayos por Inducción Electromagnética (EMI) respecto a la preparación de la superficie, la norma especifica que todas las superficies (de recalque a recalque) deben estar limpias hasta el punto en que la superficie de metal esté visible y no se sienta pegajosa al tocarse. Las capas de pintura o barniz transparente de menos de 0,010 in de espesor son aceptables. Cualquier condición que interfiera con el movimiento del equipo de inspección sobre el tubo deberá corregirse.

5.2.3. Especificaciones Técnicas Objetivo

Una vez definidas las necesidades del cliente, se deben establecer las especificaciones técnicas, las cuales permiten describir el producto en forma precisa y mensurable. Tal lo explicado en la sección 4.2.2, primero se definieron las métricas asociadas a cada necesidad (ver Tabla 4), y se les asignó una importancia relativa (según Tabla 2).

Tabla 4. Métricas.

Nº	Nº Nec.	Métrica	Imp.	Unidad
M1	1, 4	Longitud efectiva de limpieza	5	m
M2	2	Peso que soporta	5	kg
M3	3, 6	Diámetro de limpieza (mínimo-máximo)	5	mm
M4	3, 6	Rango de ajuste de los cepillos (en dirección transversal a la barra)	5	mm
M5	5	Grado de protección IP	3	Nº
M6	6, 7, 11	Presión del cepillo sobre la barra	5	MPa
M7	8, 4, 9	Tiempo de limpieza de cada barra	4	s
M8	10	Durabilidad de los cepillos	3	h
M9	12	Durabilidad del motor	2	Años
M10	13, 1	Dimensiones de la máquina (largo-ancho)	5	m x m

Análisis de *Benchmarking*

Luego, se realizó un estudio de *Benchmarking* en el cual se analizaron cuatro máquinas disponibles en el mercado que cubren, en su totalidad o parcialmente, las necesidades detectadas, obteniéndose la siguiente información:

1. *Hub City Iron Works PCM-LT*

Esta marca (<https://hubcityironworks.com/>) ofrece muchos modelos, pero se ha seleccionado el más simple (ver Figura 10), ya que cumple con las prestaciones requeridas.



Figura 10. *Hub City Iron Works PCM-LT*.

Sus características principales son:

- Cepillo fijo, avance y giro de la barra en simultáneo.
- Un cepillo de alambre tipo rodillo.
- Doble suministro de energía hidráulica: una bomba hidráulica para los motores de transporte y equipamiento auxiliar, y otra para el cepillo.
- Sistema de cepillo "flotante" para acomodarse a irregularidades.
- Lanza para limpieza interior de la barra.
- Velocidad ajustable.
- Sistema de recolección de polvo.
- Configuración de carga de barra derecha o izquierda.
- Espaciado entre estaciones de ruedas 1,8 m.

- Capacidad de procesar barras rango 2.
- Diámetro mínimo en el cuerpo: $OD_{min} = 2-3/8''$
- Diámetro máximo en el cuerpo: $OD_{max} = 5''$
- Máximo diámetro en el *tool joint*: $OD_{max} = 7-1/4''$
- Requerimiento eléctrico: 220/480 V, 3 fases, 50/60 Hz.

2. *R&R Manufacturing Tubular Cleaning Unit, Base Model 10500.016*

Esta marca (<https://rr-mfg.com/>) también ofrece una amplia cantidad de modelos pero se ha seleccionado el más simple (ver Figura 11).



Figura 11. *R&R Manufacturing, Base Model 10500.016.*

Posee las siguientes características:

- Cepillo fijo, avance y giro de la barra en simultáneo.
- Siete (7) cepillos de alambre ensamblados en uno: ancho de cada cepillo 50,8 mm, diámetro de cada cepillo 254 mm.
- Sistema neumático de cepillo "flotante" para acomodarse a irregularidades.
- Sistema de limpieza interior de la barra.

- Sistema de recolección de polvo.
- 40 HP de potencia eléctrica para el sistema hidráulico.
- Configuración de carga de barra derecha o izquierda.
- Espaciado entre estaciones de ruedas 1,8 m.
- Capacidad de procesar barras rango 2.
- Diámetro mínimo en el cuerpo: $OD_{min} = 2-3/8''$
- Diámetro máximo en el cuerpo: $OD_{max} = 5''$
- Requerimiento eléctrico: 220/480 V, 3 fases, 50/60 Hz.

3. *R&R Manufacturing Tubular Cleaning Unit, PUP MAX*

R&R Manufacturing también ofrece un limpiador de juntas y herramientas de perforación, como se puede ver en la Figura 12. La principal diferencia de este tipo de máquina respecto a las ya analizadas, es que es el cepillo el que se mueve longitudinalmente, proporcionando una alternativa respecto a las demás.



Figura 12. *R&R Manufacturing PUP MAX*.

Sus características principales son:

- Cepillo móvil, solo giro de la barra.
- Un cepillo de alambre tipo rodillo.
- Sistema de cepillo "flotante" para acomodarse a irregularidades.
- Longitud de limpieza de 0,9 a 4,5 m.
- Diámetro mínimo en el cuerpo: $OD_{min} = 2-3/8''$
- Diámetro máximo en el cuerpo: $OD_{max} = 10-3/4''$
- Requerimiento eléctrico: 230/480 V, 3 fases, 50/60 Hz.

4. *HTR Inc. Cleaning Machine*

La Figura 13 muestra una fotografía de la máquina (<https://www.htr-tx.com/>). La misma posee las características enumeradas a continuación:



Figura 13. *HTR Inc. Cleaning Machine.*

- Cepillo fijo, avance y giro de la barra en simultáneo.
- Un cepillo con ajuste de carga por muelle.
- Lanza para limpieza del diámetro interior de la barra.
- Una unidad hidráulica de 30 HP para operar la limpieza.
- Una unidad hidráulica de 20 HP para operar el movimiento, carga y descarga de la barra.

- Diámetro mínimo en el cuerpo: $OD_{min} = 2-3/8''$
- Diámetro máximo en el cuerpo: $OD_{max} = 6-5/8''$
- Requerimiento eléctrico: 220 V, 3 fases, 60 Hz.
- Precio: USD 129.250,00

En la Tabla 5, se resumen las características, de las máquinas analizadas, que son más relevantes para este proyecto:

Tabla 5. Resumen de la información recopilada en el análisis de *Benchmarking*.

Característica	PCM-LT	Base Model 10500.016	PUP MAX	Cleaning Machine
Fabricante	Hub City Iron Works	R&R Manufacturing	R&R Manufacturing	HTR Inc.
Longitud de limpieza	Barras Rango 2 (R2) y Rango 3 (R3)	Barras Rango 2 y 3	0,9 a 4,5 m	Sin información
Diámetro de limpieza mínimo	2-3/8''	2-3/8''	2-3/8''	2-3/8''
Diámetro de limpieza máximo	7-1/4''	5''	10-3/4''	6-5/8''
Cantidad y tipo de cepillos	1 cepillo de alambre, tipo rodillo	7 cepillos de alambre, tipo rueda	1 cepillo de alambre, tipo rodillo	Sin información
Fuente de energía y potencia	Doble suministro de energía hidráulico: Uno para motores de transporte y equipo auxiliar, otro para el cepillo	Un sistema hidráulico de 40 HP	Sistema hidráulico	Dos sistemas hidráulicos: uno de 30 HP para limpieza, y otro de 20 HP para movimiento de la barra
Principio de funcionamiento	Cepillo gira - Barra gira y avanza	Cepillo gira - Barra gira y avanza	Cepillo gira y se desplaza - Barra gira	Cepillo gira - Barra gira y avanza
Sistema de Control	Consola de control (Manual).	Consola de control (Manual).	Consola de control (Manual).	Consola de control (Manual).

A partir del análisis de la información recopilada de máquinas similares, se puede mencionar lo siguiente:

- Todas las máquinas analizadas utilizan energía eléctrica para alimentar un sistema hidráulico.
- La energía hidráulica es utilizada para realizar el desplazamiento y/o movimiento del componente a limpiar, y el giro y/o movimiento del cepillo (para generar la limpieza). Las máquinas emplean un único sistema hidráulico o bien dos sistemas independientes para realizar dichas tareas.
- En todos los casos se observa que, sin importar el principio de funcionamiento, la longitud de las máquinas depende directamente de la longitud del componente que se pretende limpiar. Es decir, a mayor longitud de la barra mayor es la longitud requerida de la máquina. En cambio, el ancho de la máquina no guarda relación con la longitud del componente a limpiar.
- En todos los casos, se emplean cepillos de cerdas metálicas para realizar la limpieza (uno tipo rodillo, o bien, varios tipo rueda).
- Sólo se obtuvo el precio de referencia de una de las máquinas, el cual ronda los USD 130.000,00.

Sin embargo, del análisis de *Benchmarking* realizado se puede observar que ninguna de las máquinas existentes contempla la necesidad de realizar la Inspección por Inducción Electromagnética (EMI) inmediatamente después de finalizar la limpieza exterior de la barra.

Esta situación implica un mayor análisis en la etapa de Generación de Conceptos, dado que para el Cliente es imprescindible que la máquina permita mover la barra para realizar la inspección por EMI (Necesidad N°4 de la Tabla 3 - Importancia relativa 5 Crítica). En este sentido, además del movimiento de la barra, se deberá contemplar la colocación y/o movimiento del *Buggy*, el cabezal y la bobina (tal como se describió en la sección 5.2.1).

En este contexto, resulta necesario redefinir la Declaración de Misión del proyecto, para considerar la inspección por EMI, antes de continuar con el diseño y desarrollo de la máquina.

Redefinición de la Declaración de Misión

Título del Proyecto:

- Máquina para limpieza exterior e inspección de barras de perforación.

Descripción del Proyecto:

- Máquina que remueve el óxido de la superficie exterior de barras de perforación, y luego las inspecciona mediante el método de Inducción Electromagnética (EMI).

Propuesta de Valor del Proyecto:

- Limpiar barras de perforación en forma autónoma y con mayor rapidez que el método manual comúnmente empleado.
- Inspeccionar las barras inmediatamente después de la limpieza, disminuyendo los tiempos muertos y el esfuerzo requerido de los operarios.

Demandante:

- Empresa que presta servicios de metalmecánica y Ensayos No Destructivos (END).

Suposiciones y Restricciones:

- Fuente de potencia eléctrica.
- Diseño modular.
- Superficie disponible para su instalación.
- Limpieza mecánica (considerando que es práctica habitual en la industria realizar este tipo de limpieza para remover los residuos que se depositan sobre las barras de perforación).

Involucrados:

- Personal técnico de la Empresa.
 - Docentes investigadores.
-

Especificaciones Técnicas Objetivo

Considerando las necesidades del cliente, la normativa específica de aplicación, el análisis de *benchmarking* y las recomendaciones de fabricantes de cepillos, se definieron las especificaciones técnicas objetivo mostradas en la Tabla 6.

Tabla 6. Especificaciones Técnicas Objetivo.

Nº	Métrica	Valor ideal	Valor marginal	Unidad
M1	Longitud efectiva de limpieza	13,8	9,8	m
M2	Peso que soporta	1200	600	kg
M3	Diámetro de limpieza (mínimo-máximo)	63 - 210	88 - 185	mm
M4	Rango de ajuste de los cepillos (en dirección transversal a la barra)	>0 - 30	0 - 30	mm
M5	Grado de protección IP	IP-65	IP-54	-
M6	Presión del cepillo sobre la barra (rango)	0,2 - 0,5	>0 - 0,2	MPa
M7	Tiempo de limpieza de cada barra	130	260	s
M8	Durabilidad de los cepillos	> 8	8	h
M9	Motores asincrónicos	-	-	Subj.
M10	Dimensiones de la máquina (largo-ancho)	< 40 x 15	40 x 15	m x m

Los valores ideales y marginales asociados a cada métrica de la Tabla 6, se definieron a partir de las siguientes consideraciones:

- M1: Según la longitud máxima de barras rango 3 (valor ideal) y la longitud mínima de barras rango 2 (valor marginal), tomando los valores de longitudes dados por la Norma [API 5DP \(2015\)](#).
- M2: Se piensa como situación ideal que la máquina pueda procesar dos barras a la vez, lo que sería equivalente a que tenga un funcionamiento continuo. De esta manera, se asume como valor ideal que pueda soportar el peso de dos barras y como valor marginal el peso de una barra. A su vez, se considera el caso más desfavorable: barras rango 3 de 5 in en el cuerpo, con un peso lineal de 43,75 kg/m (según Norma [API 5DP \(2015\)](#)).
- M3: Tal como se identificó en las necesidades del cliente, la empresa requiere la limpieza de barras de 3 1/2, 4, 4 1/2 y 5 in en el cuerpo. Con lo cual, se adopta

como valor marginal el rango de diámetros comprendido entre el mínimo diámetro en el cuerpo (3 1/2 in) y el diámetro del *tool joint* de la barra más grande (7 1/4 in). Para el valor ideal se adopta una pulgada por debajo y por encima del rango definido como valor marginal.

- M4: Dada las características geométricas de las barras de perforación, para una barra determinada, la máquina debe limpiar una sección de diámetro variable. Considerando las dimensiones de las barras (según Norma [API 5DP \(2015\)](#)), se calcula la distancia radial a cubrir. Se adopta como valor marginal la máxima distancia radial entre el cuerpo de la barra y el *tool joint* (para las distintas barras identificadas en las necesidades del cliente), siendo el valor ideal un rango mayor a este.
 - M5: Dado que la máquina se encuentra a la intemperie, se busca que la lluvia no sea un impedimento para el trabajo. Se establece como valor ideal un estándar IP-65. El primer número indica una protección contra el ingreso de objetos sólidos siendo el 6 una protección completa contra el polvo. El segundo indica una protección contra el ingreso de agua (5 efectivo contra chorros de agua), según Norma [IEC 60529 \(2018\)](#). Se adopta como valor marginal un grado IP-54, es decir, no puede evitarse el ingreso de polvo pero la cantidad que ingresa no interfiere con el correcto funcionamiento de la máquina. El número 4 indica protección frente a salpicaduras.
 - M6: Los fabricantes de cepillos para limpieza mecánica (www.sitbrush.com), recomiendan una presión del cepillo sobre la superficie a limpiar entre 0,2 y 0,5 MPa. Como valor marginal, puede asumirse una presión mayor que cero y menor que 0,2 MPa.
 - M7: En la identificación de necesidades, la empresa manifestó la necesidad de limpiar 100 barras por día. Se toma este valor de referencia para determinar el valor marginal, asumiendo una jornada laboral de 8 hs menos un 10 % por tiempos muertos. Así resulta un tiempo de limpieza de 260 s (4,3 minutos). Se adopta como valor ideal la mitad de este valor.
 - M8: Según lo expresado por la empresa, actualmente emplean 20 cepillos por mes. Con lo cual, el valor marginal se determina a partir de esta referencia. Además,
-

se considerarán las recomendaciones de los fabricantes de cepillos (www.sitbrush.com) para aumentar la vida útil de los mismos.

- M9: Se identificó como necesidad utilizar motores con larga vida útil. Se establece como especificación utilizar motores que duren 15 años.
- M10: Tal como se identificó en las necesidades del cliente, el espacio disponible en el predio de la empresa es de 40 m de largo x 15 m de ancho. Estas medidas serán adoptadas como valor marginal. El valor ideal quedará definido por dimensiones menores a estas.

5.2.4. Generación de Conceptos

Para generar distintos conceptos solución que permitan cubrir las necesidades del cliente, se aplicó lo explicado en la sección 4.2.2. Específicamente se llevaron a cabo los pasos resumidos en la Figura 8, a saber:

PASO 1: Aclarar el problema

La tarea principal a desarrollar es la limpieza exterior de las barras de perforación (empleando cepillos de cerdas metálicas), con el objetivo de remover el óxido y los residuos sólidos adheridos a las mismas. A su vez, es importante considerar la inspección posterior y el espacio disponible para la instalación de la máquina (ver Tabla 3). Cabe mencionar que la utilización del equipo de inspección por EMI requiere que el movimiento relativo entre la barra y el equipo propiamente dicho, sea únicamente de traslación.

Primero se debe definir la función global de la máquina, es decir, identificar claramente *qué* debe hacer la misma. En este caso, para cumplir el objetivo de limpiar las barras, la máquina debe generar el contacto y movimiento relativo entre el cepillo y la barra de perforación, para provocar la perturbación física que de lugar al desprendimiento de los óxidos y sólidos adheridos (limpieza mecánica). Luego, para la inspección por EMI, la máquina debe permitir y/o generar el movimiento relativo de traslación entre la barra limpia y el equipo de inspección. Complementariamente, se aplicó el método de la caja negra, el cual permite analizar los flujos de materia, energía y señales que entran y salen del sistema, obteniéndose el diagrama de la Figura 14.

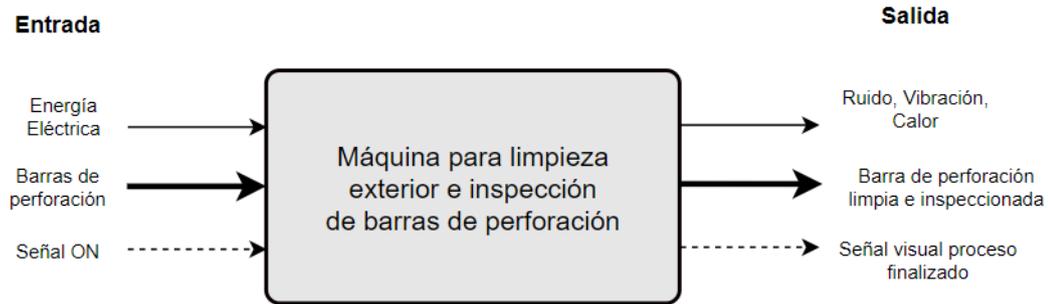


Figura 14. Caja negra de la máquina.

Una vez analizados los flujos a la entrada y a la salida, se realizó la descomposición funcional de la máquina mediante el diagrama de funciones o caja transparente (ver Figura 15). Este diagrama permite identificar las subfunciones que debe realizar la máquina para lograr la función global, es decir, se divide el problema complejo en problemas más sencillos que puedan resolverse de forma más enfocada.

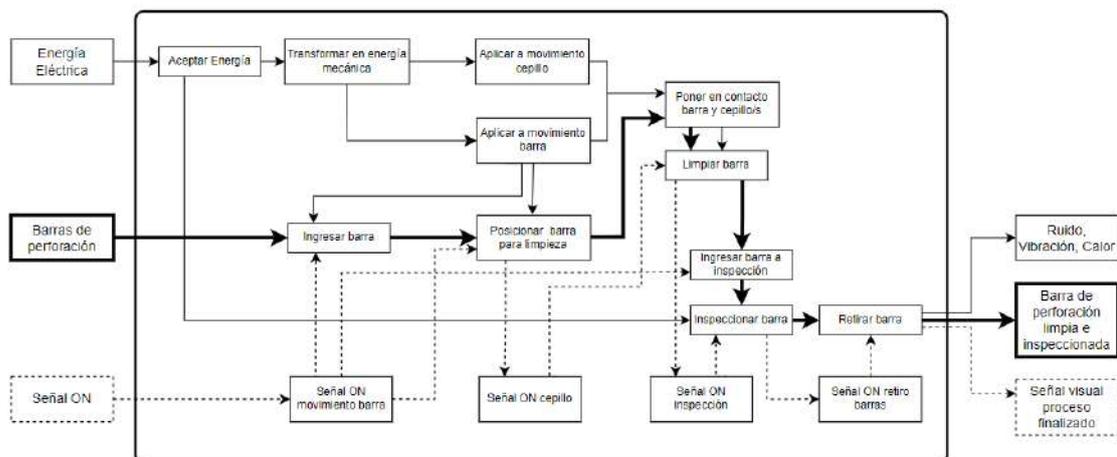


Figura 15. Diagrama de funciones o caja transparente.

Una vez realizada la descomposición funcional, se agruparon las subfunciones en bloques. En el diagrama de la Figura 16, se puede observar que se han identificado seis bloques físicos, a saber:

- Bloque I - Transformación de energía. Encargado de aceptar energía eléctrica y transformarla en energía mecánica.
- Bloque II - Movimiento cepillo. Encargado de aplicar la energía mecánica para

generar el movimiento de rotación del/los cepillos y, en caso de ser necesario, el movimiento de traslación de los mismos.

- Bloque III - Movimiento barra. Encargado de aplicar la energía mecánica para generar el movimiento de la barra, ya sea como movimiento puro de rotación, puro de traslación transversal o longitudinal, o bien, combinaciones de estos.
- Bloque IV - Limpieza barra. Encargado de generar el contacto entre los cepillos y la barra, en movimiento relativo, para que se produzca la limpieza.
- Bloque V - Inspección barra. Encargado de realizar la inspección por EMI.
- Bloque VI - Sistema de Control. Encargado de realizar el control para el normal funcionamiento de la máquina.

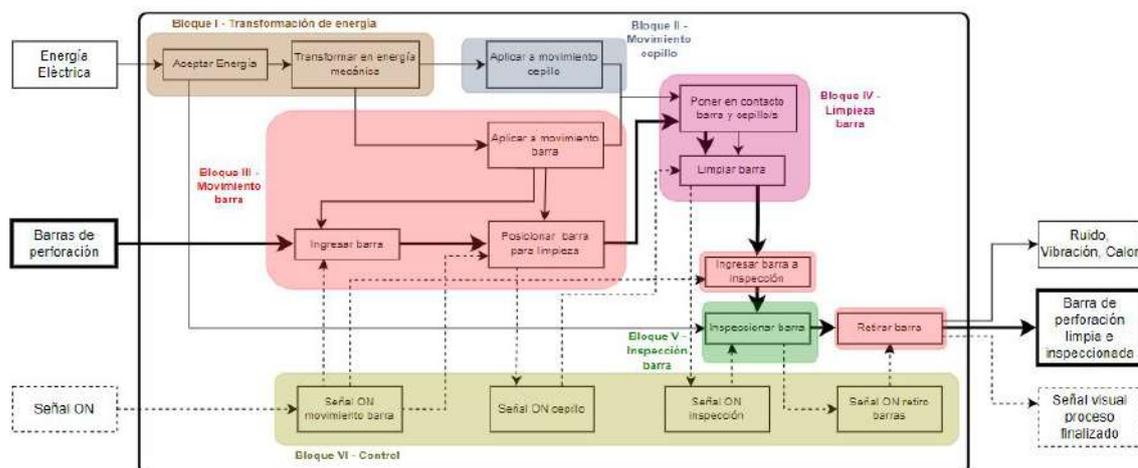


Figura 16. Bloques funcionales.

En particular, los Bloques I, II y III deben dar respuesta al subproblema crítico asociado a generar el movimiento relativo entre el/los cepillos y la barra, para que ocurra la limpieza una vez que se los pone en contacto. Por lo tanto, surge la necesidad de analizar en profundidad la combinación de movimientos a partir de los cuales se obtendría el movimiento relativo entre las partes. Por ejemplo, una combinación de movimientos posibles sería que el cepillo esté rotando fijo en el lugar (es decir, sin desplazarse longitudinalmente), y la barra rote y se desplace longitudinalmente. El análisis de las combinaciones de movimiento se retomará más adelante, en la búsqueda interna.

PASO 2: Buscar externamente

Para la búsqueda externa, se analizaron los principios de funcionamiento, características y tipo de uso de las máquinas mostradas en el *Benchmarking* de la sección 5.2.3. Se prestó especial atención a las distintas combinaciones de movimientos para lograr la limpieza de la barra. Además, se observó que en todas las máquinas se emplea energía hidráulica como energía para generar el movimiento de las barras en las distintas estaciones y/o movimiento de los cepillos.

El mecanismo de mayor utilidad encontrado consiste en un banco de ruedas inclinadas con el que se consigue el giro y avance de la barra en simultáneo. Además, se encontraron diversos dispositivos para el desplazamiento lateral de la barra, así como también, distintas configuraciones para la limpieza de la misma. Otro dato importante, es que los equipos de inspección utilizados en estas máquinas, son distintos al que posee la Empresa.

Por otro lado, no se pudieron realizar entrevistas con usuarios líderes, pero si se consideraron las observaciones, comentarios e indicaciones realizadas por los operarios que desarrollan actualmente la tarea en forma manual, ya que su experiencia y dificultades respecto al cepillado de las barras y al uso del equipo de inspección por EMI constituyó una fuente de información muy valiosa.

PASO 3: Buscar internamente

Para la búsqueda interna, se trabajó en forma individual, esbozando distintas propuestas en papel, con aportes puntuales por parte del Comitente y colaboradores. Al evaluar los Bloques Funcionales de la Figura 16, y considerando que la función crítica para que la máquina alcance el objetivo planteado, es asegurar el movimiento relativo entre el/los cepillos y la barra, se realizó un *brainstorming* o tormenta de ideas con el objetivo de analizar las distintas combinaciones de movimiento posibles.

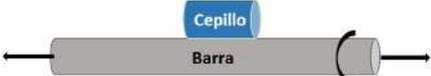
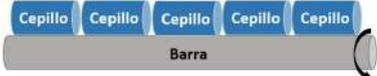
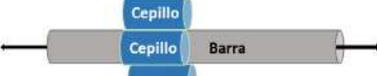
En primer lugar, se propusieron las opciones de movimiento para limpieza de la barra que se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. *Brainstorming*: movimientos para limpieza de la barra.

Limpieza del perímetro	Limpieza longitudinal
Girar barra	Movimiento axial del cepillo
Giro del cepillo (tipo satélite)	Movimiento axial de la barra
Cepillos en todo el perímetro	Cepillos en toda la longitud

A partir de la Tabla 7, surgen nueve combinaciones distintas de movimientos, para lograr la limpieza de la barra. Dichas combinaciones se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Combinaciones de movimientos posibles para la limpieza.

Combinación	Croquis
Girar barra + Movimiento axial del cepillo	
Girar barra + Movimiento axial de la barra	
Girar barra + Cepillos en toda la longitud	
Giro del cepillo (tipo satélite) + Movimiento axial del cepillo	
Giro del cepillo (tipo satélite) + Movimiento axial de la barra	
Giro del cepillo (tipo satélite) + Cepillos en toda la longitud	
Cepillos en todo el perímetro + Movimiento axial de la barra	
Cepillos en todo el perímetro + Movimiento axial del cepillo	
Cepillos en todo el perímetro + Cepillos en toda la longitud	

Asimismo, surge como desafío encontrar una disposición espacial de los componentes que permitan los movimientos necesarios para realizar la limpieza e inspección de las barras dentro de las dimensiones del terreno disponible. Para ello, se realizó un análisis proponiendo distintas opciones de distribución espacial (*layout*).

En la Figura 17, se presentan las dos disposiciones posibles. Además, se indica con flechas los movimientos necesarios para desplazar la barra desde el ingreso (1), a la estación de limpieza y/o inspección (caja azul), y luego a la salida (2).

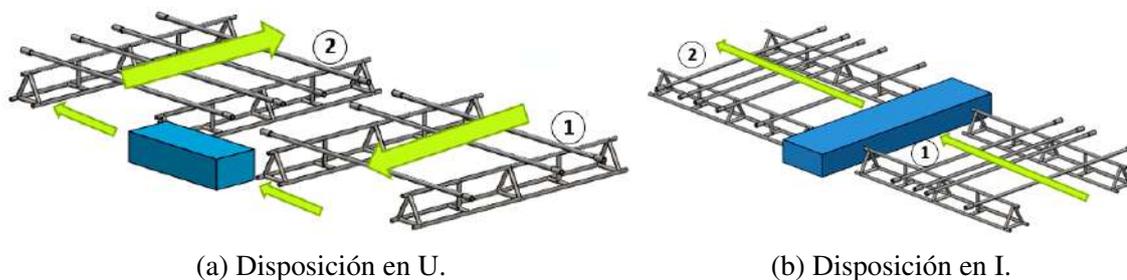


Figura 17. Disposiciones espaciales posibles.

En la Disposición en U (Figura 17a), las barras quedan posicionadas de forma favorable para realizar la inspección posterior con *Buggy* (es decir, el equipo de inspección por EMI permanecería fijo y la barra es la que se mueve axialmente), pero se requiere movimiento transversal y longitudinal de las barras.

Mientras que en la Disposición en I (Figura 17b), solo se emplea movimiento transversal de las barras entre estaciones, pero a su vez se requiere mucho espacio para maniobrar el autoelevador al ingreso y a la salida, lo cual está limitado por la dimensión de largo total de terreno disponible (40 m). Además, el posicionamiento para la inspección con *Buggy* es distinto, dado que en este caso el equipo de inspección por EMI debería moverse longitudinalmente sobre la barra (similar a como se realiza actualmente).

PASO 4: Explorar sistemáticamente

A partir de los bloques funcionales identificados (presentados en la Figura 16), y de la búsqueda externa e interna realizada previamente, se genera la matriz morfológica mostrada en la Figura 18. La misma consiste en plantear distintas alternativas de solución para cada uno de los bloques, para luego combinarlos y generar conceptos de la máquina que cumplan con todos los requisitos funcionales (Ullman, D. G., 2010).

Cabe mencionar que las alternativas de solución para el Bloque II y el Bloque III están directamente relacionadas con las combinaciones de movimiento propuestas en la Tabla 8, no habiendo considerado las opciones que surgían del giro del cepillo “tipo satélite” alrededor de la barra, por constituirse en un diseño que, *a priori*, sería muy complejo

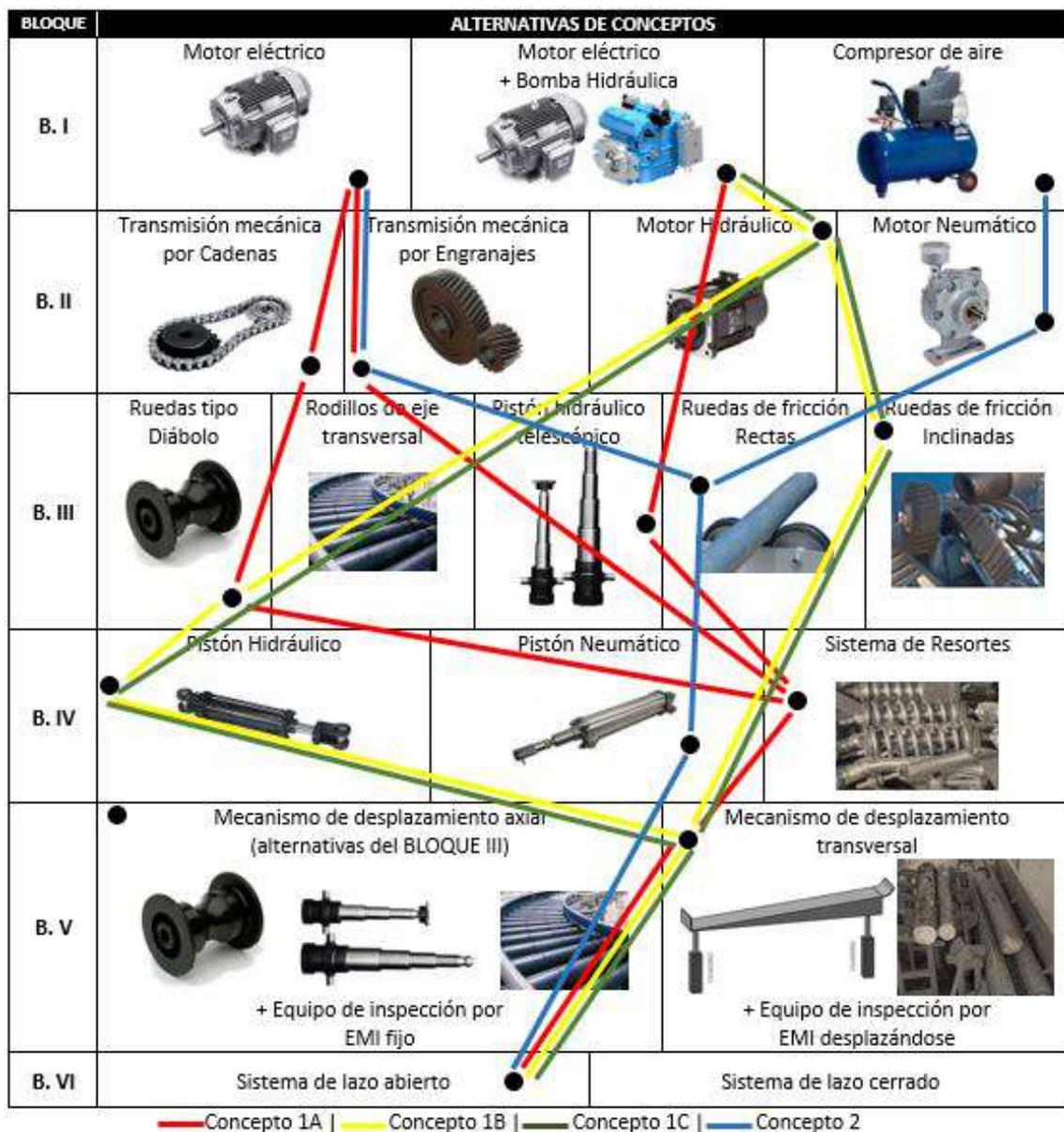


Figura 18. Matriz morfológica.

teniendo en cuenta que el cepillo, además, debe rotar sobre su propio eje.

También se observa, en este caso en particular, que las alternativas para dar solución al Bloque III - asociado al movimiento de la barra - están directamente relacionadas con las disposiciones de *layout* posibles (presentadas en la Figura 17), debido a la necesidad de generar el movimiento relativo sin perder de vista el requerimiento de dimensiones máximas de la máquina (asociado al terreno disponible). Es importante notar que la Disposición en I (Figura 17b) no admite que la barra se desplace para conseguir el movimiento relativo barra-cepillo. Por lo tanto, en este caso solo se pueden considerar las alternativas

en las que el cepillo sea el que se desplace.

Considerando todas las cuestiones previamente mencionadas, se propusieron cuatro conceptos de máquina distintos, tres en correspondencia con la Disposición de *layout* en U, y uno en correspondencia con la Disposición de *layout* en I. A continuación, se presentan los conceptos desarrollados.

CONCEPTO [1A]

En la Figura 19 se presenta el Concepto [1A]. El mismo surge de combinar el giro de la barra con el movimiento axial del cepillo, en una Disposición en U.

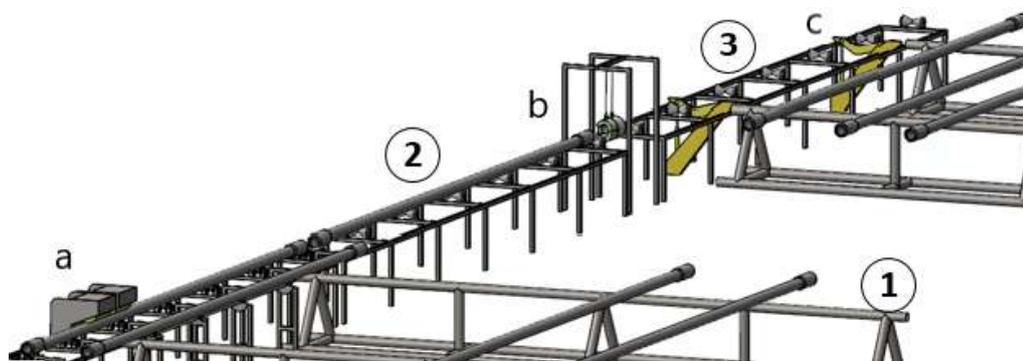


Figura 19. Concepto [1A].

Esta compuesto por tres estaciones. La primera (1) posee un juego de caballetes sobre el cual se apoyan las barras previo a su limpieza (ingreso). Luego, las barras son desplazadas - de a una - hacia un banco provisto de ruedas de fricción rectas (que hacen girar la barra), y un juego de cepillos (a) que se desplazan axialmente para limpiar toda la longitud de la misma. Para hacer rotar los cepillos se emplea un motor eléctrico con una transmisión mecánica por engranajes. Todo este conjunto se desplaza axialmente mediante un sistema mecánico de piñon y cremallera. Un sistema de resortes, dispuestos convenientemente, mantiene el contacto entre los cepillos y la barra en movimiento, para asegurar el contacto.

Una vez finalizada la limpieza, un pistón hidráulico telescópico desplaza la barra a la siguiente estación. Entre la segunda (2) y tercera (3) estación se realiza la inspección por EMI, pues el equipo de inspección (b) permanece fijo y la barra es la que se desplaza axialmente, sin girar. Para ello se emplean una serie de ruedas tipo diábolo, accionadas por un motor eléctrico y vinculadas entre sí mediante una transmisión por cadena. Cabe

señalar que, la estación (2) es de transición, y permite realizar la inspección de una barra limpia mientras se efectúa la limpieza de otra. Por lo tanto, puede prescindirse de ella en el caso que no se desee la independencia de las tareas. Cuando se completa la inspección, la barra se ubica en la estación (3) para luego accionar los dispositivos de desplazamiento transversal (c) que permiten depositar la barra sobre caballetes e impulsarla hacia la salida.

CONCEPTO [1B]

En la Figura 20 se presenta el Concepto [1B]. El mismo surge de utilizar una Disposición en U, en la cual se emplea el giro y avance de la barra para que la misma pase de una estación a la otra, mientras el cepillo permanece fijo en el lugar.

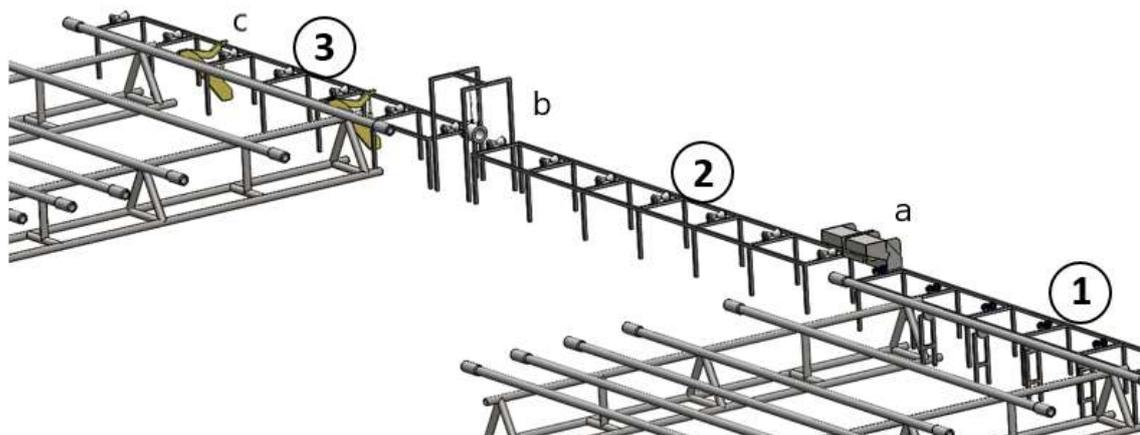


Figura 20. Concepto [1B].

Al igual que el concepto anterior, se compone de tres estaciones. Las barras ingresan sobre el juego de caballetes, y pasan a la estación (1) en donde se encuentra un banco equipado con ruedas de fricción inclinadas que propician el giro y avance de la barra hacia la estación (2). A diferencia del Concepto [1A], el juego de cepillos (a) para realizar la limpieza se encuentra fijo entre la estación (1) y la (2). En este caso, se emplea un sistema hidráulico (compuesto por bomba, motores, y pistón hidráulico) para el accionamiento de las ruedas inclinadas, para generar el giro de los cepillos y la presión de los mismos con la barra.

La barra llega a la estación (2), estación de transición, gracias al avance axial que permiten las ruedas inclinadas, y se apoya sobre un juego de ruedas tipo diábolo. Un sistema hidráulico acciona las ruedas de la estación (2), para permitir que la barra limpia

avance a la estación (3).

De la misma manera que se describió anteriormente para el Concepto [1A], entre la segunda (2) y la tercera (3) estación se realiza la inspección por EMI con el equipo de inspección fijo (b). Una vez finalizada la inspección, se desplaza la barra hacia la salida, empleando los dispositivos de desplazamiento transversal (c), accionados también hidráulicamente.

CONCEPTO [1C]

Este concepto respeta la Disposición en U, pero tiene una variante respecto a los dos conceptos anteriores: solo posee dos estaciones (ver Figura 21). Esto implica que la inspección por EMI deba realizarse de la misma manera que se hace en la actualidad.

Al igual que en el Concepto [1B], la limpieza se realiza entre las estaciones (1) y (2) mediante el juego de cepillos (a) fijo (posicionados en la parte inferior por lo que la presión se genera por el mismo peso de la barra), aprovechando el giro y avance de la barra gracias a las ruedas de fricción inclinadas. Una vez que la barra se encuentra en la estación (2) es depositada sobre el juego de caballetes, mediante los dispositivos de desplazamiento transversal (b), accionados hidráulicamente.

Previo a la salida, se realiza la inspección por EMI sobre los caballetes, empleando el mismo método utilizado actualmente (ver sección 2), el cual requiere la presencia permanente de dos operarios con lo cual no proporciona mejora alguna en lo que respecta a la etapa de inspección de la barra.

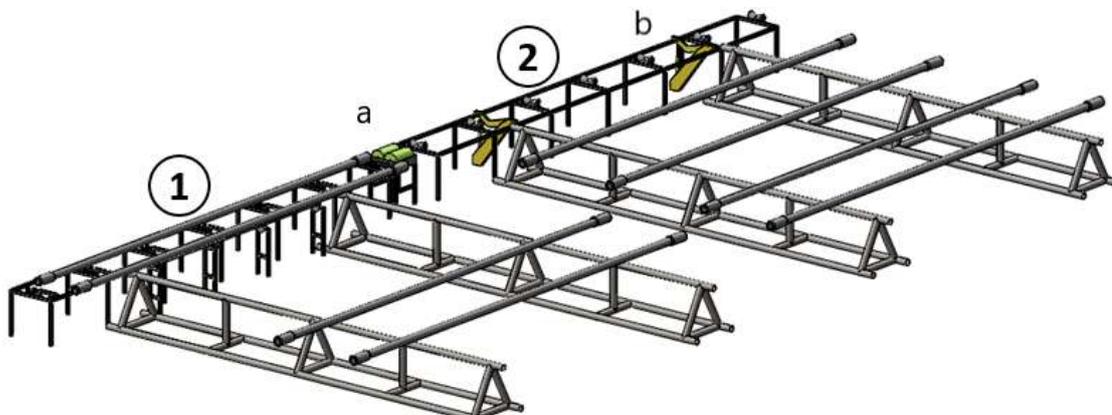


Figura 21. Concepto [1C].

CONCEPTO [2]

Este es el único concepto propuesto a partir de la Disposición en I (ver Figura 17b). Al igual que en el Concepto [1C], no se logra una mejora respecto a la etapa de inspección.

Este concepto consta de dos estaciones, tal como se observa en la Figura 22. La barra ingresa a la estación (1) con movimiento transversal desde los caballetes dispuestos para tal fin, y es depositada sobre el banco ubicado entre las estaciones (1) y (2). Allí se lleva a cabo la limpieza exterior de la barra, mediante el juego de cepillos (a), que se desplaza axialmente cubriendo toda la longitud, mientras la barra gira.

El banco de limpieza está equipado con ruedas de fricción rectas que permiten el giro de la barra (accionadas por un sistema electromecánico), y un sistema de motor eléctrico con transmisión mecánica por engranajes provoca el giro del cepillo, mientras que el desplazamiento axial del mismo se realiza mediante un sistema neumático.

Una vez completada la etapa de limpieza, se accionan los dispositivos de desplazamiento transversal (b), para desplazar la barra hacia la estación (2) en donde se realizará la inspección por EMI previo a la salida. Tal lo mencionado anteriormente, este concepto no proporciona mejora alguna en lo que respecta a la etapa de inspección de la barra, dado que debe realizarse de la misma manera que se realiza actualmente (ver sección 2).

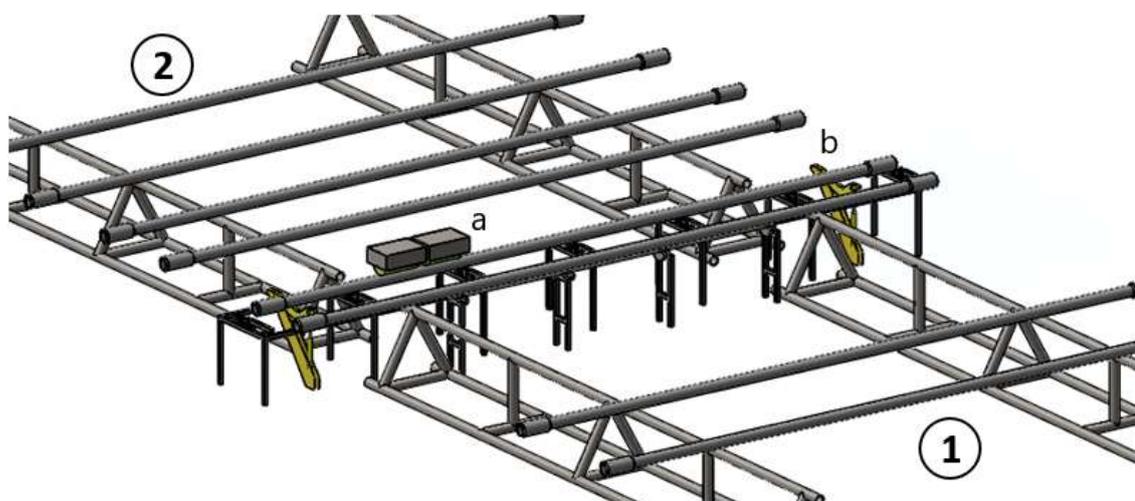


Figura 22. Concepto [2].

Comparación de conceptos

A partir de los conceptos propuestos, se puede observar que cada uno de ellos ofrece ventajas y desventajas respecto a los métodos empleados actualmente para realizar la limpieza e inspección de las barras. Con el objetivo de organizar la información, se elaboró una tabla comparativa (ver Tabla 9) en la que se resumen las características principales de cada uno de los conceptos desarrollados.

En la mencionada tabla se identifican aspectos en común de los distintos conceptos, sin embargo algunas características que pueden aparecer tildadas, no necesariamente implican una ventaja. Por ejemplo, los conceptos [1C] y [2] poseen la característica “utiliza la capacidad del *Buggy* de desplazarse solo”, pero esto no se constituye en una ventaja dado que implica que la inspección por EMI se realizaría de la misma manera que se hace actualmente, lo cual no es favorable para la empresa.

Tabla 9. Comparación de conceptos.

Característica	[1A]	[1B]	[1C]	[2]
El equipo de inspección por EMI queda fijo.	✓	✓	×	×
La barra queda posicionada favorablemente para la inspección.	✓	✓	×	×
Entra en el espacio disponible, ya sea que se utilicen barras rango 2 o rango 3.	×	×	✓	✓
Se utiliza la capacidad del <i>Buggy</i> de desplazarse solo.	×	×	✓	✓
Se debe conseguir el giro y el movimiento axial de la barra cada uno en forma independiente.	✓	×	×	×
El avance y giro de la barra se consigue con ruedas inclinadas.	×	✓	✓	×
El sistema queda fijo para barras rango 2 y 3.	×	×	✓	✓
El cepillado es independiente del tiempo de inspección.	✓	×	✓	✓
Reduce los tiempos muertos de la inspección por EMI.	✓	✓	×	×
El movimiento de la barra entre estaciones es simple.	×	×	×	✓
Con un movimiento se puede conseguir la entrada de una barra y salida de la otra en simultáneo a la estación de limpieza.	×	×	×	✓
Optimiza el uso del espacio para maniobrar el autoelevador al ingreso y a la salida.	✓	✓	×	×

Comentarios Adicionales

Respecto al Sistema de Control:

Existen dos formas básicas de sistemas de control, una es la denominada en lazo abier-

to y la otra en lazo cerrado. Con un sistema en lazo abierto la entrada se elige con base en la experiencia que se tiene con dichos sistemas para producir el valor de salida requerido. Esta salida sin embargo, no se ve modificada por el cambio en las condiciones de operación externas. En cambio, con un sistema de control en lazo cerrado se tiene una señal de retroalimentación hacia la entrada desde la salida, la cual se utiliza para modificar la entrada de modo que la salida se mantenga constante a pesar de los cambios en las condiciones de operación (Bolton, 2001).

Los sistemas en lazo abierto tienen la ventaja de ser bastante sencillos y en consecuencia de bajo costo, con buena confiabilidad. Sin embargo, con frecuencia son inexactos por que no hay corrección de errores. Los sistemas de lazo cerrado tiene la ventaja de ser capaces de igualar los valores reales a los requeridos. No obstante, si existen retrasos en el sistema pueden surgir problemas. Dichos retrasos propician que la acción correctiva llegue demasiado tarde, y como consecuencia, se obtienen oscilaciones en la entrada e inestabilidad. Con lo cual, los sistemas en lazo cerrado son más complicados que aquellos en lazo abierto, y más costosos, en parte debido a la gran cantidad de componentes (Bolton, 2001).

Es por esto que se optó por emplear un sistema de lazo abierto para el control de la máquina, en el cual el operador será el controlador, encargado de desarrollar la función de control y corrección. En los sistemas de control en lazo abierto los tipos de control más probables son el de dos posiciones (encendido-apagado o mejor conocido como *on-off*) o secuencias o acciones conmutadas por tiempo.

Respecto al Accionamiento y/o Transmisión:

Tanto en el Concepto [1B] como en el [1C], se contempló el uso de un banco de ruedas de fricción inclinadas para conseguir el avance y giro en simultáneo de la barra. Más allá de las opciones propuestas en cada concepto, para generar el accionamiento de las mismas se analizaron distintas alternativas, a saber:

- Accionamiento Neumático.
 - Accionamiento Electromecánico.
 - Accionamiento Hidráulico.
-

En primer lugar, un Accionamiento Neumático presenta ciertas ventajas respecto a: bajo costo de sus componentes, facilidad de diseño e implementación, riesgo nulo de explosión, conversión fácil al movimiento giratorio así como al lineal, posibilidad de transmitir energía a grandes distancias, y construcción y mantenimiento fáciles. Sin embargo, una de sus principales desventajas es la imposibilidad de obtener velocidades estables debido a la compresibilidad del aire, por lo cual no es posible conseguir una buena precisión en los movimientos ([Creus Sole, 2007](#)).

Otras desventajas son las posibles fugas que reducen el rendimiento y los altos costos. Un sistema neumático precisa de una estación de generación y preparación del aire comprimido formada por un compresor de aire, un depósito, un sistema de preparación del aire (filtro, lubricador y regulador de presión), una red de tuberías para llegar al utilizador y un conjunto de preparación del aire para cada dispositivo neumático individual ([Creus Sole, 2007](#)).

Por otro lado, en el caso de un Accionamiento Electromecánico se debería poner un motor eléctrico en cada rueda conductora, un variador de frecuencia (para poder regular la velocidad) y un PLC para el control de todo el sistema. Esto se debe a que vincular todas las ruedas conductoras utilizando un solo motor sería complejo desde el punto de vista mecánico, dado que los ejes de las ruedas están inclinados y separados una distancia considerable.

Finalmente, en el caso de un Accionamiento Hidráulico se tienen las siguientes ventajas: gran potencia transmitida con pequeños componentes, posicionamiento preciso, arranque con cargas pesadas, movimientos lineales independientes de la carga ya que los líquidos son casi incompresibles y pueden emplearse válvulas de control, operación suave e inversa, buen control y regulación y disipación favorable de calor. Pero se tienen como desventajas la polución del ambiente con riesgo de incendio y accidentes en el caso de fuga de aceite, la sensibilidad a la suciedad, el peligro presente debido a las excesivas presiones, y la dependencia de la temperatura por cambios en la viscosidad ([Creus Sole, 2007](#)).

Sin embargo, si se emplea un sistema hidráulico la variación de velocidad se puede conseguir con elementos de regulación de caudal o bombas y/o motores de caudal variable; la reversibilidad del sistema se logra en forma instantánea con una válvula direccional

adecuada; se puede realizar el paro o bloqueo brusco de cualquier movimiento, así como posterior arranque con carga; y el grupo motor puede separarse del actuador a tanta distancia como sea necesario, realizando la conexión solo por las correspondientes mangueras de alimentación y retorno.

Por lo expuesto, y teniendo en cuenta lo observado en máquinas existentes (sección 5.2.3), se decidió que el accionamiento y la transmisión de todo el sistema sería hidráulico. Pues, además de utilizarlo para el accionamiento del banco de ruedas inclinadas puede emplearse para hacer girar el/los cepillos, para accionar el banco de ruedas tipo diábolo (para desplazar la barra axialmente), y también para accionar los dispositivos para el desplazamiento transversal de las barras.

5.2.5. Selección del Concepto Solución

La selección del concepto solución se decidió en conjunto con la Empresa, debido a que cualquiera de los conceptos de máquina propuestos representa una solución de compromiso. El *Buggy* está diseñado para operar en campo (pensado para realizar la inspección como lo hace la Empresa actualmente), por lo que al hacerlo trabajar en línea genera un tiempo muerto para cerrar el cabezal. Además, demanda que la barra ingrese en forma axial y sin girar. Por otro lado, si se usan tres estaciones y se trabaja con barras rango 3, las dimensiones del terreno disponible no son suficientes, pues en el caso de los conceptos [1A] y [1B] utilizar barras rango 3 implicaría 44 m de extensión de terreno.

En función de las características de las distintas disposiciones propuestas (resumidas en la Tabla 9), y dado que el porcentaje trabajado de barras rango 3 es inferior al 10 % (por lo que se pueden limpiar e inspeccionar con el método actual), la Empresa decidió diseñar la máquina sólo para barras rango 2.

De esta manera, seleccionó el Concepto [1B] (ver Figura 20) considerando que este permite aprovechar el giro y avance de la barra en la estación de limpieza (mediante el empleo de ruedas inclinadas), permite el empleo de sistema hidráulico para el movimiento de la barra y los cepillos, y también optimiza el uso del espacio disponible para la instalación de la máquina y el uso del autoelevador.

El concepto seleccionado se muestra en la Figura 23. El mismo consiste en un juego de caballetes levemente inclinados (para aprovechar el movimiento de las barras por gravedad), sobre el que se apoyan las barras para ser procesadas (ingreso). Hacia el final de los caballetes se encuentra un dispositivo (ver Figura 24a) que permite trasladar la barra hacia la primera estación, es decir, hacia el banco de ruedas de fricción inclinadas (Figura 24b). Estas últimas permiten el giro y avance simultáneo de la barra. Entre la estación uno y la dos se encuentran fijos los cepillos, los cuales rotan gracias a un motor hidráulico. Al accionar el banco de ruedas inclinadas, la barra atraviesa los cepillos y se produce la limpieza mecánica de la superficie exterior.

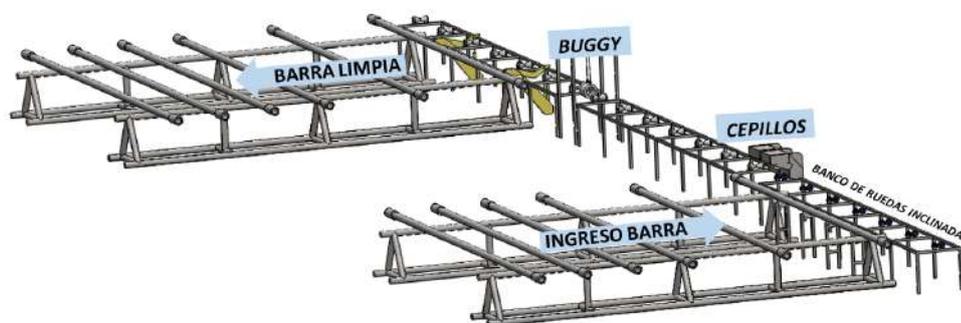


Figura 23. Concepto Solución - Máquina para limpieza e inspección de barras de perforación.

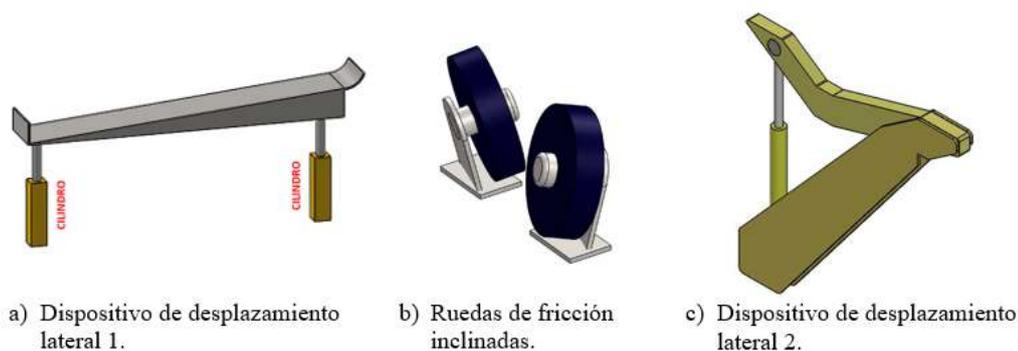


Figura 24. Componentes concepto solución.

Entre la estación dos y la tres, se ubica el equipo de inspección por EMI (el cual permanece fijo). Para realizar la inspección electromagnética se debe impulsar la barra axialmente, sin girar, a través del *Buggy*. Para esto es necesario que el cabezal sea abierto y cerrado por un operario, dada la geometría de la barra (extremos de mayor diámetro).

Una vez finalizada la inspección, el operario abre el cabezal y la barra se desplaza hasta

la tercer estación, donde luego se acciona el dispositivo de desplazamiento transversal (Figura 24c) para depositar la barra en los caballetes de salida. Nuevamente, el juego de caballetes en el que se apoyan las barras limpias e inspeccionadas se encuentran levemente inclinados hacia la salida.

En la Figura 25 se presenta la arquitectura de la máquina, incluyendo las dimensiones generales, considerando que la misma se desarrollará únicamente para barras rango 2.

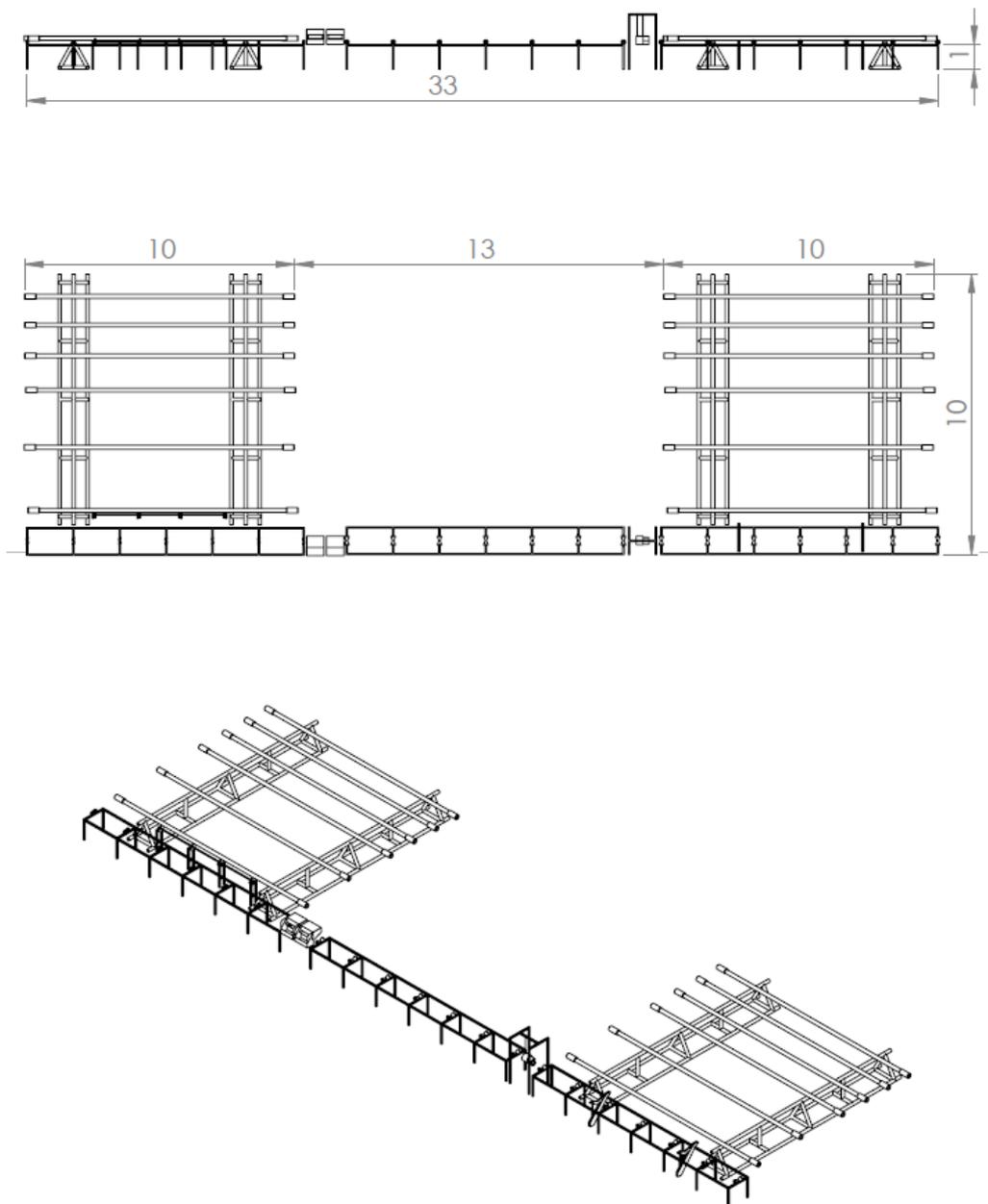


Figura 25. Disposición general de la máquina.

Nota: dimensiones indicadas en metros.

5.2.6. Especificaciones Técnicas Finales

A partir del Concepto Solución seleccionado, se refinaron las especificaciones definidas previamente (ver Tabla 6), considerando que la máquina se desarrollará sólo para barras Rango 2. De esta manera, se obtuvieron las especificaciones técnicas finales para la máquina de limpieza e inspección de barras de perforación, las cuales se presentan en la Tabla 10. Específicamente, se introdujeron cambios en las especificaciones técnicas asociadas a la longitud efectiva de limpieza, al peso que soporta la máquina y a las dimensiones de la misma.

Tabla 10. Especificaciones Técnicas Finales.

Nº	Métrica	Valor ideal	Valor marginal	Unidad
M1	Longitud efectiva de limpieza	>9,8	9,8	m
M2	Peso que soporta	900	450	kg
M3	Diámetro de limpieza (mínimo-máximo)	63 - 210	88 - 185	mm
M4	Rango de ajuste de los cepillos (en dirección transversal a la barra)	>0 - 30	0 - 30	mm
M5	Grado de protección IP	IP-65	IP-54	-
M6	Presión del cepillo sobre la barra (rango)	0,2 - 0,5	>0 - 0,2	MPa
M7	Tiempo de limpieza de cada barra	130	260	s
M8	Durabilidad de los cepillos	> 8	8	h
M9	Motores asincrónicos	-	-	Subj.
M10	Dimensiones de la máquina (largo-ancho)	35 x 10	40 x 15	m x m

Es fundamental destacar que el mayor grado de incertidumbre en la definición de los parámetros de diseño radica en la determinación de la fuerza de cepillado requerida para aplicar de manera efectiva la presión recomendada. Esta incertidumbre surge debido a la imposibilidad de establecer *a priori* el área efectiva de contacto sobre la cual actuará el cepillo, lo que dificulta la determinación de la fuerza mínima necesaria para asegurar una limpieza óptima.

Por lo tanto, se consideró necesario llevar a cabo pruebas experimentales para obtener información que permitiera establecer relaciones entre el proceso de limpieza y los parámetros operativos involucrados. Específicamente, mediante estas pruebas, se busca analizar cómo varía la eficacia de la limpieza en función de la fuerza aplicada y la velocidad de avance del cepillo. De este modo, se pretende obtener datos empíricos que

ayuden a definir los requisitos de diseño previo a la etapa de Ingeniería Básica. A tal fin, se llevaron a cabo pruebas experimentales según se detalla a continuación.

5.2.7. Análisis de Parámetros Operativos del Proceso de Limpieza

Arreglo Experimental:

En la Figura 26 se muestra el arreglo utilizado para llevar a cabo las pruebas destinadas a evaluar cómo los parámetros operativos afectan el proceso de limpieza de la barra. El arreglo consiste en dos soportes que sostienen un segmento de una barra. Entre estos soportes se colocaron celdas de carga tipo S, para medir la fuerza ejercida sobre la barra durante las operaciones de limpieza. Cada una de estas celdas de carga está conectada a un módulo de adquisición de datos de uso general (<http://www.hbm.com/>), disponible en el Área de Diseño Mecánico, lo que permite registrar los valores de fuerza aplicada.

El proceso de limpieza se llevó a cabo utilizando una amoladora de mano de 4", equipada con un cepillo de cerdas metálicas trenzadas, tipo rueda, de ancho 20 mm. Es importante tener en cuenta que los modelos específicos de la amoladora de mano y el cepillo utilizados pueden influir en los resultados de las pruebas, por lo que se deben tener en cuenta al interpretar los datos obtenidos.

Este arreglo experimental proporciona la capacidad de medir cuantitativamente la fuerza aplicada durante las operaciones de limpieza, lo que permitirá analizar cómo las diferentes variables operativas afectan el proceso de limpieza de la barra.

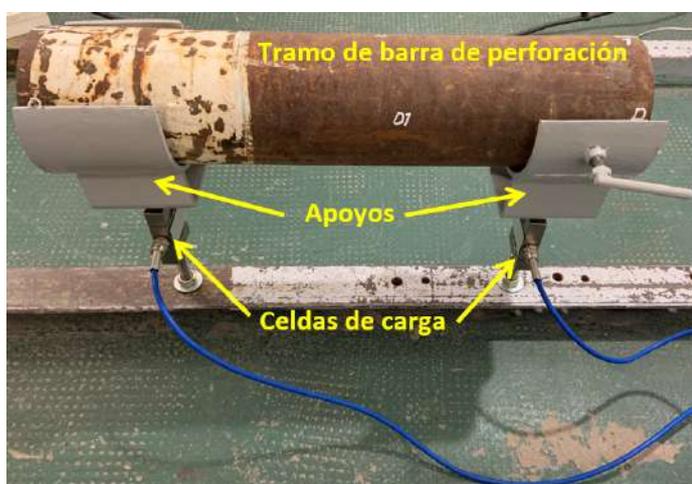


Figura 26. Dispositivo para la medición de la fuerza de cepillado con amoladora manual.

Procedimiento de Ensayo:

Para realizar las pruebas se desarrollaron las siguientes tareas:

- Paso 1: Delimitar zonas a estudiar (cuadrantes iguales de dimensiones 55 x 40 mm) sobre los tramos de barras a limpiar, e identificarlos. En particular, los cuadrantes fueron identificados con una letra (E, F, G,...), seguida de un número (del 1 al 4) asociado a la barra bajo análisis. De esta manera, se identificaron 18 muestras en total.
- Paso 2: Realizar un registro fotográfico de cada uno de los cuadrantes previo al cepillado.
- Paso 3: Montar y ajustar el tramo de barra a ensayar sobre el dispositivo.
- Paso 4: Cepillar uno de los cuadrantes a limpiar, mediante el uso de la amoladora provista con el cepillo de cerdas metálicas, y realizar un registro fotográfico de la superficie luego de amolada.
- Paso 5: Repetir los Pasos 3 y 4 en los distintos cuadrantes, aplicando distintas presiones y tiempos de amolado.
- Paso 6: Cuantificar el grado de limpieza obtenido utilizando un programa de análisis de imágenes.
- Paso 7: Analizar los datos obtenidos con el módulo de adquisición de datos y los resultados del Paso 6.
- Paso 8: Determinar la fuerza y velocidad de amolado más conveniente. VER

Resultados:

En el Anexo I (A) se presentan la totalidad de las imágenes analizadas, como resultado de las pruebas realizadas para cada una de las muestras ensayadas.

A continuación, se presenta en la Figura 27, a modo de ejemplo, el registro y procesamiento de las imágenes obtenidas para la muestra F1 según el siguiente detalle:

- Fotografía de la superficie antes de ser amolada (Figura 27 a).
- Fotografía de la superficie luego de ser amolada (Figura 27 b).
- Imagen obtenida luego del procesamiento con el *software* específico *open-source* *ImageJ* (www.ImageJ.net), utilizado para cuantificar el grado de limpieza alcanzado (Figura 27 c).

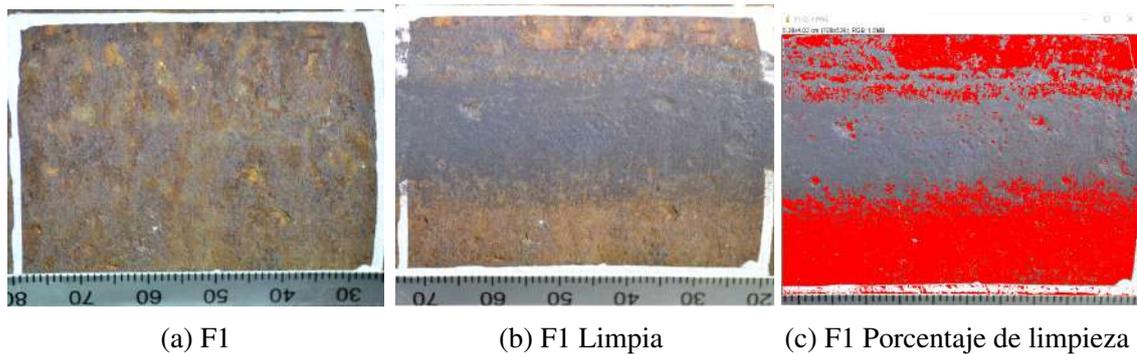


Figura 27. Registro Fotográfico muestra F1.

Para cada uno de los casos analizados, a partir del procesamiento de los datos adquiridos, se generó un gráfico en el que se representa la fuerza total en función del tiempo que haya durado la prueba. Entendiéndose como fuerza total, la suma del registro de cada celda de carga. En la Figura 28 se presenta la curva obtenida para la muestra F1.

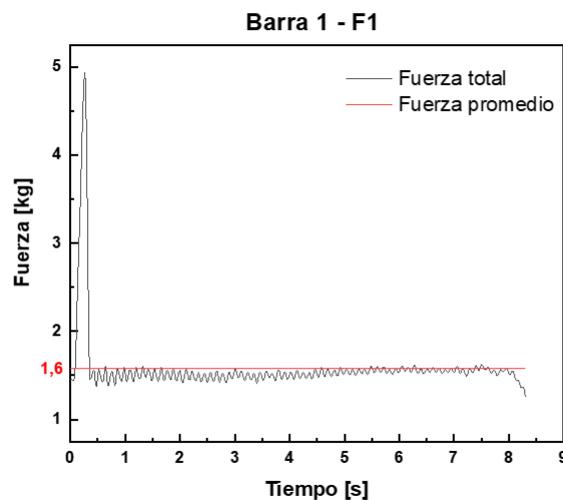


Figura 28. Fuerza total aplicada vs tiempo (Muestra F1).

Para llevar a cabo las pruebas experimentales se procuró realizar un avance lineal a velocidad aproximadamente constante, en la dirección del eje de la barra. Una vez iniciadas las pruebas se buscó, en primera instancia, variar la fuerza de cepillado manteniendo el tiempo de limpieza cercano a los 10 s. Luego, se disminuyó el tiempo a la mitad (cercano a los 5 s), y se realizaron pasadas con distinta fuerza aplicada sobre la amoladora. Finalmente, se procuró realizar pasadas rápidas (tiempos de limpieza cercanos a los 2 o 3 s), y se fue variando la fuerza aplicada. A continuación, la Tabla 11 resume los datos obtenidos en la totalidad de las pruebas realizadas.

Tabla 11. Datos obtenidos en las pruebas experimentales.

Muestra	Fuerza promedio [kg]	Desvío estándar [kg]	Tiempo [s]	Grado de limpieza [%]
E1	0.31	0.027	10.2	52
F1	1.58	0.385	8.30	53
G1	3.30	0.321	8.72	65
E2	4.83	0.648	10.0	81
F2	0.42	0.281	9.18	48
G2	0.45	0.256	4.36	41
H2	0.70	0.041	4.38	53
I2	1.62	0.272	4.70	55
E3	1.52	0.260	3.28	51
F3	1.71	1.055	4.58	59
G3	3.78	0.644	3.98	61
H3	2.93	0.361	6.10	62
I3	5.67	0.530	4.90	68
E4	0.42	0.212	2.46	42
F4	1.10	0.548	1.90	43
G4	3.94	0.750	2.58	64
H4	3.38	0.442	3.14	58
I4	5.45	0.754	2.72	56

A partir de estos datos se crearon dos gráficos distintos. Por un lado, se representó en un gráfico 3D, la relación entre la fuerza de cepillado, el tiempo durante el cual se aplicó dicha fuerza y el porcentaje de limpieza obtenido (ver Figura 29). Por otro lado, se representó, en la Figura 30, el porcentaje de limpieza obtenido en función de la fuerza promedio con su respectivo desvío estándar. Estos últimos resultados se agruparon según el tiempo de aplicación de la fuerza, en intervalos de 2 segundos.

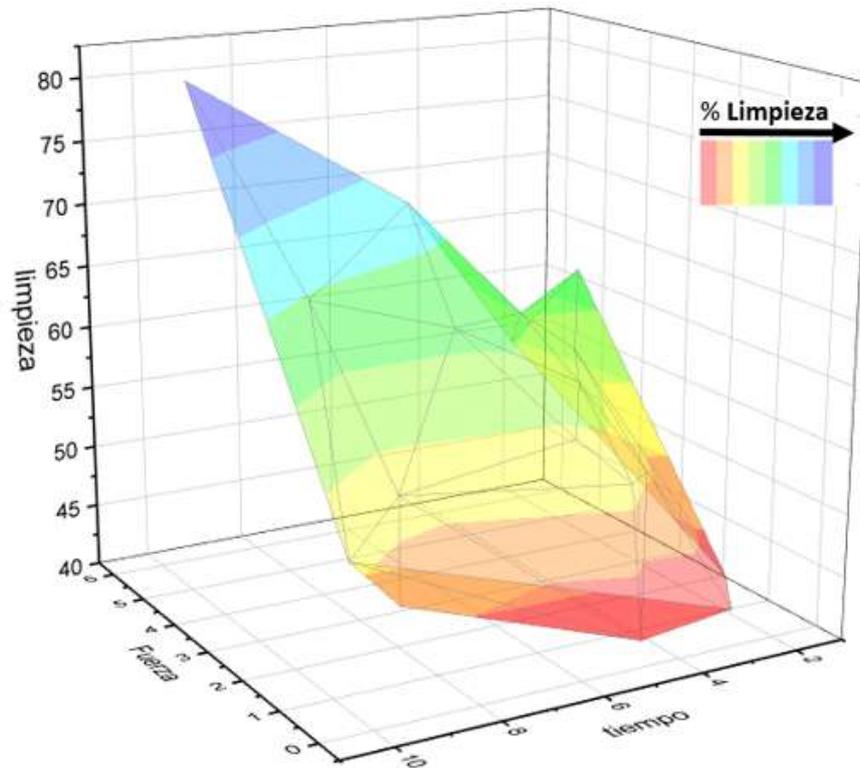


Figura 29. Porcentaje de limpieza obtenido en función de la fuerza de cepillado aplicada [kg] y el tiempo de limpieza [s].

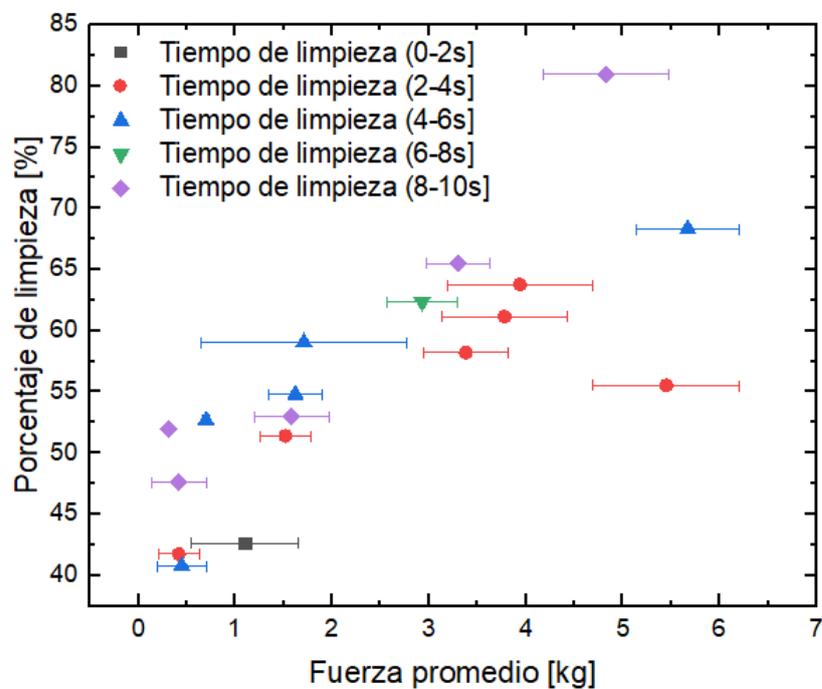


Figura 30. Porcentaje de limpieza obtenido vs fuerza promedio.

Análisis de los Resultados:

En base a los resultados expuestos en las Figuras 29 y 30, se observa lo siguiente:

- Si se mantiene una misma fuerza aplicada y se aumenta el tiempo de limpieza (es decir, se disminuye la velocidad de avance del cepillo), mayor es el porcentaje de limpieza obtenido. Es decir, el tiempo y el porcentaje de limpieza guardan una relación directa, mientras que la velocidad de avance y el porcentaje de limpieza guardan una relación indirecta (a mayor velocidad de avance del cepillo menor porcentaje de limpieza).
- Si se mantiene una misma velocidad de avance del cepillo y se aumenta la fuerza aplicada, mayor es el porcentaje de limpieza obtenido. Es decir, la fuerza y el porcentaje de limpieza guardan una relación directa (a mayor fuerza aplicada mayor porcentaje de limpieza).
- Los porcentajes de limpieza obtenidos fueron superiores al 40 %. El menor porcentaje de limpieza registrado fue del 41 % y se obtuvo al aplicar una fuerza promedio de 0,45 kg en un tiempo de 4,3 s (lo cual está asociado a una velocidad de avance de aproximadamente 0,72 m/min). El mayor porcentaje de limpieza registrado fue del 81 % y se obtuvo al aplicar una fuerza promedio de 4,8 kg en un tiempo de 10 s (lo cual está asociado a una velocidad de avance de aproximadamente 0,33 m/min).
- La mayor fuerza promedio registrada en las pruebas fue de aproximadamente 5,7 kg, mientras que la mayor fuerza total registrada rondó los 9 kg.
- Las presiones mínima y máxima resultaron 0,007 MPa (para la muestra E1) y 0,10 MPa (para la muestra I3). Dichos valores se calcularon a partir de la fuerza promedio y el área de contacto, la cual se asumió rectangular con un ancho igual al ancho del cepillo empleado y el alto se midió a partir de las imágenes obtenidas.

Dado que al momento de definir las especificaciones técnicas no se contaba con información que permitiera establecer cómo influyen los parámetros operativos en el porcentaje de limpieza obtenido, se considera que los resultados de este apartado proporcionarán una base de conocimiento fundamental para ajustar el proceso de limpieza de manera óptima.

5.3. Ingeniería Básica

En esta etapa, se decidió avanzar en primera instancia, con el diseño y cálculo del Sistema Hidráulico. Esto se fundamenta en que el mismo se considera crítico para el funcionamiento de la máquina, dado que es el encargado de accionar:

- El banco de ruedas inclinadas, para generar el avance y giro en simultáneo de la barra.
- El juego de cepillos, haciéndolos rotar sobre su propio eje.
- El banco de ruedas rectas, para el desplazamiento axial de la barra.
- Los dispositivos para el desplazamiento lateral de la barra.
- El dispositivo para poner en contacto la barra y el juego de cepillos, y así lograr la limpieza.

A tal fin, se deben determinar, en primer término, las fuerzas actuantes (estado de cargas), ya que estas definen la resistencia que el accionamiento debe vencer para mover efectivamente la barra (banco de ruedas inclinadas). A continuación, se presenta el análisis realizado a partir de la geometría, la ubicación relativa de los principales componentes y las dimensiones generales definidas para la arquitectura de la máquina.

5.3.1. Determinación del Estado de Cargas

Tal como se mencionó previamente, la Norma [API 5DP \(2015\)](#) define la configuración típica de las barras de perforación, y proporciona información referente a dimensiones generales, masas asociadas y propiedades mecánicas, entre otras.

En la Figura 31, se presenta un detalle de las características geométricas de una barra de perforación. Como se puede observar, posee una geometría compleja con diámetros internos y externos variables. Es por esto que, para realizar el cálculo se optó por modelarla como una barra de diámetro interno y externo constantes, por tramos. Para ello, se utilizaron las dimensiones de referencia que provee la Norma [API 5DP \(2015\)](#) para una barra de 5 in, considerando el caso más crítico (es decir, el de mayor peso).

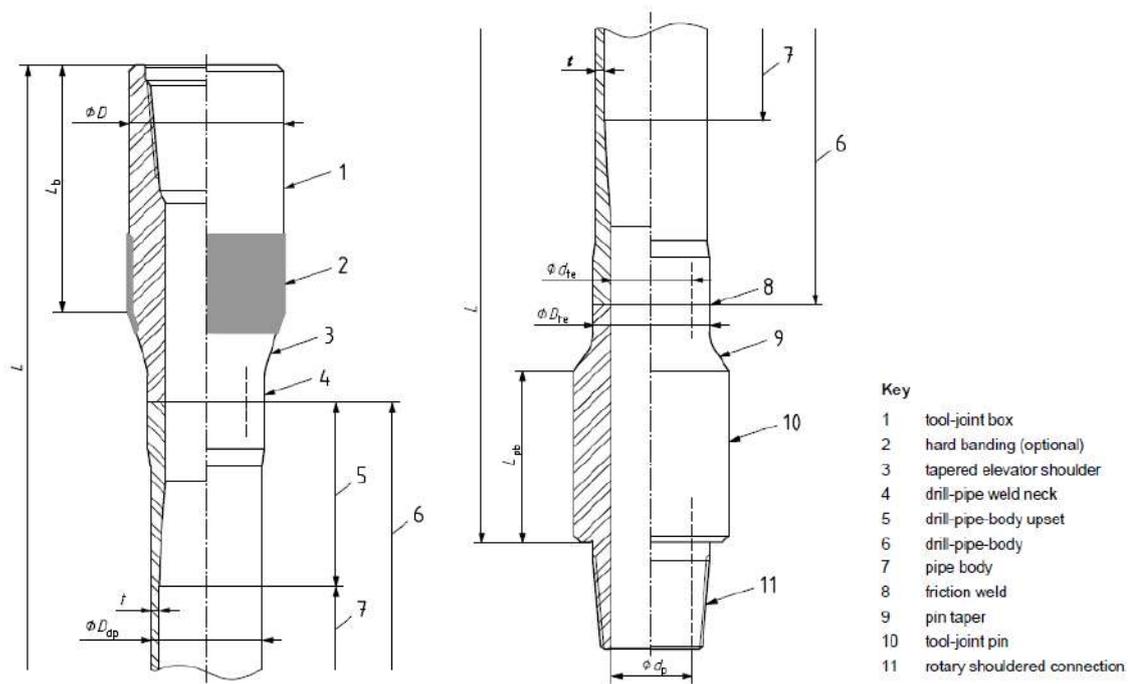


Figura 31. Características geométricas de una barra de perforación (API 5DP, 2015).

A continuación, en la Figura 32 se presenta la geometría del modelo de barra empleado, y en la Tabla 12 se resumen las características de las barras Rango 2 que se utilizaron para el cálculo de las fuerzas.

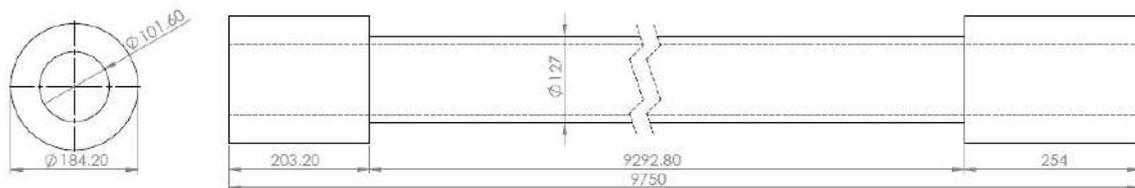


Figura 32. Modelo Barra.

Tabla 12. Características Barras Rango 2.

Descripción	Valor
Longitud	9,75 m
Diámetro externo del <i>tooljoint</i>	184,2 mm
Diámetro externo del cuerpo	127 mm
Diámetro interno	101,6 mm
Masa por unidad de longitud	43,75 kg/m

Se asume que inicialmente la barra se encuentra apoyada sobre seis pares de ruedas, distanciadas entre sí 1,8 m (tomando de referencia la información obtenida en el *benchmarking*). Esto permite que una parte de la barra quede en voladizo (extremo que estaría en contacto con el juego de cepillos). Estos apoyos restringen el desplazamiento de la barra tanto en y como en z , permitiendo la rotación de la barra y el desplazamiento axial en x (siendo la terna xyz los ejes coordenados definidos por la regla de la mano derecha, con el eje x coincidente con el eje de la barra).

Dada la inclinación de las ruedas en planos que se entrecruzan y considerando que la barra apoya en cada par de ruedas, resulta que las componentes de las fuerzas en dirección z se anulan entre sí. De esta manera, el diagrama de cuerpo libre de la barra queda definido como se muestra en la Figura 33.

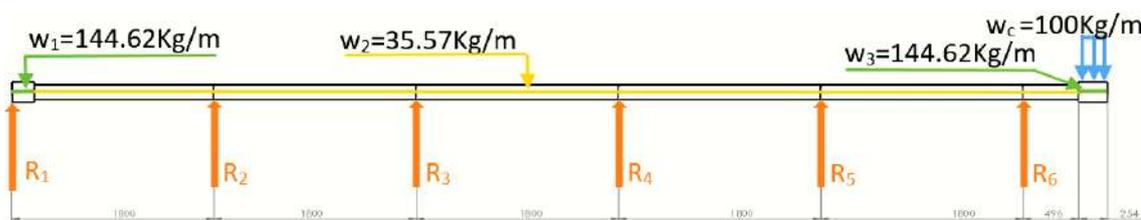


Figura 33. Diagrama de Cuerpo Libre (DCL) de la barra.

Donde:

- Las cargas puntuales R_1, R_2, \dots, R_6 , se corresponden con las reacciones en y de los apoyos.
- Las cargas distribuidas w_1, w_2 y w_3 corresponden al peso de la barra, y se calcularon considerando que los extremos tienen una mayor concentración de masa.
- La carga distribuida w_c se corresponde con la fuerza que genera el juego de cepillos sobre la barra.

Para definir el valor de la carga w_c que permita obtener el nivel de limpieza requerido por la norma, se optó por tomar de referencia las pruebas experimentales realizadas y los estudios afines llevados a cabo por [Kaulbars \(2004\)](#), [Welcome y col. \(2004\)](#), [Scalise y Paone \(2015\)](#) y [Kalra y col. \(2015\)](#).

En los estudios mencionados se midieron las fuerzas manuales involucradas en el uso de herramientas eléctricas, de características similares a las de una amoladora. Para ello,

se diferenciaron la fuerza de agarre (*gripping force*) y la fuerza de empuje (*push force*). En el presente trabajo, resulta de interés la fuerza de empuje, dado que es la que efectivamente se aplica sobre la barra a limpiar. Los valores reportados por [Kalra y col. \(2015\)](#) y [Welcome y col. \(2004\)](#) no superan los 75 N, mientras que [Scalise y Paone \(2015\)](#) y [Kaulbars \(2004\)](#) determinaron valores para la fuerza de empuje de 101 N y 135 N, respectivamente. En función de lo expuesto, se puede observar que los valores de fuerzas medidos en las pruebas experimentales son comparables con los valores reportados en estudios afines.

Por otro lado, en el concepto solución elegido la barra gira y avanza. Debido a ello, es necesario que el módulo de limpieza cubra una longitud suficiente como para asegurar que en una vuelta de la barra se limpie todo el perímetro y no queden zonas sin cepillar. Respecto a esto, en el análisis de *benchmarking* se observó que para cumplir con este requerimiento, las máquinas suelen emplear varios cepillos tipo rueda o bien un cepillo tipo rodillo.

Adicionalmente, en la Figura 30 se observa que a partir de una fuerza de aproximadamente 2 kg, la tendencia de los datos presenta una pendiente menor. En otras palabras, el aumento de carga no genera grandes beneficios en el porcentaje de limpieza. Sumado a ello, para este valor de carga se obtuvieron porcentajes de limpieza aceptables (entre 50 y 60 %). Bajo estas consideraciones, se optó por emplear, en primera instancia, una fuerza de 2 kg por cepillo. Considerando que el cepillo de las pruebas experimentales tiene un ancho de 2 cm, resulta para la carga distribuida w_c un valor de 1 kg/cm.

En la Figura 33, se puede observar que el modelo de viga, adoptado para el sistema, tiene soportes redundantes. Es decir, es una estructura estáticamente indeterminada, por lo que las magnitudes de más de dos fuerzas o momentos de reacción no se pueden obtener usando tan sólo las ecuaciones de equilibrio estático.

Como las cargas sobre las vigas consisten típicamente en colecciones de entidades discretas, como cargas puntuales o segmentos de cargas distribuidas que pueden ser discontinuas a lo largo de la viga, resulta difícil representar las funciones discretas con ecuaciones válidas para un continuo completo de la longitud de la viga. Para tratar con dichas situaciones matemáticas, se emplean las funciones de singularidad. Estas brindan una manera conveniente para establecer y evaluar las ecuaciones de las funciones de carga, cortante,

momento, pendiente y deflexión (Norton, 2011).

Las funciones discontinuas se representan, con frecuencia, mediante un binomio entre corchetes angulados, como se observa en la Ecuación 1. La primera cantidad entre corchetes es la variable de interés, en este caso la distancia x a lo largo de la longitud de la viga. La segunda cantidad a es un parámetro definido por el usuario, que indica dónde la función de singularidad actúa o empieza a actuar.

$$\langle x - a \rangle^n = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ (x - a)^n & \text{si } x \geq a \end{cases} \quad \text{para } n \geq 0 \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (1)$$

En particular, cuando $n = 0$ se obtiene la función escalón (ver Ecuación 2), la cual si se la escala por un valor constante igual a la intensidad de la carga, se puede utilizar para representar cargas uniformemente distribuidas (Philpot, 2017).

$$\langle x - a \rangle^0 = \begin{cases} 0 & \text{si } x < a \\ 1 & \text{si } x \geq a \end{cases} \quad (2)$$

Por otro lado, una carga concentrada P_o sobre la viga, se puede representar mediante la siguiente ecuación (Philpot, 2017):

$$w(x) = P_o \langle x - a \rangle^{-1} = \begin{cases} 0 & \text{si } x \neq a \\ P_o & \text{si } x = a \end{cases} \quad (3)$$

Empleando estos conceptos, se realizó el cálculo analítico de las reacciones al apoyar la barra sobre el banco de ruedas inclinadas. Esta misma situación se simuló mediante un *software* específico y se compararon los resultados, a fin de validar el uso del mismo para otras situaciones de carga (ver Figura 34).

En el Anexo II (B), se presentan los cálculos realizados, a partir de los cuáles se obtuvieron los resultados mostrados en la Tabla 13. Como se observa, los resultados obtenidos usando el modelo analítico son muy similares a los obtenidos mediante el *software*. Considerando esto, se decidió emplear el *software* para simular otras situaciones de carga, y evaluar cuál es la más crítica, para luego diseñar el circuito hidráulico que sea capaz de

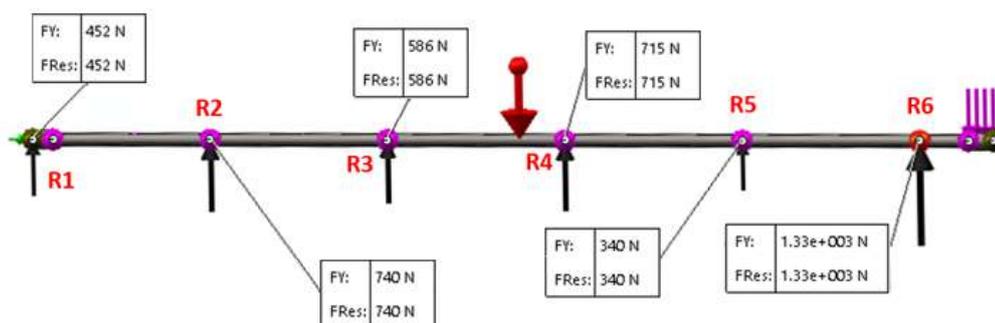


Figura 34. Reacciones de vínculo.

Nota: la flecha de color rojo representa la aceleración de la gravedad.

realizar los movimientos requeridos.

Tabla 13. Resultados obtenidos para las reacciones de vínculo.

Reacción	Cálculo analítico [N]	Cálculo <i>software</i> [N]	Error relativo [%]
R_1	448,23	452	0,83
R_2	736,6	740	0,46
R_3	578,3	586	1,31
R_4	713	715	0,28
R_5	333,8	340	1,82
R_6	1326,6	1330	0,26

Con el objetivo de analizar las distintas situaciones que pueden presentarse durante el funcionamiento de la máquina, se plantearon tres casos específicos respecto de las cargas aplicadas sobre la barra. Dentro del análisis se considera que la barra gira y avanza para ser cepillada en su exterior. Por lo tanto, cada uno de los casos analizados representa estadios de singular importancia en el proceso de limpieza, según se detalla a continuación:

- Caso 1: Al inicio del proceso de limpieza, la barra se encuentra apoyada en los seis soportes y la fuerza del cepillo se aplica en el extremo derecho en voladizo. Este es el caso analizado previamente, cuyo estado de cargas se corresponde con el presentado en las Figuras 33 y 34.
- Caso 2: Inmediatamente después del inicio de la limpieza, la barra se desplaza levemente de su posición inicial, quedando soportada por sólo cinco apoyos, y la fuerza del cepillo continúa siendo aplicada cerca del extremo derecho en voladizo.

- Caso 3: La barra se ha desplazado una distancia suficiente como para apoyar su extremo derecho en un nuevo soporte, lo que hace que ambos extremos de la barra permanezcan apoyados. Es decir, la barra nuevamente se encuentra soportada en seis puntos. La fuerza del cepillo se aplica en algún punto intermedio de su longitud.

Una vez definidos los distintos casos bajo análisis, se simuló cada situación mediante el *software* específico obteniendo los siguientes resultados.

Caso 1

En las Figuras 35 y 36 se presentan los diagramas de solicitaciones, particularmente los diagramas de corte y momento flector, respectivamente, en correspondencia con el estado de cargas de la Figura 34.

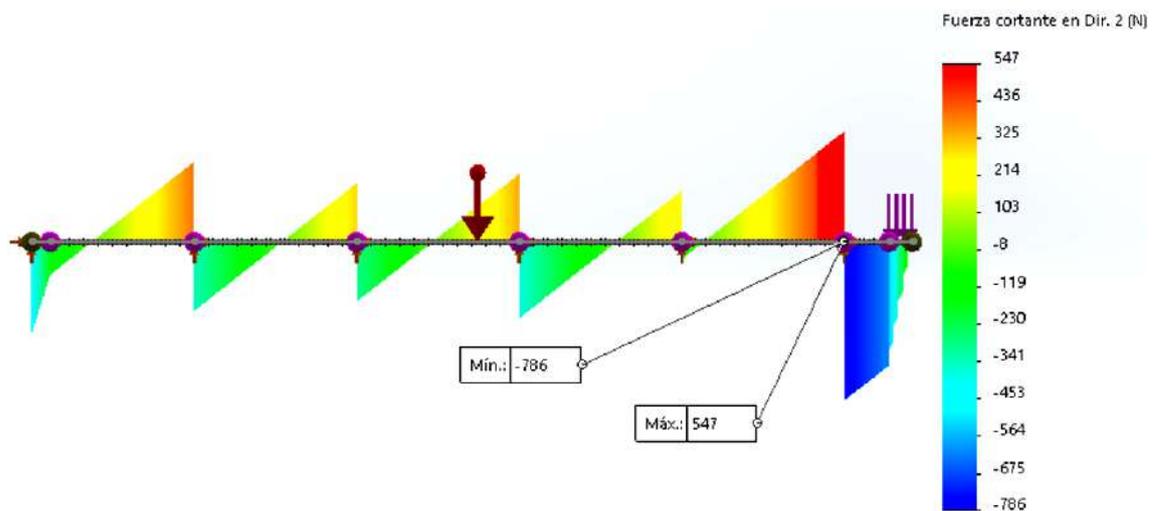


Figura 35. Diagrama de Corte (Caso 1).

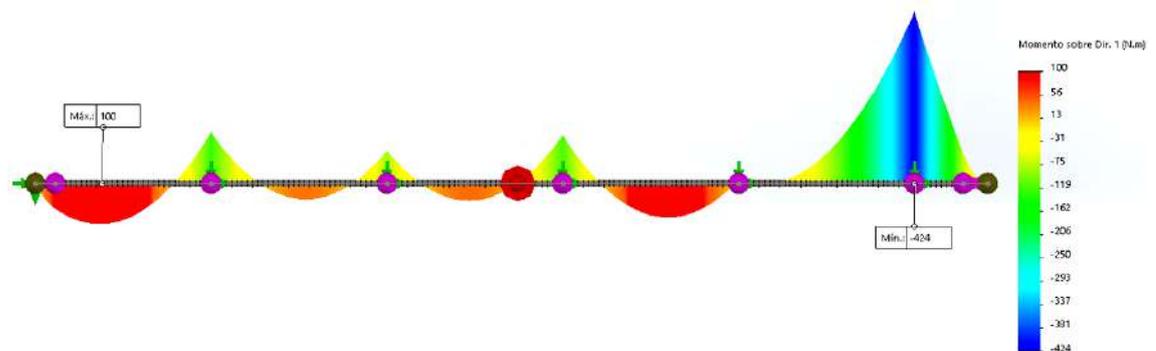


Figura 36. Diagrama de Momento (Caso 1).

Caso 2

La Figura 37 muestra el estado de cargas correspondiente, en el cual se observa que la barra sólo apoya en cinco (5) puntos, siendo $R_1 = 0$. A continuación, las Figuras 38 y 39 muestran el diagrama de corte y el diagrama de momento flector, respectivamente.

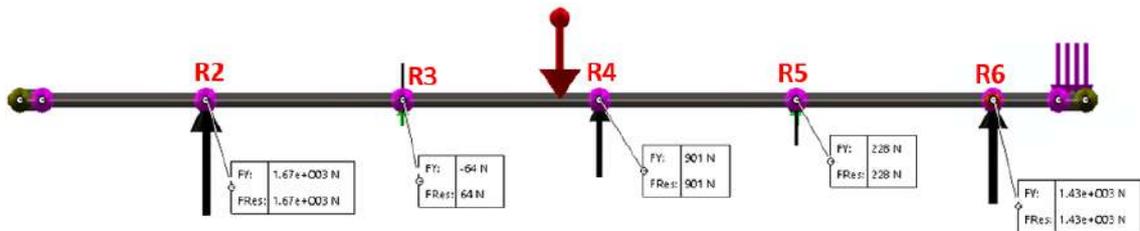


Figura 37. Diagrama de Cuerpo Libre (Caso 2).

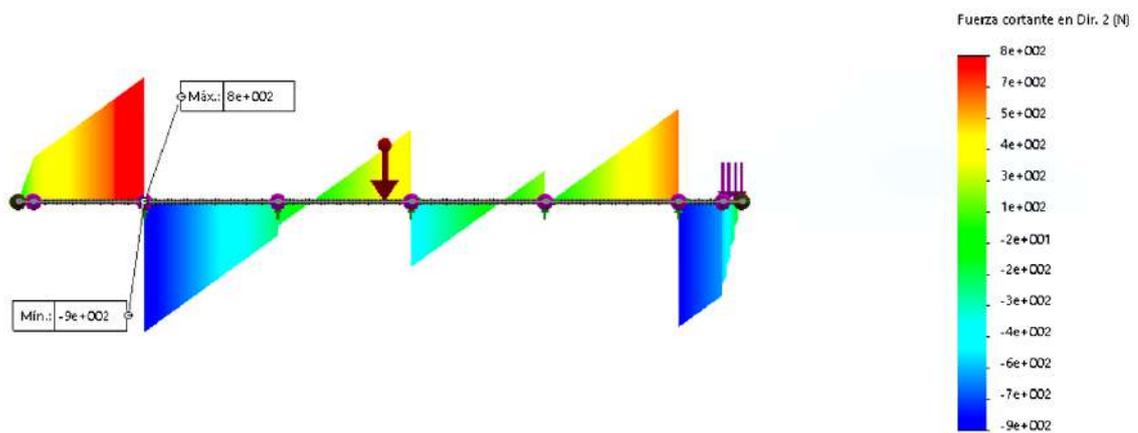


Figura 38. Diagrama de Corte (Caso 2).

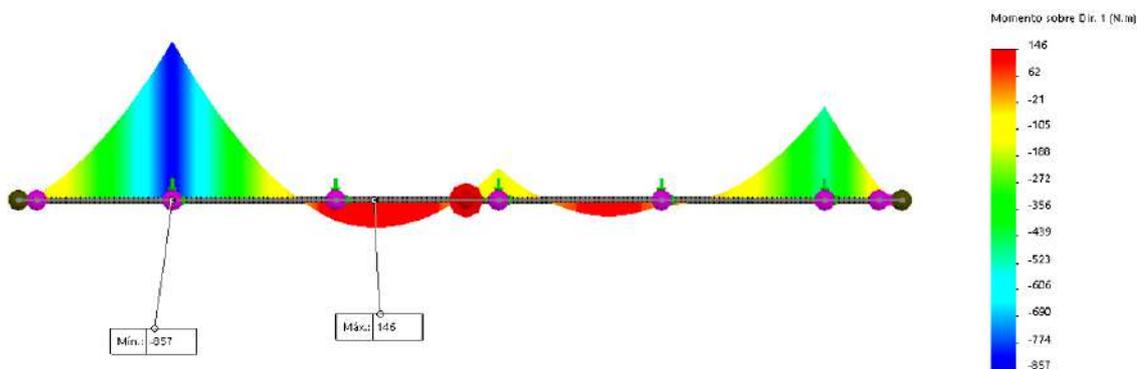


Figura 39. Diagrama de Momento (Caso 2).

Caso 3

En la Figura 40 se muestra la situación en la que la barra avanzó de forma tal que la fuerza del cepillo está en una posición intermedia entre dos apoyos. A continuación, la Figura 41 muestra el diagrama de corte y la Figura 42 el diagrama de momento resultantes de este estado de cargas.

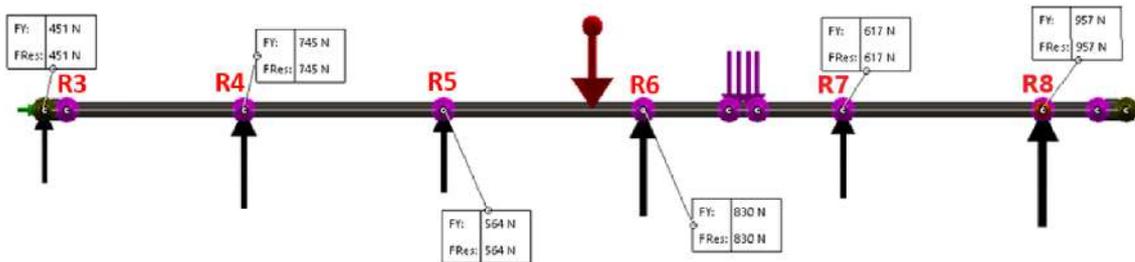


Figura 40. Diagrama de Cuerpo Libre (Caso 3).

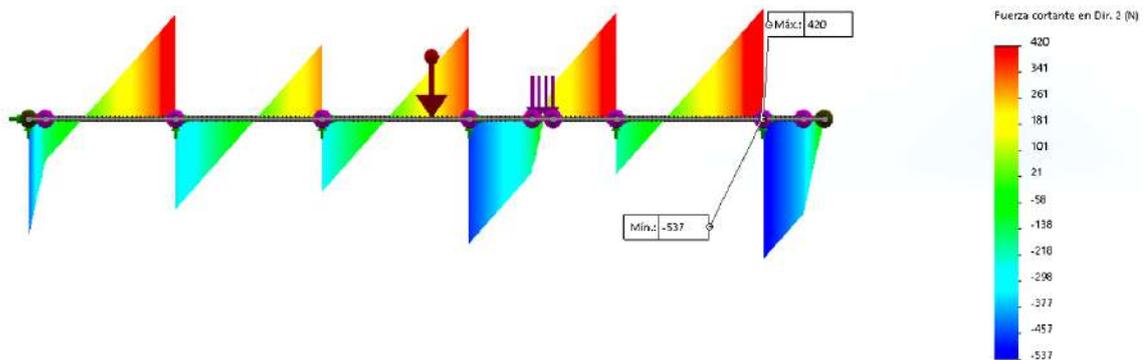


Figura 41. Diagrama de Corte (Caso 3).

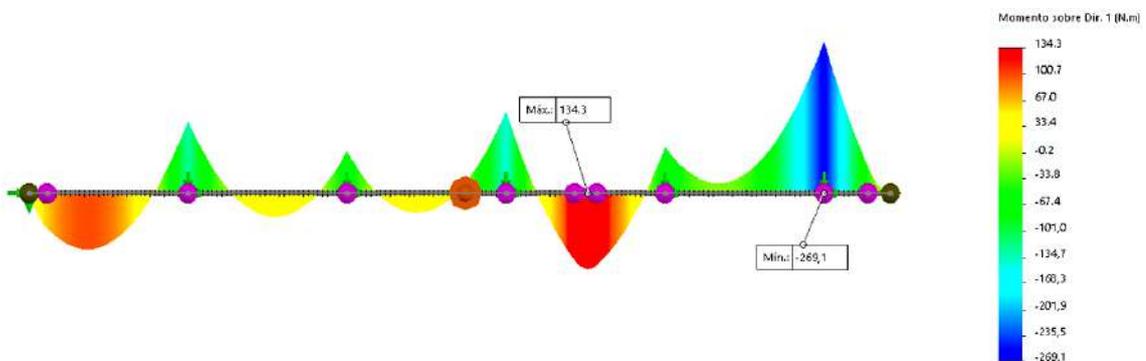


Figura 42. Diagrama de Momento (Caso 3).

En la Tabla 14 se resumen y comparan los valores obtenidos para cada uno de los casos analizados. Se observa que el caso que implica mayores reacciones, tal cómo era de esperarse, es el Caso 2. Esto se debe a que la barra se encuentra apoyada en cinco soportes en lugar de seis. Por lo tanto, se adoptará este caso como el más desfavorable, en el cual las reacciones valen 1670 N y 1430 N en los soportes 2 y 6 respectivamente.

Tabla 14. Comparación de las cargas para los casos 1, 2 y 3.

Reacción	Caso 1 [N]	Caso 2 [N]	Caso 3 [N]
R_1	452	0	0
R_2	740	1670	0
R_3	586	-64	451
R_4	715	901	745
R_5	340	228	564
R_6	1330	1430	830
R_7	0	0	617
R_8	0	0	957

5.3.2. Diseño del Circuito Hidráulico

El diseño de un circuito conlleva dos tareas principales: por un lado, el cálculo y la definición concreta del componente en función de las necesidades (presión, caudal, etc.), y por otro el dibujo o croquis del circuito (Felip Roca Ravell, 1998).

Es importante considerar, durante el cálculo, la disponibilidad en el mercado de componentes estandarizados. En la mayoría de los casos, se tendrá que modificar dentro de límites aceptables los valores variables del sistema para adaptarlos a los componentes que existen en el mercado. Es por esto que, una vez dibujado el sistema y definidos sus componentes, es necesario rehacer los cálculos para adaptar al sistema los componentes estandarizados que mejor se adapten a las necesidades del mismo.

Para el diseño del circuito es imprescindible el conocimiento exacto de las necesidades y trabajos a realizar por los elementos accionadores (velocidades, fuerzas, tiempos, ciclos, etc.), así como las limitaciones (espacios, potencia disponible, tipo de energía, etc.). Con los datos de diseño y con la ayuda de los símbolos, se elabora un croquis en el que se dibujan los elementos accionadores y los impulsores, a continuación se elabora una secuencia de los movimientos y trabajos a realizar.

Estos movimientos y trabajos o fases del ciclo ayudarán a definir los componentes de regulación y control que se han de intercalar entre el accionador final y el elemento impulsor. Finalmente, se añaden al croquis los accesorios del sistema.

Una vez realizado el croquis del circuito, se enumeran los componentes, y se los identifica claramente con sus características o especificaciones técnicas.

En el Anexo III (C) se presenta el cálculo del Circuito Hidráulico. En este caso en particular, el diseño del circuito comenzó por el banco de ruedas inclinadas (a partir del análisis detallado en la sección anterior). Esta subfunción se resolvió mediante una transmisión hidráulica que adapta el par y la velocidad de una bomba hidráulica a los requerimientos de par y velocidad de la serie de motores hidráulicos que controlan la carga (barra de perforación a limpiar).

Se calculó el caudal y la presión de trabajo requeridos por cada elemento, y se seleccionaron bombas a paletas ya que eran las que mejor se adaptaban al circuito propuesto. Las bombas a paletas admiten y descargan el fluido de acuerdo con los cambios del espacio comprendido entre las paletas, contenidas por un rotor que gira, variando el volumen cubicado al apoyar, las mismas, contra un anillo de levas (Yuken, 2015). Poseen las siguientes ventajas: minimización de las pulsaciones de la carga, son compactas y livianas para un alto caudal de salida, menor pérdida de eficiencia por desgaste de paletas, confiabilidad y fácil mantenimiento.

Los motores del banco de ruedas son los encargados de convertir la energía hidráulica en fuerza mecánica de rotación. A partir del *benchmarking* se determinó que los mismos debían girar a 100 *rpm* y, dado que el par de salida depende de la diferencia entre las presiones de entrada y salida del motor, se consideró el caso más desfavorable de simulación, resultando ser el motor a engranajes interiores el adecuado para esta situación. Estos motores son compactos y relativamente baratos, funcionan con alto par torsor a baja velocidad.

Los cilindros hidráulicos son actuadores lineales que transforman la energía hidráulica en una fuerza lineal (Felip Roca Ravell, 1998). El diseño seleccionado incluye seis cilindros para el desplazamiento lateral de las barras y uno para ajustar la presión del cepillo con la barra. Basándose en la presión de empuje, el tiempo de avance y retroceso requeridos por cada cilindro, se determinó que un diámetro de 1 pulgada era necesario para

satisfacer los requerimientos del circuito.

También es necesario adicionar filtros para eliminar los contaminantes del fluido de trabajo, ya que los fluidos hidráulicos contaminados pueden dañar los sistemas hidráulicos y reducir su rendimiento óptimo (Yuken, 2015).

Además, se agregaron al sistema válvulas de seguridad o alivio de tipo directo, que son pequeñas y de estructura sencilla para su capacidad, con el fin de proteger todos los componentes del sistema hidráulico de presiones excesivas y mantener constante la presión del sistema.

Para controlar los distintos elementos del circuito, se seleccionaron válvulas direccionales en función del caudal máximo que debe circular a través de ellas.

El circuito se modificó de forma iterativa hasta lograr el funcionamiento correcto con la ayuda del programa *FluidSim-H* (www.festo.com).

El circuito final consta de dos bombas hidráulicas alimentados por dos motores eléctricos. La bomba B1 alimenta el circuito de desplazamiento lateral de la barra (cilindros C1, C2, C3 y C4), el motor de los cepillos (MC), el cilindro que ejerce la presión del juego de cepillos sobre la barra (C5), y el circuito de desplazamiento lateral (C6 y C7). La bomba B2 alimenta los motores del banco de ruedas inclinadas (M1, M2, M3, M4, M5 y M6) con el cual se consigue el avance y giro de la barra en simultáneo, y el banco de ruedas rectas (motores M7, M8, M9, M10, M11 y M12) con el que se consigue el avance de la barra hacia la inspección. En la Figura 43 se presenta el esquema del circuito desarrollado, cuyos componentes se describen en la Tabla 15.

Tabla 15. Descripción de los componentes del Circuito Hidráulico.

B	Bomba de caudal variable.	M	Motor hidráulico para ruedas.
VP	Válvula limitadora de presión.	MC	Motor hidráulico para cepillo.
VD	Válvula direccional.	M	Manómetro.
VQ	Válvula reguladora de caudal.	VE	Válvula equilibradora de presión.
C	Cilindro hidráulico.		

Acorde a lo desarrollado en el Anexo III (C), finalmente se definieron los componentes requeridos para el circuito hidráulico. Los mismos fueron seleccionados de los catálogos provistos por el fabricante Parker (www.parker.com).

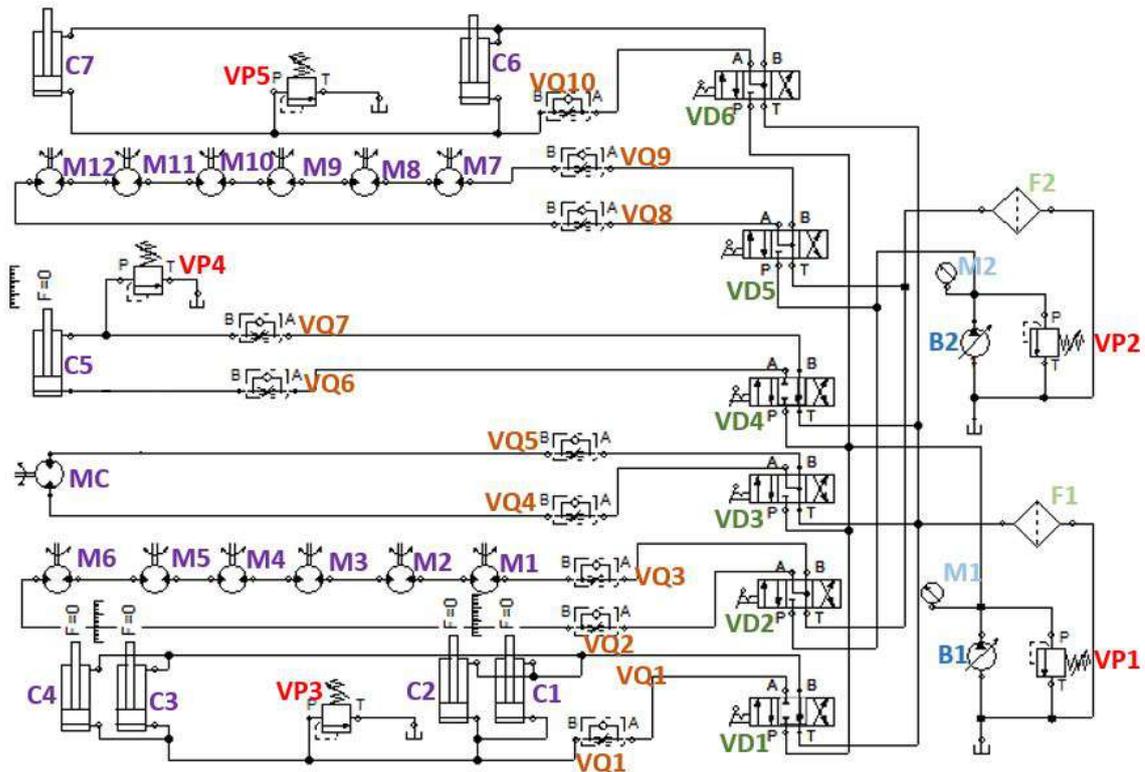


Figura 43. Esquema del Circuito Hidráulico.

5.4. Redefinición del Alcance del Proyecto

Culminada la etapa de Ingeniería Básica del Circuito Hidráulico, se llevaron a cabo reuniones con el Comitente para revisar el desarrollo alcanzado y realizar estimaciones presupuestarias asociadas a la adquisición de los componentes del sistema hidráulico.

En base al circuito desarrollado, se solicitaron cotizaciones a diversos proveedores locales. En esta instancia, el Comitente decidió no avanzar con el desarrollo del proyecto debido a un cambio en las prioridades de la organización. Como resultado, se decidió detener el proyecto en esta fase.

Esta decisión implicó una revisión del alcance del proyecto, dado que no se pudo completar la etapa de Ingeniería Básica de la máquina completa. Es importante destacar la necesidad de realizar la estimación de los costos totales de la máquina, una vez finalizada la Ingeniería Básica, para poder analizar la factibilidad técnica y económica del proyecto, y en función de ello poder decidir si avanzar o no a la etapa de Ingeniería de Detalle.

En este caso, el cierre del proyecto ofreció la oportunidad de realizar una evaluación final para identificar lecciones aprendidas y áreas de mejora. Esto puede resultar en una

toma de decisiones con mayor información para futuros proyectos.

5.5. Evaluación Final

El presente trabajo fue completado de forma parcial según los objetivos planteados al inicio del proyecto. Como resultado, se obtuvo el diseño a nivel de Ingeniería Conceptual de una máquina para la limpieza exterior e inspección de barras de perforación. La documentación generada incluye: las especificaciones técnicas, la arquitectura de la máquina y el diseño del sistema hidráulico (a nivel de Ingeniería Básica).

La aplicación de la metodología propuesta permitió incorporar diversas herramientas a lo largo de todo el proceso de diseño. En base a esto, se tomaron decisiones trascendentales para compatibilizar e integrar las diferentes configuraciones de la máquina que aseguren prestaciones adecuadas del sistema, principalmente en lo referente a: fabricación de piezas, selección de componentes estándar y capacidad instalada en la Empresa.

En este sentido, se puede mencionar que las características de la máquina son similares a las que ofrecen las alternativas de la competencia, con la ventaja comparativa asociada a la contribución del desarrollo de la industria metalmecánica regional.

Es importante destacar, que a partir de las pruebas experimentales desarrolladas se pudieron establecer relaciones cuantitativas entre los parámetros operativos de la máquina y el nivel de limpieza obtenido. Esta información no pudo ser obtenida de forma directa a partir la información analizada en el *benchmarking*.

Dado el grado de avance alcanzado, y realizadas las primeras estimaciones económicas del proyecto, el Comitente decidió no avanzar con las etapas finales del mismo. En el caso de que la Empresa decida continuar con el proyecto, se deberían desarrollar tareas afines para completar la Ingeniería Básica, según los siguientes lineamientos:

- Dimensionamiento de la estructura soporte/bastidor de la máquina.
 - Diseño de los soportes para los cilindros que se vinculan a la estructura soporte/bastidor.
 - Para completar el circuito hidráulico, aún resta definir: el *layout* definitivo, sistemas de montaje y anclaje, y tipos de conectores de los componentes con las tuberías
-

dimensionadas previamente. Para ello se deberá definir el proveedor del sistema a los efectos de realizar eventuales ajustes.

Las tareas mencionadas deberán ser compatibilizadas con la aplicación de las técnicas de Diseño para la Fabricación y Ensamble (*DfMA*, por sus siglas en inglés), como paso previo a la etapa de Ingeniería de Detalle del producto.

6. CONCLUSIONES

Una vez concluido el proyecto, y en función de los objetivos planteados al comenzar el mismo, se puede decir que gran parte de los objetivos fueron alcanzados. Todo el análisis realizado en la etapa de Diseño Conceptual, incluidas las pruebas experimentales, conforman una base de información muy importante para el desarrollo del proyecto. En particular, se obtuvieron las bases de la Ingeniería Básica de la máquina para limpieza exterior e inspección de barras de perforación, prestando especial atención al diseño de un sistema hidráulico que permita asegurar la función.

La obtención experimental de fuerzas de amolado manual concuerdan satisfactoriamente con valores reportados en bibliografía, fundamentando la selección de la fuerza ejercida sobre el tren de cepillos en la máquina. Este dato no se pudo obtener de los fabricantes de máquinas similares, por lo que resulta de gran valor agregado para el equipo.

En el plano personal, el desarrollo del proyecto me permitió integrar conocimientos adquiridos durante mi formación académica, para aplicarlos en un caso real. Algunas de las tareas ejecutadas fueron: aplicación de metodología proyectual, diseño de elementos de máquina, elaboración de especificaciones técnicas, análisis de proveedores, evaluaciones económicas, utilización de *software* para simulación y verificación de componentes hidráulicos y miembros estructurales. Además, me permitió interactuar con equipos de trabajo con experiencia significativa en la industria hidrocarburífera.

7. BIBLIOGRAFÍA

- API 5DP. (2015). *API 5DP Specification for Drill Pipe*. American Petroleum Institute.
- API RP 7G-2. (2015). *API 7G-2 Recommended Practice for Inspection and Clasification of Used Drill Stem Elements*. American Petroleum Institute.
- Bolton, W. (2001). *Ingeniería de Control*. Alfaomega.
- Collins, R. (1995). *Nondestructive Testing of Materials*. IOS Press.
- Creus Sole, A. (2007). *Neumática e Hidráulica*. Marcombo - Ediciones Técnicas.
- DS-1. (2004). *DS-1 Standard Drill Stem Inspection*.
- Felip Roca Ravell. (1998). *Oleohidráulica básica y circuitos*. Edicions UPC.
- Gatlin, C. (1965). *Petroleum Engineering: Drilling and Well Completions*. Prentice-Hall.
- IEC 60529. (2018). *Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)*. International Electrotechnical Commision.
- Kalpakjian, S. & Schmid, S. R. (2014). *Manufacturing Engineering and Technology*. Pearson Education, seventh edition.
- Kalra, M., Rakheja, S., Marcotte, P., Dewangan, K. & Adewusi, S. (2015). Measurement of coupling forces at the power tool handle-hand interface. *International Journal of Industrial Ergonomics*.
- Kaulbars, U. (2004). Measurement of hand forces on vibrating tools: Influence of handle geometry upon calculation of the coupling forces. *BG Istitute for Occupational Safety and Health*.
- Norton, R. (2011). *Diseño de máquinas - Un enfoque integrado*. Pearson Educación, Cuarta edición.
- Pahl, G. and Beitz, W. (2007). *Engineering Design - A Systematic Approach*. Springer.
- Philpot, T. (2017). *Mechanics of Materials - An Integrated Learning System*. Wiley.
- Scalise, L. & Paone, N. (2015). Pressure sensor matrix for indirect measurement of grip and push forces exerted on a handle. *Elsevier*.
- Ullman, D. G. (2010). *The Mechanical Design Process*. Mc Graw-Hill.
- Ulrich, K. & Eppinger, S. (2013). *Diseño y desarrollo de productos*. Mc Graw Hill.
-

Welcome, D., Rakheja, S., Dong, R., Wu, J. & Schopper, A. (2004). An investigation on the relationship between grip, push and contact forces applied to a tool handle.

International Journal of Industrial Ergonomics.

Yuken. (2015). *Hidráulica Básica y Componentes.* YUKEN.

A. ANEXO I: Resultados de las Pruebas Experimentales

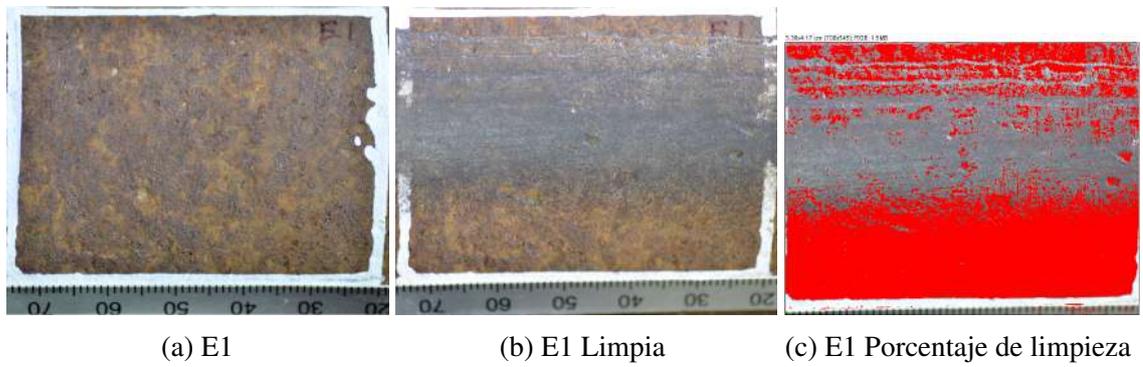


Figura 44. Barra 1 - E1.

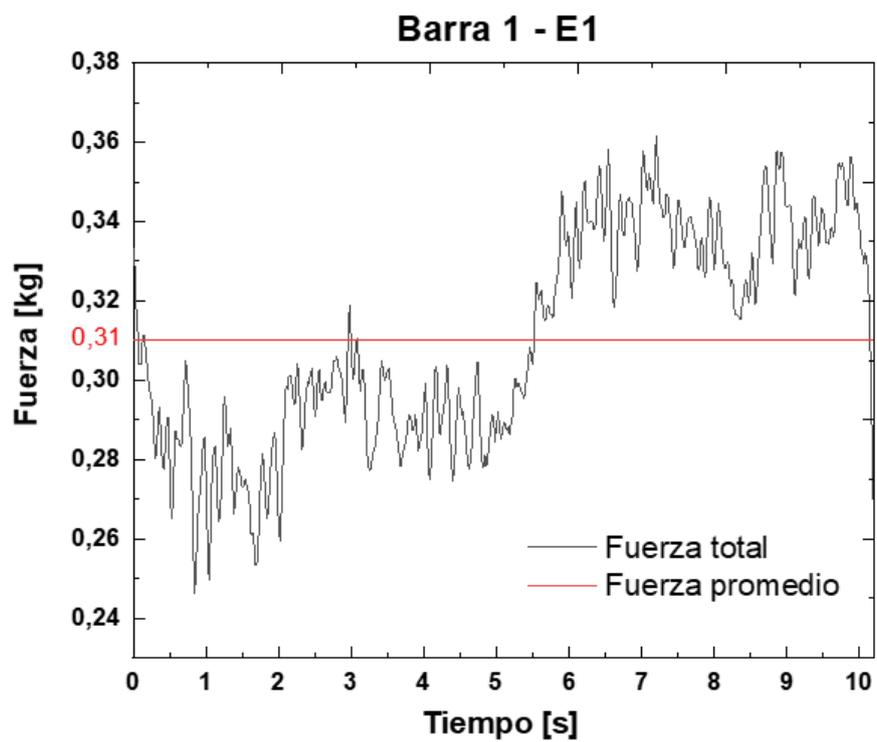


Figura 45. Barra 1 - E1.

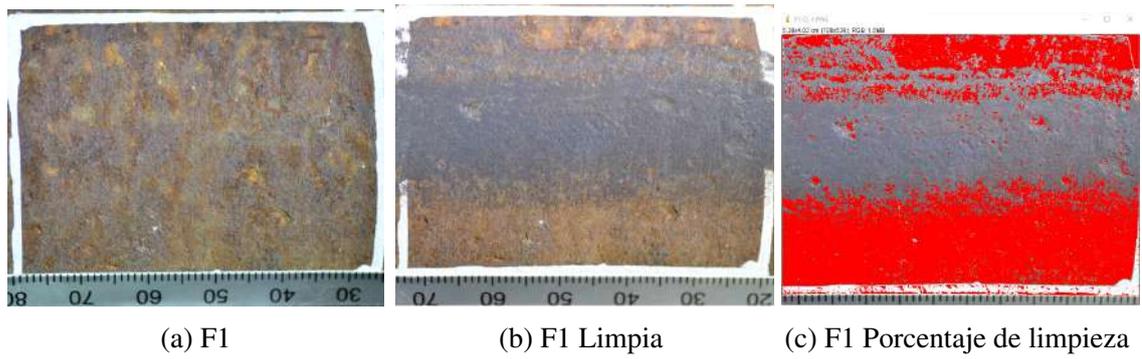


Figura 46. Barra 1 - F1.

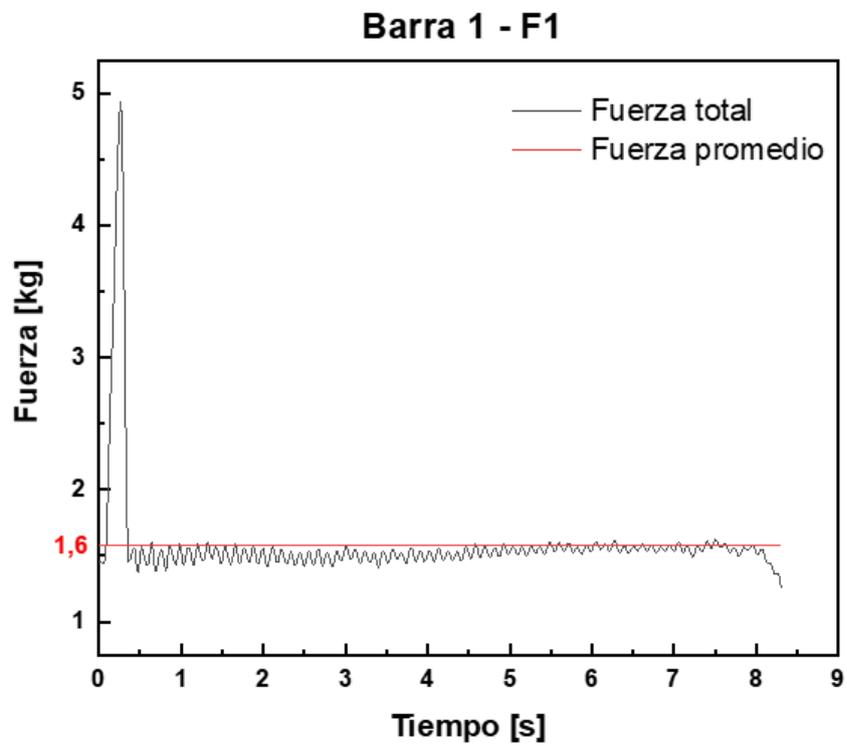


Figura 47. Barra 1 - F1.

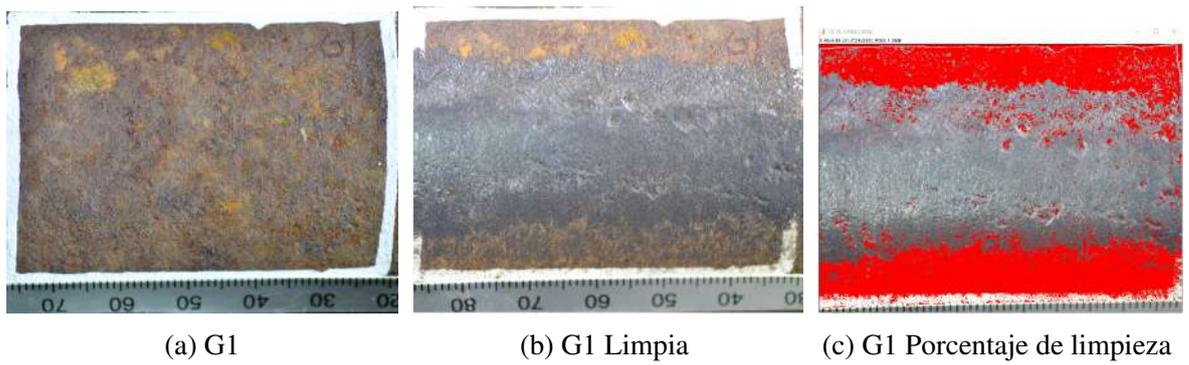


Figura 48. Barra 1 - G1.

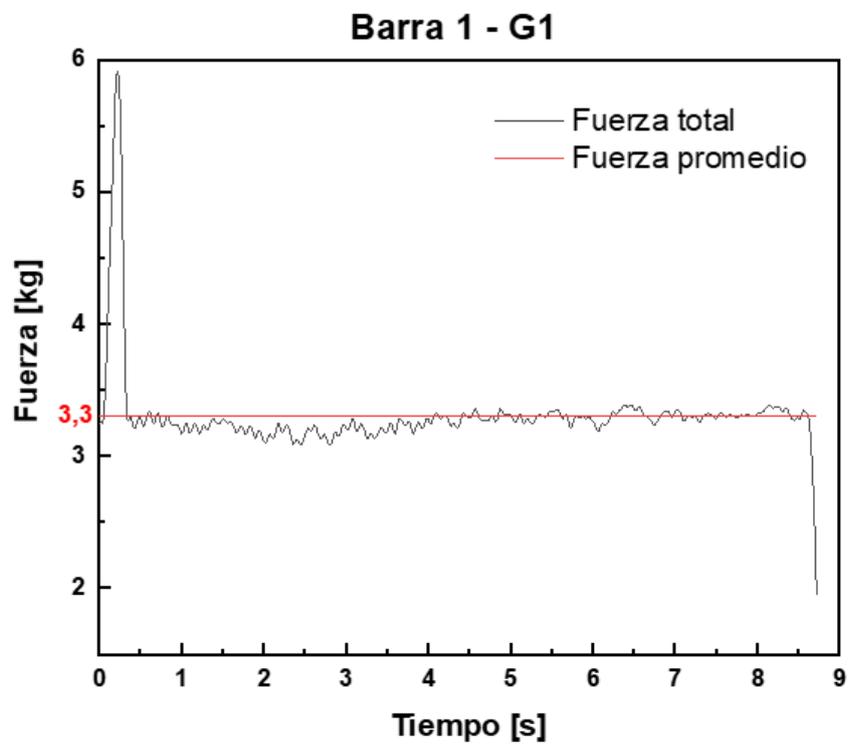


Figura 49. Barra 1 - G1.

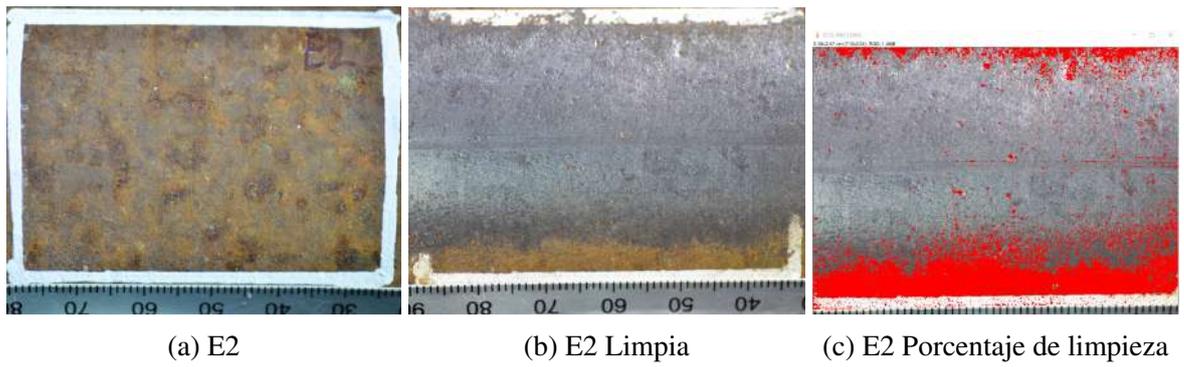


Figura 50. Barra 2 - E2.

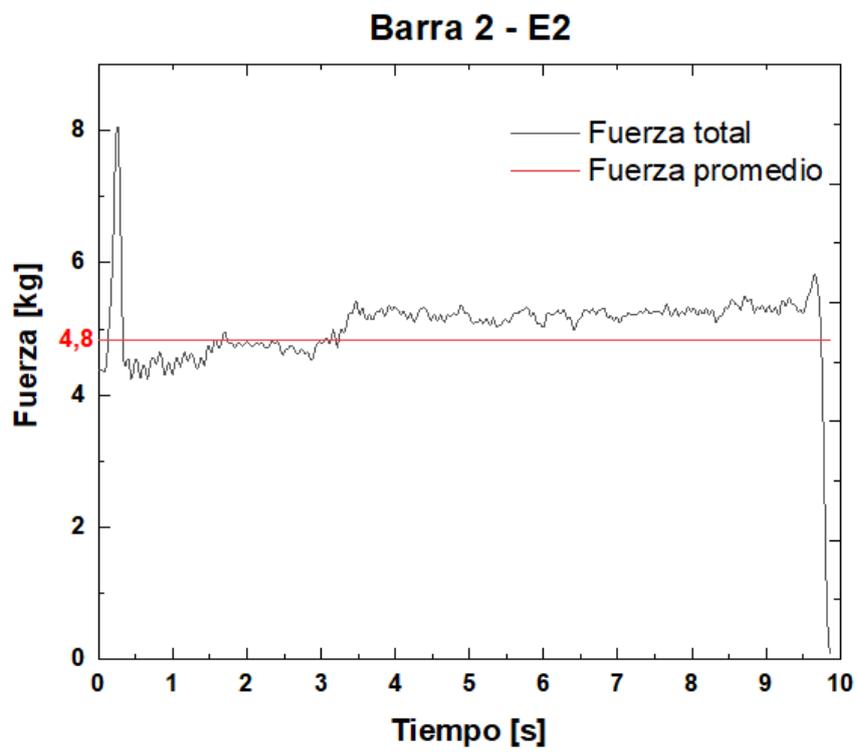


Figura 51. Barra 2 - E2.

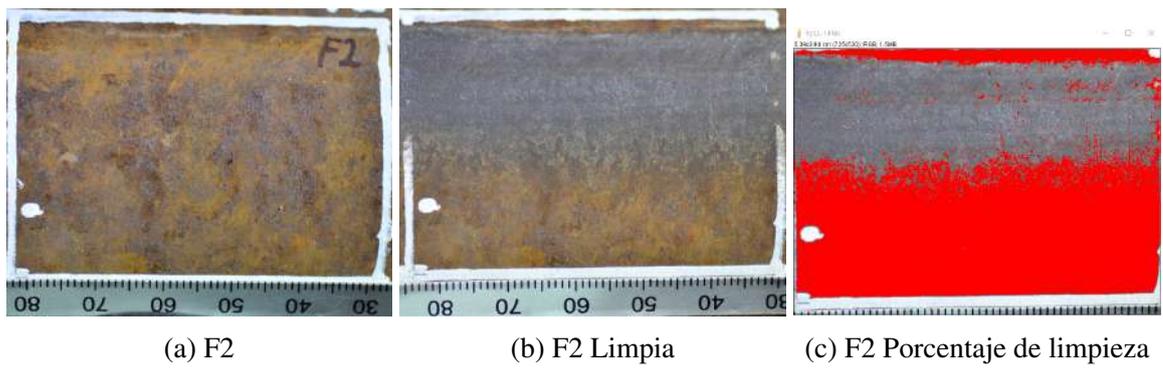


Figura 52. Barra 2 - F2.

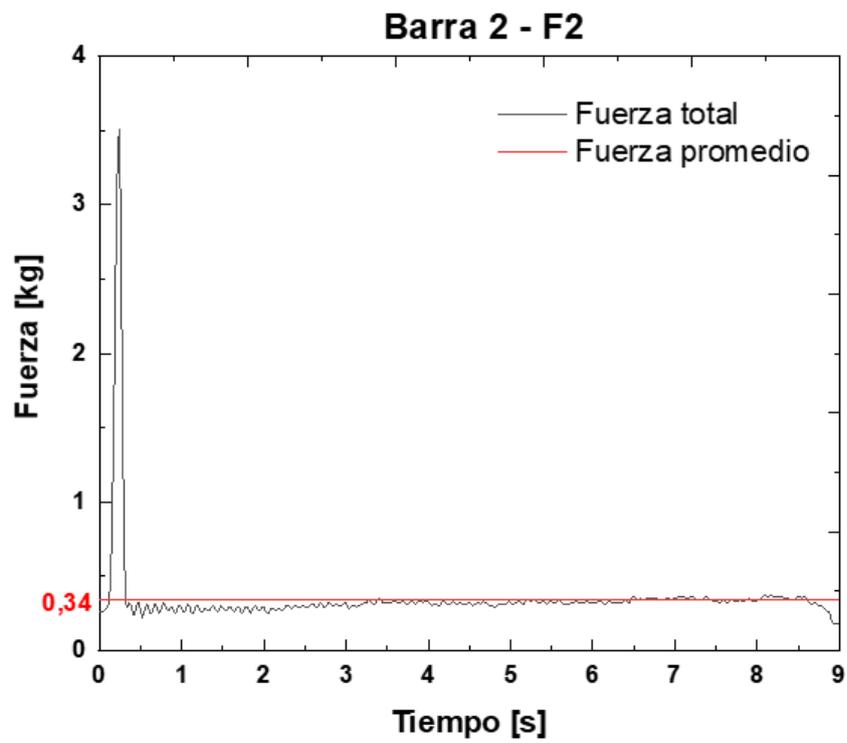


Figura 53. Barra 2 - F2.

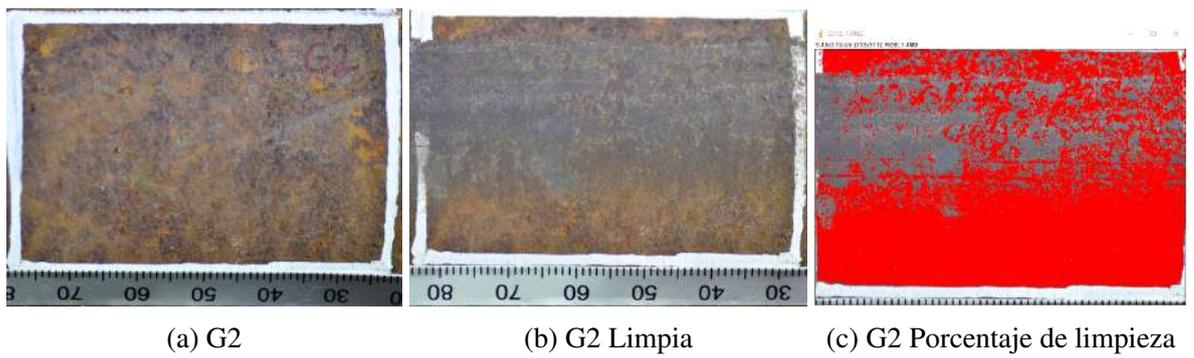


Figura 54. Barra 2 - G2.

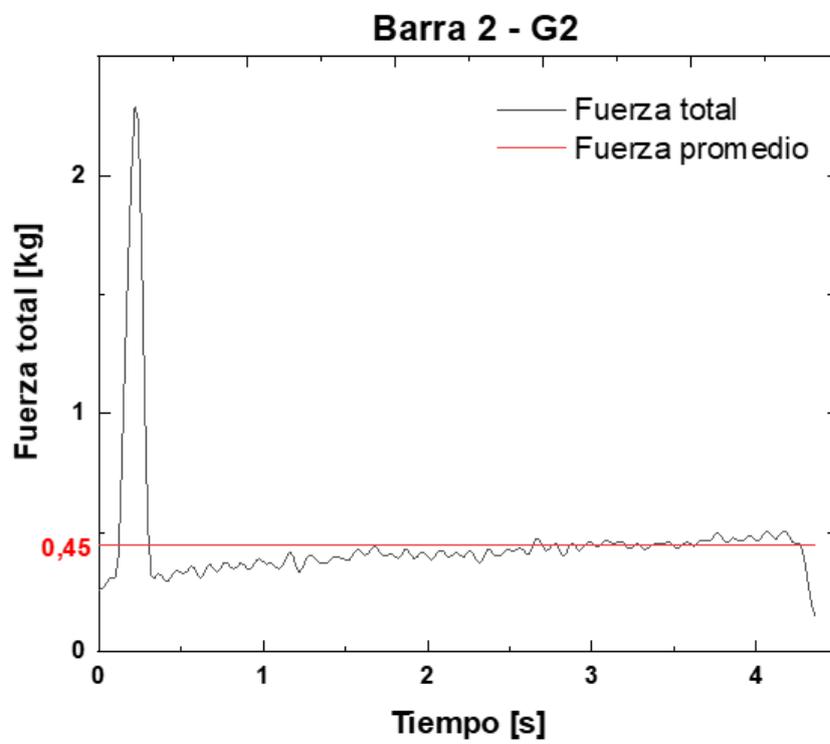


Figura 55. Barra 2 - G2.

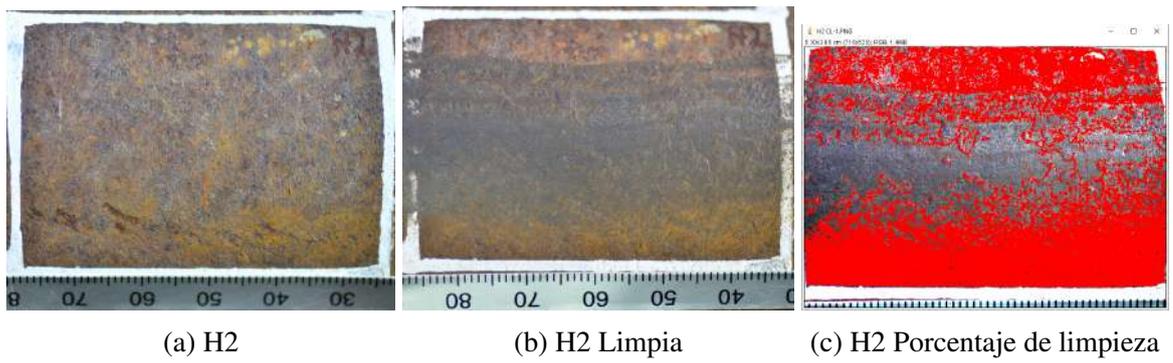


Figura 56. Barra 2 - H2.

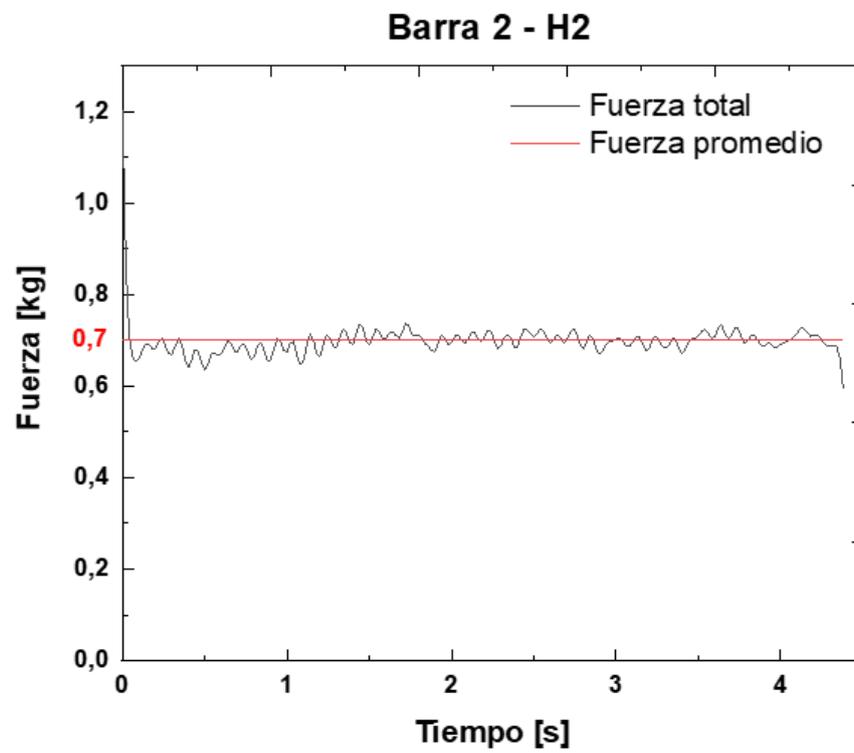


Figura 57. Barra 2 - H2.

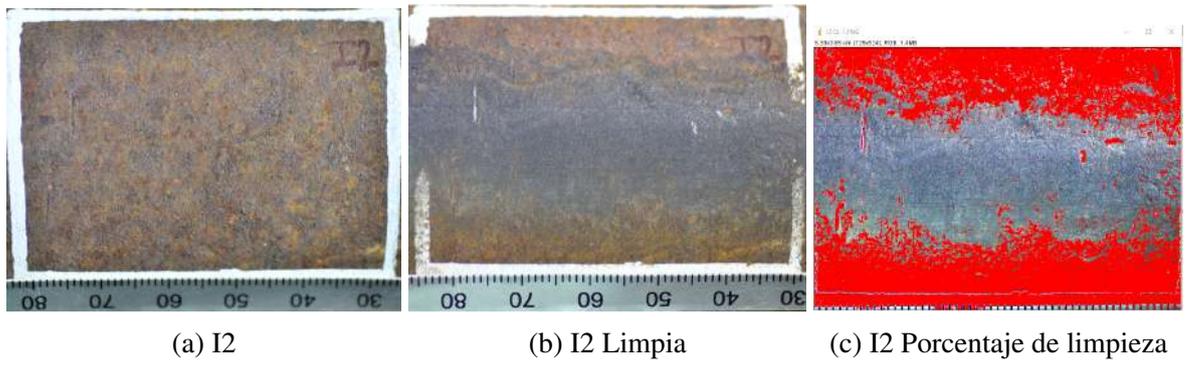


Figura 58. Barra 2 - I2.

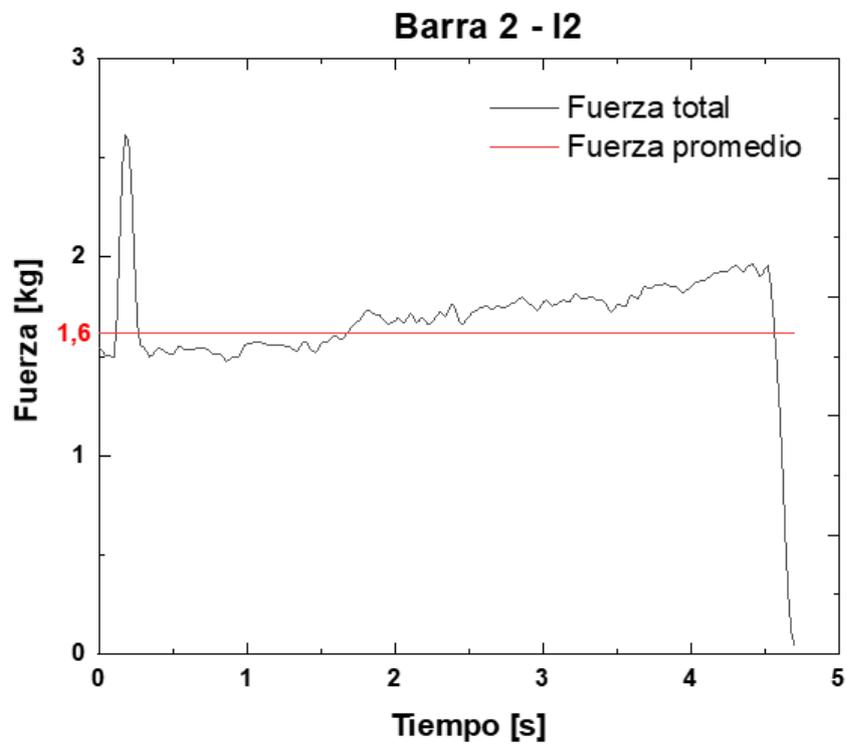


Figura 59. Barra 2 - I2.

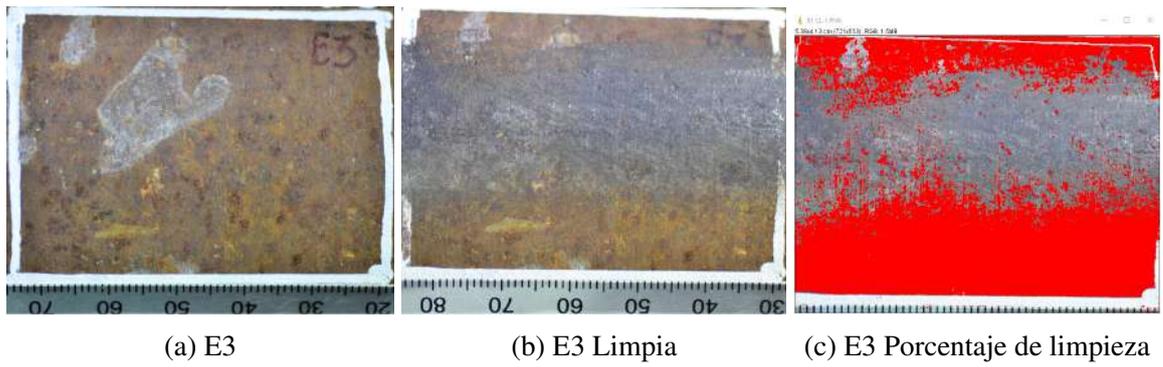


Figura 60. Barra 3 - E3.

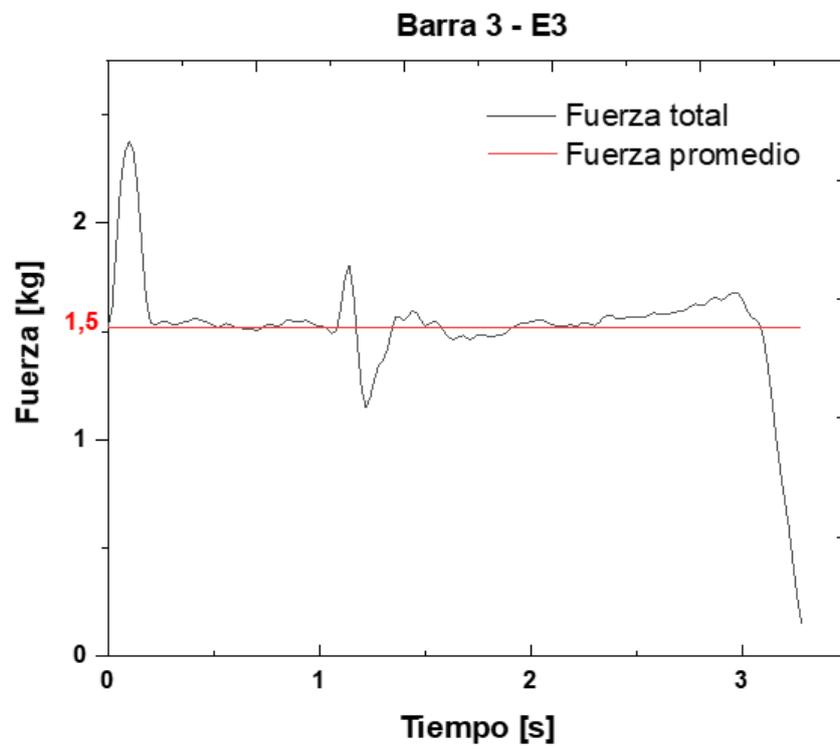


Figura 61. Barra 3 - E3.



Figura 62. Barra 3 - F3.

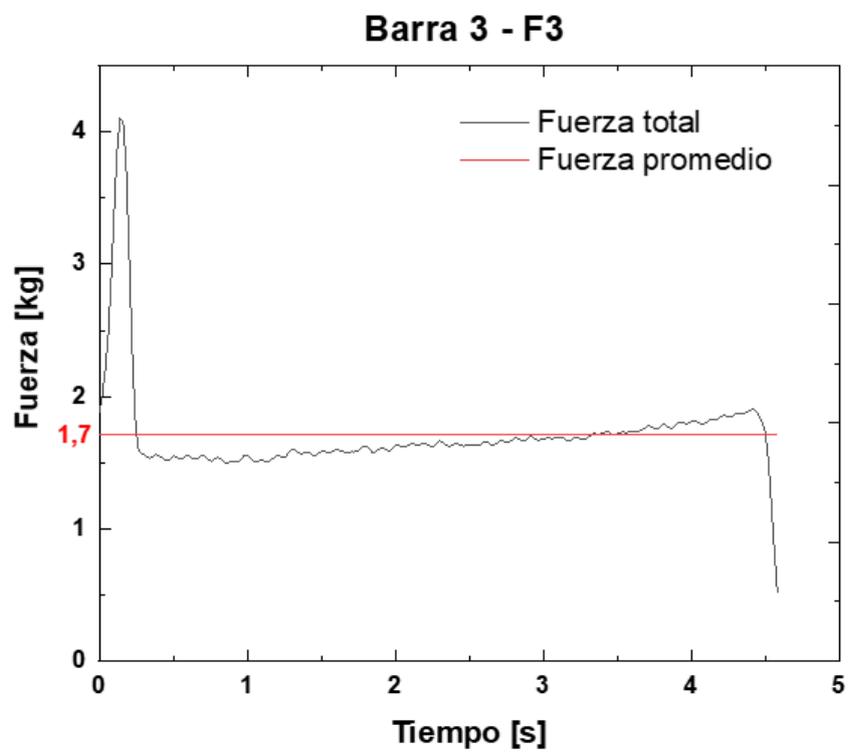


Figura 63. Barra 3 - F3.

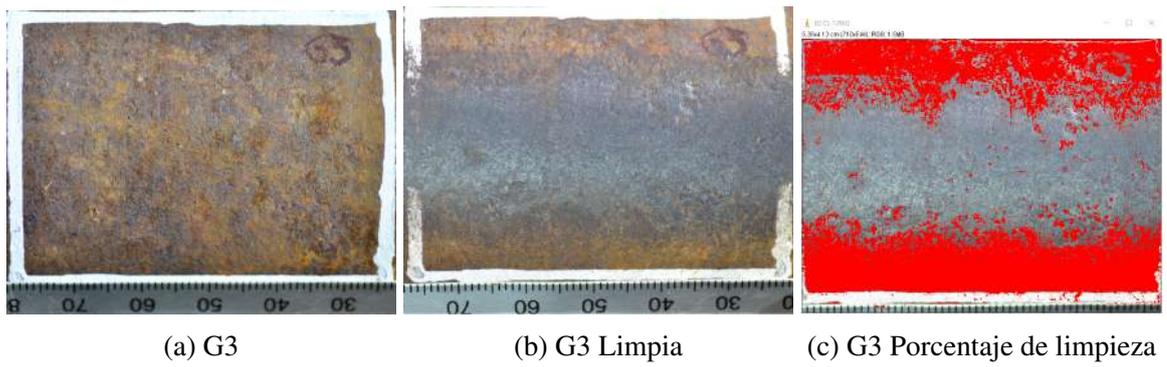


Figura 64. Barra 3 - G3.

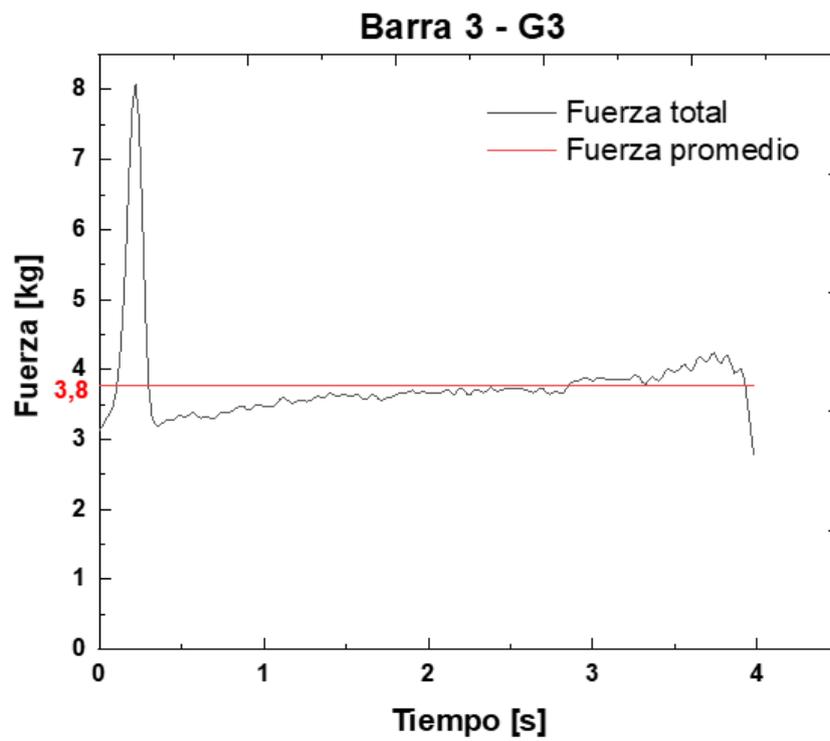


Figura 65. Barra 3 - G3.

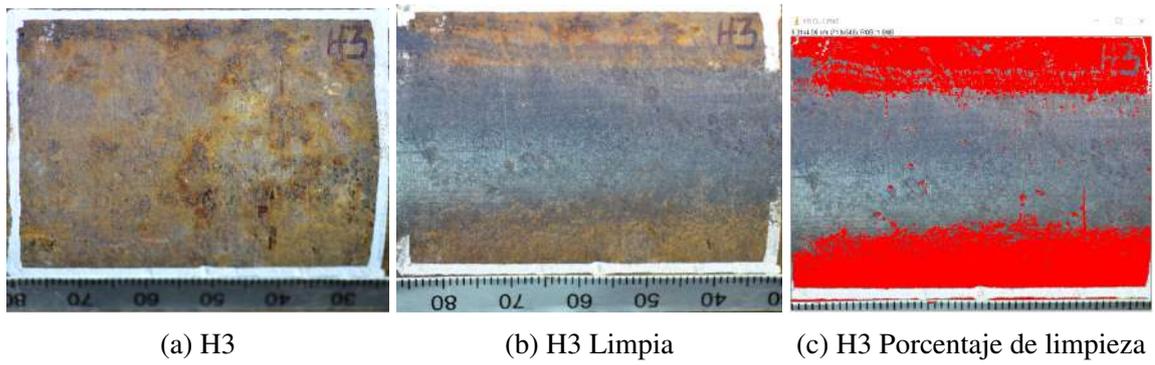


Figura 66. Barra 3 - H3.

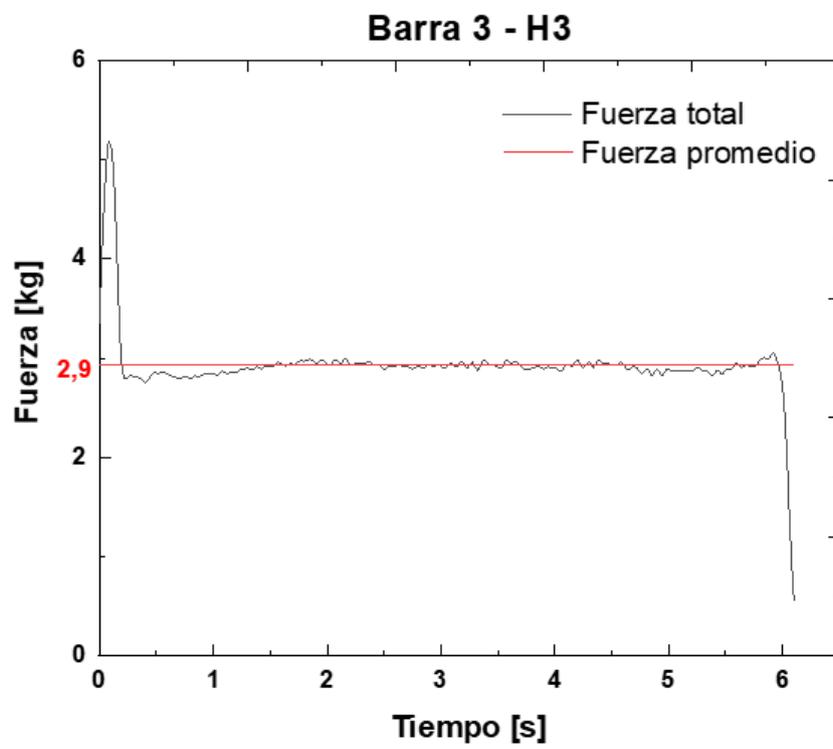


Figura 67. Barra 3 - H3.

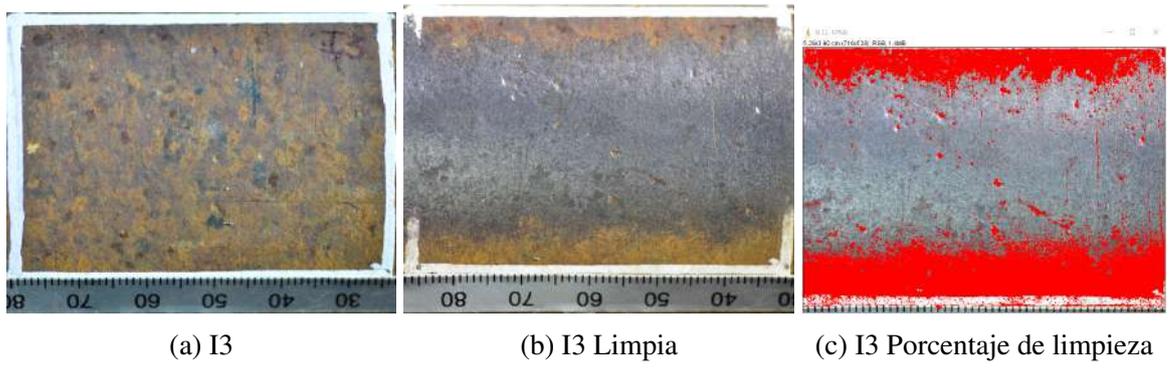


Figura 68. Barra 3 - I3.

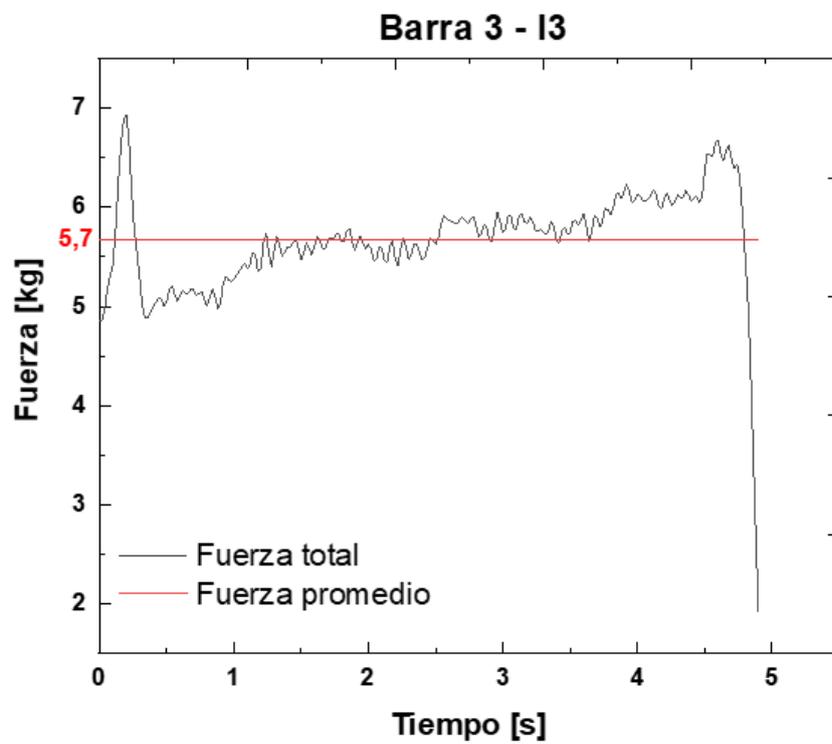


Figura 69. Barra 3 - I3.

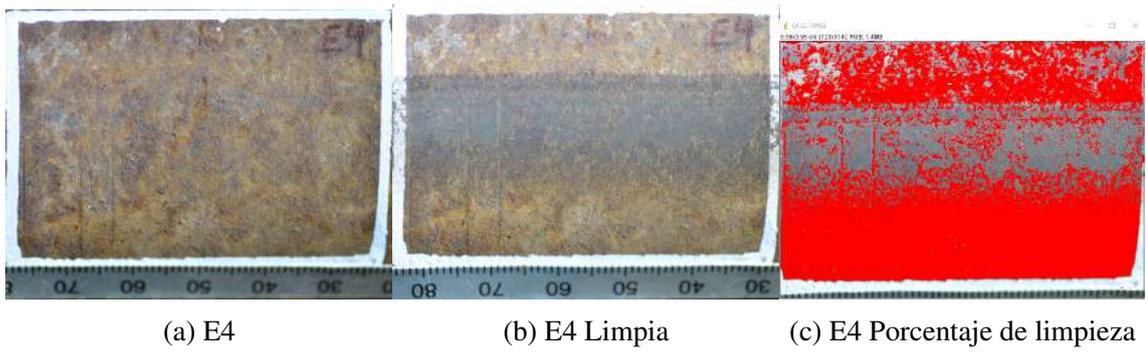


Figura 70. Barra 4 - E4.

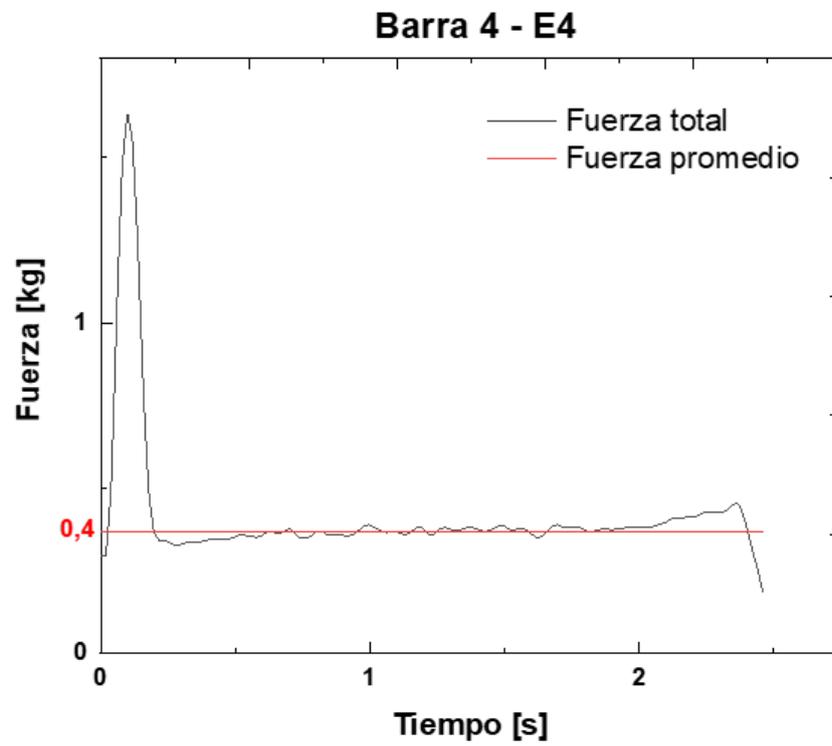


Figura 71. Barra 4 - E4.

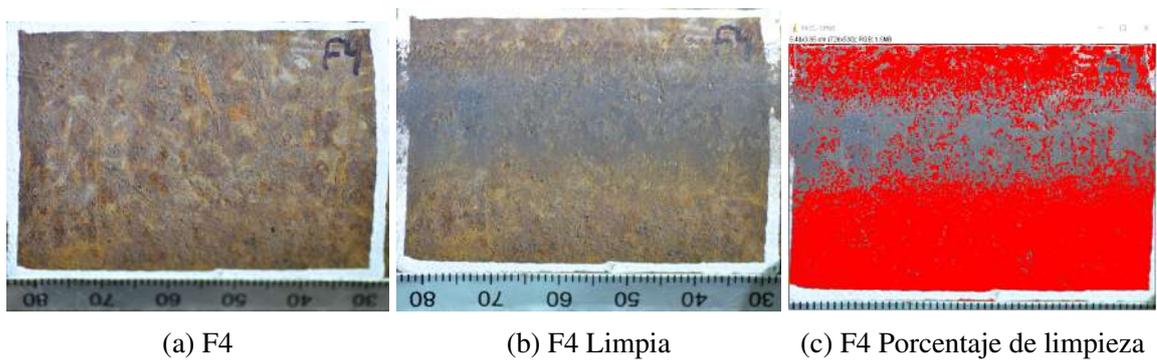


Figura 72. Barra 4 - F4.

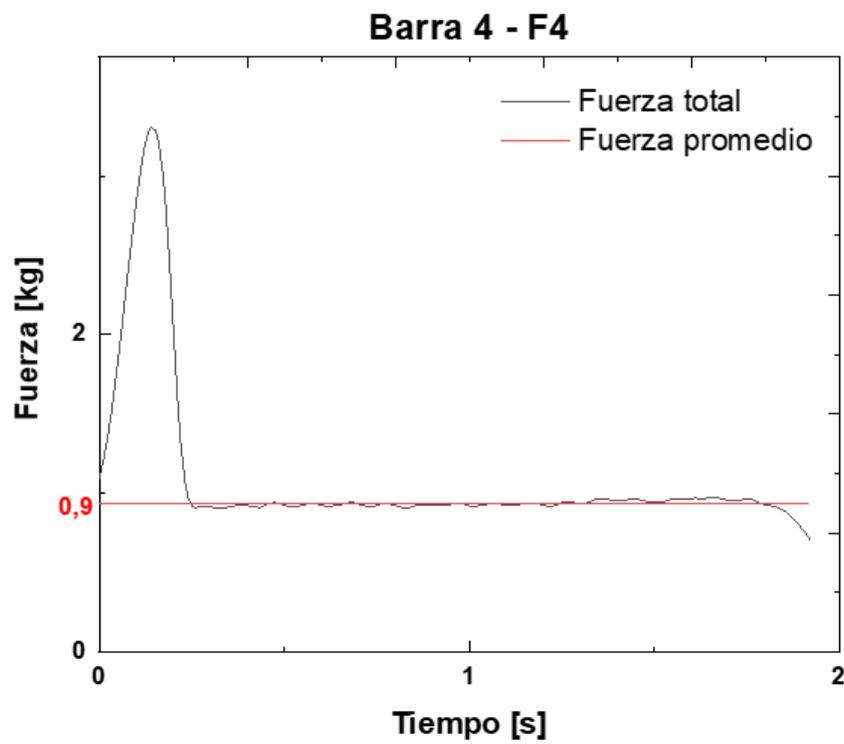


Figura 73. Barra 4 - F4.

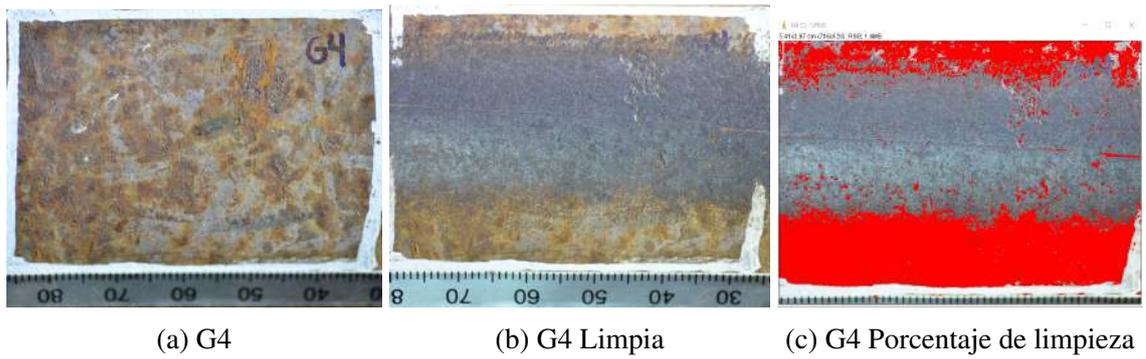


Figura 74. Barra 4 - G4.

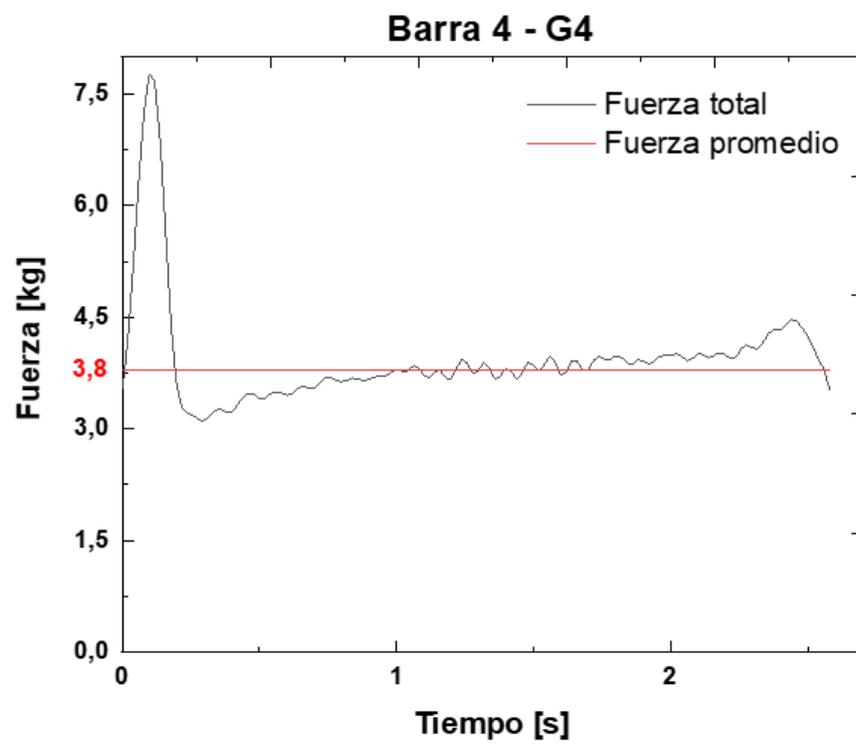


Figura 75. Barra 4 - G4.

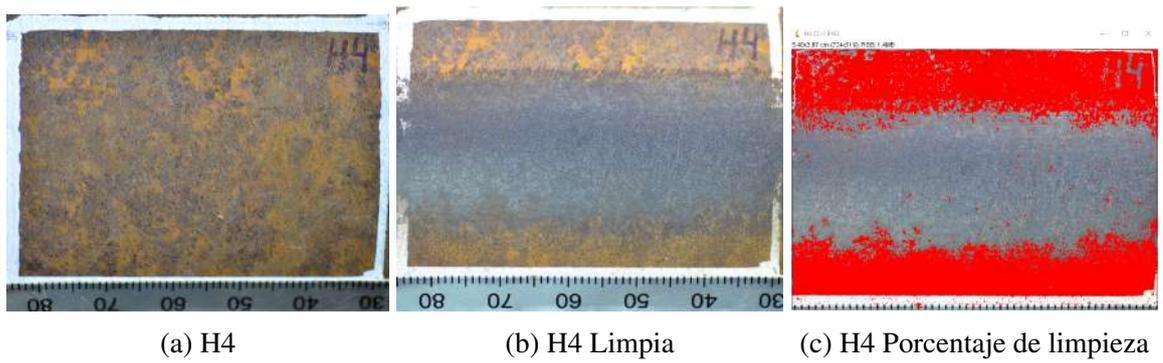


Figura 76. Barra 4 - H4.

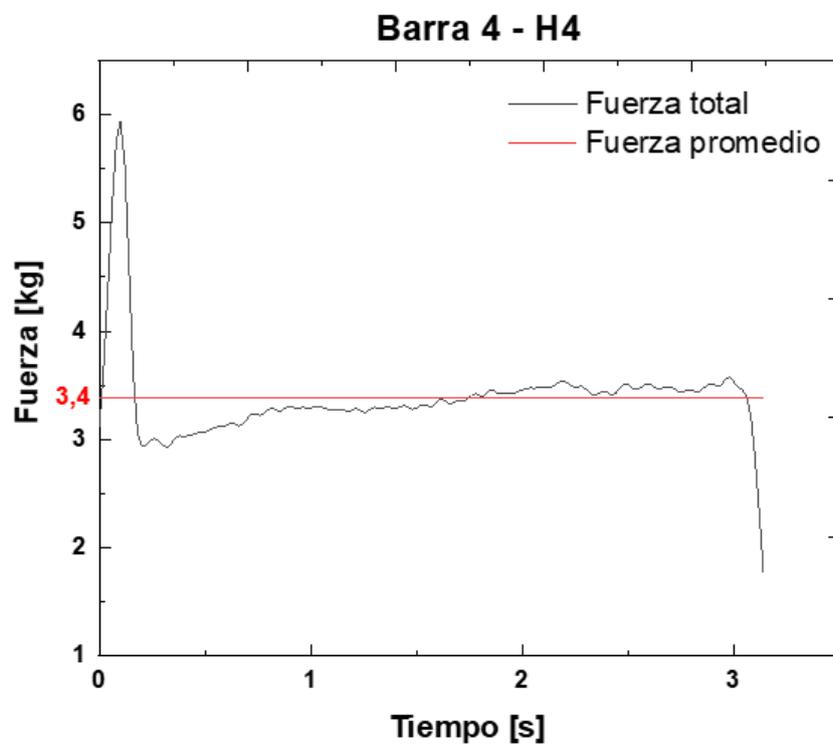


Figura 77. Barra 4 - H4.

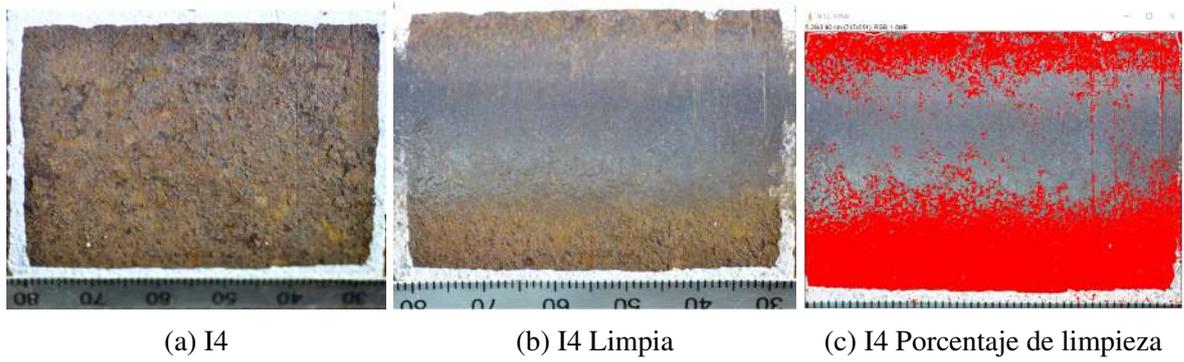


Figura 78. Barra 4 - I4.

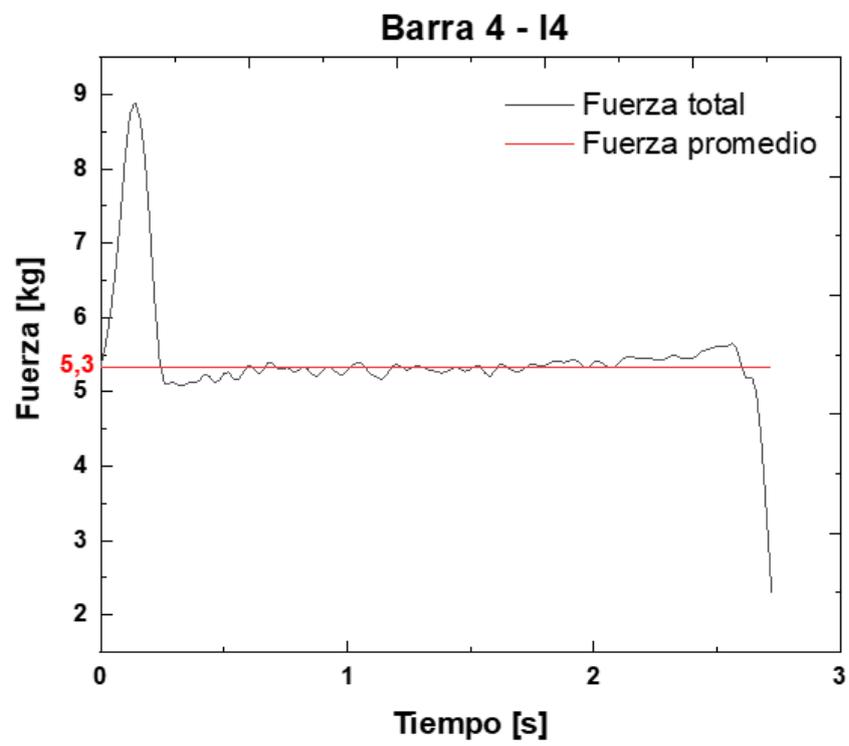


Figura 79. Barra 4 - I4.

B. ANEXO II: Reacciones de Vínculo en el Banco de Ruedas

Acorde al concepto solución seleccionado en 5.2.5, se cálculo en forma analítica (empleando funciones de singularidad), las reacciones sobre las ruedas cuando la barra se encuentra en la situación de la Figura 33.

Se comenzó escribiendo la función de carga q (Ecuación 4) en función de la posición x sobre la longitud de la viga, y luego se la integró para obtener la función de esfuerzo cortante V (Ecuación 5). El proceso de integración continuó para obtener la función del momento flector M (Ecuación 6), de la pendiente (Ecuación 7) y de la deflexión (Ecuación 8), respectivamente.

$$\begin{aligned}
 q(x) = & R_1 \langle x - 0 \rangle^{-1} - w_1 \langle x - 0 \rangle^0 + w_1 \langle x - 0,2032 \rangle^0 - w_2 \langle x - 0,2032 \rangle^0 \\
 & + w_2 \langle x - 9,496 \rangle^0 - w_3 \langle x - 9,496 \rangle^0 + R_2 \langle x - 1,8 \rangle^{-1} + R_3 \langle x - 3,6 \rangle^{-1} \\
 & + R_4 \langle x - 5,4 \rangle^{-1} + R_5 \langle x - 7,2 \rangle^{-1} + R_6 \langle x - 9 \rangle^{-1} - w_c \langle x - 9,496 \rangle^0
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 V(x) = \int q \cdot dx = & R_1 \langle x - 0 \rangle^0 - w_1 \langle x - 0 \rangle^1 + w_1 \langle x - 0,2032 \rangle^1 \\
 & - w_2 \langle x - 0,2032 \rangle^1 + w_2 \langle x - 9,496 \rangle^1 - w_3 \langle x - 9,496 \rangle^1 \\
 & + R_2 \langle x - 1,8 \rangle^0 + R_3 \langle x - 3,6 \rangle^0 + R_4 \langle x - 5,4 \rangle^0 \\
 & + R_5 \langle x - 7,2 \rangle^0 + R_6 \langle x - 9 \rangle^0 - w_c \langle x - 9,496 \rangle^1 + C_1
 \end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}
 M(x) = \int V \cdot dx = & R_1 \langle x - 0 \rangle^1 - \frac{w_1}{2} \langle x - 0 \rangle^2 + \frac{w_1}{2} \langle x - 0,2032 \rangle^2 \\
 & - \frac{w_2}{2} \langle x - 0,2032 \rangle^2 + \frac{w_2}{2} \langle x - 9,496 \rangle^2 - \frac{w_3}{2} \langle x - 9,496 \rangle^2 \\
 & + R_2 \langle x - 1,8 \rangle^1 + R_3 \langle x - 3,6 \rangle^1 + R_4 \langle x - 5,4 \rangle^1 \\
 & + R_5 \langle x - 7,2 \rangle^1 + R_6 \langle x - 9 \rangle^1 - \frac{w_c}{2} \langle x - 9,496 \rangle^2 + C_1 \cdot x + C_2
 \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned}
\theta(x) = \int \frac{M}{EI} \cdot dx = \frac{1}{EI} & \left(\frac{R_1}{2} \langle x - 0 \rangle^2 - \frac{w_1}{6} \langle x - 0 \rangle^3 + \frac{w_1}{6} \langle x - 0,2032 \rangle^3 \right. \\
& - \frac{w_2}{6} \langle x - 0,2032 \rangle^3 + \frac{w_2}{6} \langle x - 9,496 \rangle^3 - \frac{w_3}{6} \langle x - 9,496 \rangle^3 \\
& + \frac{R_2}{2} \langle x - 1,8 \rangle^2 + \frac{R_3}{2} \langle x - 3,6 \rangle^2 + \frac{R_4}{2} \langle x - 5,4 \rangle^2 \\
& + \frac{R_5}{2} \langle x - 7,2 \rangle^2 + \frac{R_6}{2} \langle x - 9 \rangle^2 - \frac{w_2}{6} \langle x - 9,496 \rangle^3 \\
& \left. + \frac{R_6}{2} \langle x - 9 \rangle^2 - \frac{w_c}{6} \langle x - 9,496 \rangle^3 + C_1 \frac{x^2}{2} + C_2 \cdot x + C_3 \right) \quad (7)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
y(x) = \int \theta \cdot dx = \frac{1}{EI} & \left(\frac{R_1}{6} \langle x - 0 \rangle^3 - \frac{w_1}{24} \langle x - 0 \rangle^4 + \frac{w_1}{24} \langle x - 0,2032 \rangle^4 \right. \\
& - \frac{w_2}{24} \langle x - 0,2032 \rangle^4 + \frac{w_2}{24} \langle x - 9,496 \rangle^4 - \frac{w_3}{24} \langle x - 9,496 \rangle^4 \\
& + \frac{R_2}{6} \langle x - 1,8 \rangle^3 + \frac{R_3}{6} \langle x - 3,6 \rangle^3 + \frac{R_4}{6} \langle x - 5,4 \rangle^3 \\
& + \frac{R_5}{6} \langle x - 7,2 \rangle^3 + \frac{R_6}{6} \langle x - 9 \rangle^3 - \frac{w_c}{24} \langle x - 9,496 \rangle^4 + C_1 \frac{x^3}{6} \\
& \left. + C_2 \frac{x^2}{2} + C_3 \cdot x + C_4 \right) \quad (8)
\end{aligned}$$

En este caso, resulta que las constantes C_1 y C_2 son iguales a cero porque las fuerzas de reacción y los momentos que actúan sobre la viga están incluidos en la función de carga. Por lo tanto, quedan seis reacciones y dos constantes por determinar.

Si se consideran las condiciones en el punto infinitesimal a la izquierda de $x = 0$ (denominado $x = 0^-$), el esfuerzo cortante y el momento flector serán ambos iguales a cero. Las mismas condiciones se obtienen para el punto infinitesimal a la derecha de $x = l$ (denominado $x = l^+$). Esto proporciona las condiciones en la frontera necesarias para definir las constantes. Así mismo, la deflexión y debe ser cero en los seis soportes. Todas estas condiciones se resumen en la Tabla 16.

Tabla 16. Condiciones de frontera.

Condición 1	$x = 0^-$	$V = 0^-$
Condición 2	$x = 0$	$y = 0$
Condición 3	$x = 1,8$	$y = 0$
Condición 4	$x = 3,6$	$y = 0$
Condición 5	$x = 5,4$	$y = 0$
Condición 6	$x = 7,2$	$y = 0$
Condición 7	$x = 9$	$y = 0$
Condición 8	$x = 9,75 = l$	$V = M = 0$

Aplicando la condición 2 en la Ecuación 8, resulta:

$$\begin{aligned}
 y(0) = 0 = & \frac{1}{EI} \left(\frac{R_1}{6} \langle 0 - 0 \rangle^3 - \frac{w_1}{24} \langle 0 - 0 \rangle^4 + \frac{w_1}{24} \langle 0 - 0,2032 \rangle^4 \right. \\
 & - \frac{w_2}{24} \langle 0 - 0,2032 \rangle^4 + \frac{w_2}{24} \langle 0 - 9,496 \rangle^4 - \frac{w_3}{24} \langle 0 - 9,496 \rangle^4 \\
 & + \frac{R_2}{6} \langle 0 - 1,8 \rangle^3 + \frac{R_3}{6} \langle 0 - 3,6 \rangle^3 + \frac{R_4}{6} \langle 0 - 5,4 \rangle^3 \\
 & + \frac{R_5}{6} \langle 0 - 7,2 \rangle^3 + \frac{R_6}{6} \langle 0 - 9 \rangle^3 - \frac{w_c}{24} \langle 0 - 9,496 \rangle^4 \\
 & \left. + C_3 \cdot 0 + C_4 \right) \quad (9)
 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow C_4 = 0 \quad (10)$$

Por lo tanto, la función para la deflexión y es:

$$\begin{aligned}
 y = \int \theta \cdot dx = & \frac{1}{EI} \left(\frac{R_1}{6} \langle x - 0 \rangle^3 - \frac{w_1}{24} \langle x - 0 \rangle^4 + \frac{w_1}{24} \langle x - 0,2032 \rangle^4 \right. \\
 & - \frac{w_2}{24} \langle x - 0,2032 \rangle^4 + \frac{w_2}{24} \langle x - 9,496 \rangle^4 - \frac{w_3}{24} \langle x - 9,496 \rangle^4 \\
 & + \frac{R_2}{6} \langle x - 1,8 \rangle^3 + \frac{R_3}{6} \langle x - 3,6 \rangle^3 + \frac{R_4}{6} \langle x - 5,4 \rangle^3 \\
 & + \frac{R_5}{6} \langle x - 7,2 \rangle^3 + \frac{R_6}{6} \langle x - 9 \rangle^3 - \frac{w_c}{24} \langle x - 9,496 \rangle^4 \\
 & \left. + C_3 \cdot x \right) \quad (11)
 \end{aligned}$$

Al aplicar las condiciones 2 a 7 de la Tabla 16, se obtiene el siguiente sistema matricial resuelto empleando *software* específico:

$$\begin{bmatrix} 0,972 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,8 \\ 7,776 & 0,972 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,6 \\ 26,244 & 7,776 & 0,972 & 0 & 0 & 0 & 5,4 \\ 62,208 & 26,244 & 7,776 & 0,972 & 0 & 0 & 7,2 \\ 121,5 & 62,208 & 26,244 & 7,776 & 0,972 & 0 & 9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33,7164 \\ 407,1936 \\ 1809,8 \\ 5304,1 \\ 12326 \end{bmatrix} \quad (12)$$

Para completar el sistema, se debe considerar la condición 8 (ver Tabla 16) que genera dos ecuaciones, a saber:

$$\begin{aligned} V(l = 9,75) = & R_1 < 9,75 - 0 >^0 - w_1 < 9,75 - 0 >^1 + w_1 < 9,75 - 0,2032 >^1 \\ & - w_2 < 9,75 - 0,2032 >^1 + w_2 < 9,75 - 9,496 >^1 - w_3 < 9,75 - 9,496 >^1 \\ & + R_2 < 9,75 - 1,8 >^0 + R_3 < 9,75 - 3,6 >^0 + R_4 < 9,75 - 5,4 >^0 \\ & + R_5 < 9,75 - 7,2 >^0 + R_6 < 9,75 - 9 >^0 - w_c < 9,75 - 9,496 >^1 + C_1 = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} M(l = 9,75) = & R_1 < 9,75 - 0 >^1 - \frac{w_1}{2} < 9,75 - 0 >^2 + \frac{w_1}{2} < 9,75 - 0,2032 >^2 \\ & - \frac{w_2}{2} < 9,75 - 0,2032 >^2 + \frac{w_2}{2} < 9,75 - 9,496 >^2 - \frac{w_3}{2} < 9,75 - 9,496 >^2 \\ & + R_2 < 9,75 - 1,8 >^1 + R_3 < 9,75 - 3,6 >^1 + R_4 < 9,75 - 5,4 >^1 \\ & + R_5 < 9,75 - 7,2 >^1 + R_6 < 9,75 - 9 >^1 - \frac{w_c}{2} < 9,75 - 9,496 >^2 \\ & + C_1 \cdot 9,75 + C_2 = 0 \end{aligned} \quad (14)$$

Al completar el sistema de ecuaciones en forma matricial se tiene:

$$A \cdot B = C \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} 0,972 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1,8 \\ 7,776 & 0,972 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3,6 \\ 26,244 & 7,776 & 0,972 & 0 & 0 & 0 & 5,4 \\ 62,208 & 26,244 & 7,776 & 0,972 & 0 & 0 & 7,2 \\ 121,5 & 62,208 & 26,244 & 7,776 & 0,972 & 0 & 9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 9,75 & 7,95 & 6,15 & 4,35 & 2,55 & 0,75 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 33,7164 \\ 407,1936 \\ 1809,8 \\ 5304,1 \\ 12326 \\ 422,0652 \\ 1911,2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

Y es sabido que:

$$A^{-1} \cdot C = B \quad (17)$$

Resolviendo el sistema se obtiene:

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 45,73 \\ 75,1683 \\ 59,0054 \\ 72,7566 \\ 34,0647 \\ 135,3402 \\ -5,9629 \end{bmatrix} [Kg] \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ C_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 448,2 \\ 736,6 \\ 578,3 \\ 713 \\ 333,8 \\ 1326,6 \\ -58,4 \end{bmatrix} [N] \quad (19)$$

C. ANEXO III: Circuito Hidráulico

C.1. Detalle de los Motores y Ruedas

La Figura 80 muestra los datos de todos los motores representados con la letra M en el circuito de la Figura 43. Se busca que los mismos giren a una velocidad de $100rpm$. Su desplazamiento es de $82cm^3/rev$, entonces:

$$Q \left[\frac{l}{min} \right] = \frac{d \left[\frac{cm^3}{rev} \right] \times \omega [rpm]}{1000} \quad (20)$$

$$Q = \frac{82 \times 100}{1000} = 8,2 \left[\frac{l}{min} \right] \quad (21)$$

Dependiendo de la posición de la barra sobre el banco, los torques requeridos por cada motor varían. Esto genera que cada motor tenga distintas caídas de presión; la misma se calcula como:

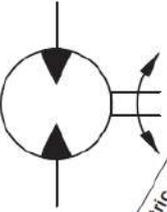
$$\Delta P [bar] = \frac{M [Nm] \times 20 \times \pi}{d \left[\frac{cm^3}{rev} \right]} \quad (22)$$

Dado que los motores son conectados en serie, los mismos son evaluados en términos de presión como resistencias que se suman. El caudal que circula por los motores es de $8,2 \left[\frac{l}{min} \right]$. Se analiza el caso más desfavorable correspondiente al considerado en el apartado de determinación de cargas. Por otro lado, a partir de información de fabricantes de ruedas de fricción (www.pleiger.com), el coeficiente de fricción estático para acero varia entre 0,2 y 0,5. Se adopta, en primera instancia, el valor más desfavorable, $\mu = 0,5$. Para el radio de la rueda se empleó $r = 0,075m$, según *benchmarking*. La Tabla 17 muestra los resultados obtenidos.

Tabla 17. Caída de presión en los motores.

	M1	M2	M3	M4	M5	M6	Total
Torque [Nm]	8,5	13,9	11	13,4	6,4	24,9	78,1
Presión requerida en el motor [bar]	6,49	10,63	8,42	10,27	4,88	19,11	59,81

En la Figura 80 se observa que la selección del Motor Series TE0080 es correcta.



Motor Series TE	cm ³ /rev in ³ /rev	Int rev/min	cont / int*		cont / int*		max bar psi	cont / int*		max KW HP	cont / int*	
			l/min g/min	bar psi	bar psi	bar psi	Nm lb-in	Nm lb-in		Nm lb-in	Nm lb-in	
TE0045	41 2.5	1024	34 42 9 11	140 190 2030 2750	200 2900	71 99 624 876	10.4 13.9	46 64 411 565				
TE0050	49 3.0	1020	34 50 9 13	140 190 2030 2750	200 2900	90 127 796 1120	12.8 17.2	72 98 637 871				
TE0065	65 4.0	877	45 57 12 15	140 190 2030 2750	200 2900	125 176 1106 1558	14.7 19.8	100 137 885 1211				
TE0080	82 5.0	695	45 57 12 15	140 190 2030 2750	200 2900	160 220 1416 1947	17.3 23.2	128 171 1133 1515				

Figura 80. Motor ruedas

C.2. Cilindros

Todos los cilindros de la Figura 43 son iguales y corresponden a los más pequeños de la serie 3L de la marca Parker. El diámetro del pistón es una pulgada (1" = 25,4mm). La Tabla 18 muestra los tiempos de avance y retroceso para distintos caudales y una carrera de 200mm.

Tabla 18. Cilindros 3L.

Caudal [l/min]	Tiempo de avance [s]	Tiempo de retroceso [s]
1	6.1	4.6
2	3	2.3
3	2	1.5
4	1.5	1.1

C.2.1. Cilindros C1, C2, C3 y C4

Cada uno de estos cilindros formará un sistema como el mostrado en la Figura 81. Se busca que el movimiento de los mismos sea lento por lo que, acorde a la Tabla 18, se propone un caudal de 1l/min.

Se puede considerar que cada uno de estos soporta un 25 % del peso total de la barra. Cuando se defina en detalle el componente, se deberá sumar su peso al cálculo, sin embargo, se puede considerar despreciable respecto al peso de la barra.

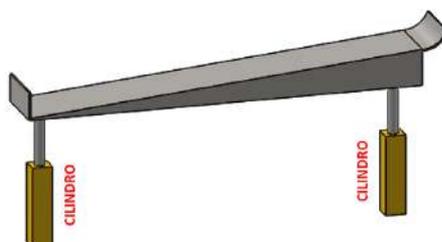


Figura 81. Sistema de desplazamiento lateral de la barra.

Al ascender, se tiene que la presión estará dada por:

$$P = \frac{F}{4 \times A} = \frac{F \times 4}{4 \times \pi \times \phi^2} \quad (23)$$

$$P = \frac{450 \times 9,8N}{\pi \times (0,025m)^2} = 22,5bar \quad (24)$$

Al descender, la presión estará dada por:

$$P = \frac{F}{4 \times A} = \frac{F \times 4}{4 \times \pi \times (\phi_e^2 - \phi_v^2)} \quad (25)$$

$$P = \frac{450 \times 9,8N}{\pi \times ((0,025m)^2 - (0,0127m)^2)} = 30,3bar \quad (26)$$

C.2.2. Cilindro C5

La presión generada por el cepillo se puede lograr mediante un cilindro hidráulico que presione el mecanismo con la barra y además soporte el peso propio del sistema. Se busca que la respuesta de este cilindro sea rápida por lo que, acorde a la Tabla 18 se propone un caudal de $4l/min$.

Este cilindro deberá cumplir con dos condiciones, en su máxima extensión deberá soportar el peso de todo el mecanismo, dejando un espacio libre entre este y las ruedas para que la barra ingrese al sistema. La magnitud exacta de dicha fuerza, es función del

diseño del sistema porta cepillo y se podrá definir en una ingeniería de detalle del mismo (fuera del alcance de este trabajo). La segunda condición, cuando la barra este posicionada debajo del cepillo, el cilindro debe disminuir su carrera y generar la presión necesaria para la limpieza. La magnitud de esta fuerza se analiza en el apartado de determinación de cargas. Se utiliza para el cálculo una fuerza total del cilindro de $50kg$.

Máxima extensión:

$$P = \frac{40 \times 9,8N \times 4}{\pi \times (0,025m)^2} = 8bar \quad (27)$$

Ejerciendo presión sobre el cepillo:

$$P = \frac{50 \times 9,8N \times 4}{\pi \times ((0,025m)^2 - (0,0127m)^2)} = 13,5bar \quad (28)$$

C.2.3. Cilindros C6 y C7

Es un sistema similar al de C.2.1 pero con solo un cilindro por apoyo y al descender no hay carga porque la barra ya se habrá desplazado a los caballetes. Se busca que el movimiento de estos cilindros sea lento por lo que, acorde a la Tabla 18, se propone un caudal de $1l/min$. En este caso se supone que cada uno de los apoyos soporta la mitad del peso de la barra.

Ascenso

$$P = \frac{225 \times 9,8N \times 4}{2 \times \pi \times (0,025m)^2} = 45bar \quad (29)$$

C.3. Motor del cepillo

Es el representado como MC en la Figura 43. Del catálogo del cepillo se determinó que debía girar a $4500rpm$. Los datos del motor seleccionado se muestran en Figura 82. El caudal requerido por el mismo es:

$$Q \left[\frac{l}{min} \right] = \frac{d \left[\frac{cm^3}{rev} \right] \times \omega [rpm]}{1000} \quad (30)$$

$$Q = \frac{3,57 \times 4500}{1000} = 16l/min \quad (31)$$

MGG Displacement

MODEL NO.	MGG20010	MGG20016	MGG20020	MGG20025	MGG20030
DISPLACEMENT PER REVOLUTION	.218 in. ³ (3.57 cm ³)	.372 in. ³ (6.094 cm ³)	.450 in. ³ (7.374 cm ³)	.580 in. ³ (9.50 cm ³)	.700 in. ³ (11.471 cm ³)
MAXIMUM RATED RPM	5000	5000	5000	5000	5000
RATED FLOW PER 1000 RPM (NOMINAL)	.95 GPM (3.6 liters/min)	1.61 GPM (6.1 liters/min)	1.95 GPM (7.4 liters/min)	2.51 GPM (9.5 liters/min)	3.03 GPM (11.5 liters/min)
MAXIMUM RATED PRESSURE	2000 PSI (138.0 bar)	2000 PSI (138.0 bar)	2000 PSI (138.0 bar)	2000 PSI (138.0 bar)	1500 PSI (103.5 bar)
CONTINUOUS PRESSURE	2500 PSI (172.5 bar)	2500 PSI (172.5 bar)	2500 PSI (172.5 bar)	2500 PSI (172.5 bar)	2000 PSI (138.0 bar)
INTERMITTENT PRESSURE	2500 PSI (172.5 bar)	2500 PSI (172.5 bar)	2500 PSI (172.5 bar)	2500 PSI (172.5 bar)	2000 PSI (138.0 bar)
OUTPUT TORQUE PER 1000 PSI* (69.0 bar)	35 in.-lbs. (40 kg-cm)	59 in.-lbs. (68 kg-cm)	72 in.-lbs. (83 kg-cm)	92 in.-lbs. (107 kg-cm)	111 in.-lbs. (128 kg-cm)
WEIGHT	2.8 pounds (1.25 kg)	3.0 pounds (1.36 kg)	3.1 pounds (1.41 kg)	3.3 pounds (1.50 kg)	3.5 pounds (1.59 kg)
SHAFT SIDE LOAD**	170 lbs. (77.0 kg)	130 lbs. (59.0 kg)	110 lbs. (50.0 kg)	70 lbs. (31.7 kg)	30 lbs. (13.5 kg)

* THEORETICAL

** SIDE LOAD: Maximum Permissible Shaft Side Load at 2500 RPM and 1000 PSI (69.0 bar) (B-10 Bearing Life of 1000 Hrs.)

OIL TEMPERATURE: Maximum recommended oil temperature 180° F (82.2° C)

OIL VISCOSITY: Recommended viscosity 150 SUS (3.65 engler). (32 centistokes) Minimum recommended viscosity 60 SUS (2.1 engler) (13 centistokes)

FILTRATION: Minimum recommended filtration 10 Micron.

END THRUST: 80 LBS. (36.3 kg.) maximum.

WARNING
Never exceed the INTERMITTENT pressure rating or 5000 RPM

Figura 82. Motor del cepillo.

C.4. Bomba 1

Esta bomba alimenta los sistemas descritos en C.2 y C.3. La máxima presión de este circuito es determinada por el retroceso de los cilindros descrito en C.2.1 (30,3bar); se seteará la misma a 50bar y VP1 a 60bar. La bomba tiene cuatro (4) etapas de funcionamiento:

- Desplazamiento descrito en C.2.1: la bomba debe erogar 4l/min (1l/min por cada cilindro). Una vez finalizado el movimiento, se debe posicionar la válvula direccional VD1 en su posición central para no consumir caudal.
- Motor cepillo MC y cilindro C5 funcionando en simultáneo: en este caso la bomba debe erogar 20l/min. Cuando no esté en uso se debe posicionar VD3 en su posición central para no consumir caudal.

- Desplazamiento descrito en C.2.3: la bomba debe erogar $2l/min$.

El mayor caudal que debe erogar la bomba es de $20l/min$. La misma se acoplará directamente a un motor asincrónico que gira a $1500rpm$. Con estos datos se seleccionó la bomba de desplazamiento variable a paletas cuyos datos se muestran en la Figura 83.

Selection table

Model	Displacement in cm^3/rev	Output flow at 1500 rpm in l/min	Input power at nominal pressure in kW	Weight in kg single pump	Weight in kg main pump	Weight in kg intermediate pump	Weight in kg second pump
PVS08	8.3	12	3.65	8.9	8.9	8.8	8.8
PVS12	12.8	19	5.0	8.9	8.9	8.8	8.8
PVS16	16	23	8.7	18.1	16.9	16.0	16.8
PVS25	24	35	9.9	18.1	16.9	16.0	16.8
PVS32	31	45	12.7	33.2	30.8	33.0	30.6
PVS40	40	60	15.9	33.2	30.8	33.0	30.6
PVS50	51.5	75	19.7	33.2	30.8	33.0	30.6

Figura 83. Bomba 1.

C.5. Bomba 2

Esta alimenta los bancos de ruedas y según C.1 la máxima presión de trabajo es de $62bar$. Estos bancos requieren un caudal $8l/min$. La bomba seleccionada es la *PVS08* cuyos datos se ven la Figura 83. Para vencer las pérdidas distribuidas y localizadas el circuito deberá trabajar a una presión mayor. La ingeniería de detalle del circuito (fuera del alcance de este trabajo), determinará la longitud de mangueras, caños y racores. Sin embargo, se buscará que las mismas sean inferiores a un 3%, por lo que la bomba se setea a una presión de $80bar$. Para proteger este circuito, la válvula limitadora de presión **VP2** se setea a $90bar$.

C.6. Válvula reguladora de caudal

La serie **PCCM** son válvulas reguladoras de caudal con presión compensada. En función del caudal que debe circular por cada una, se seleccionó la *420S* para **VQ2**, **VQ3**, **VQ8** y **VQ9**. Para **VQ1**, **VQ4**, **VQ5**, **VQ6**, **VQ7** Y **VQ10** se seleccionó la *600S*. Ver Figura 84.

Specifications

	PC*M400S PC*M620S	PC*M600S PC*M820S	PC*M800S PC*M1020S	PC*M1200S PC*M1220S	PC*M1600S PC*M1620	PC*M2000S
Maximum Operating Pressure	207 Bar (3000 PSI)					
Minimum Pressure to Compensate	6.9 Bar (100 PSI)	6.9 Bar (100 PSI)	6.9 Bar (100 PSI)	10.4 Bar (150 PSI)	10.4 Bar (150 PSI)	10.4 Bar (150 PSI)
Operating Temperature	-40°C to +121°C (-40°F to +250°F) Nitrile (standard) -26°C to +205°C (-15°F to +400°F) Fluorocarbon					
Mounting	Inline					
Maximum Flow	11 LPM (3 GPM)	23 LPM (6 GPM)	57 LPM (15 GPM)	95 LPM (25 GPM)	189 LPM (50 GPM)	303 LPM (80 GPM)
Minimum Flow	1 LPM (0.3 GPM)	2 LPM (0.6 GPM)	6 LPM (1.5 GPM)	10 LPM (2.5 GPM)	19 LPM (5.0 GPM)	30 LPM (8 GPM)
Reverse Flow, Maximum thru Check	19 LPM (5 GPM)	30 LPM (8 GPM)	76 LPM (20 GPM)	132 LPM (35 GPM)	227 LPM (60 GPM)	378 LPM (100 GPM)
Pressure Drop, ΔP at Maximum Reverse Flow thru Check	3 Bar (40 PSI)	3 Bar (40 PSI)	PC*M800S: 8 Bar (116 PSI) PC*M1020S: 3 Bar (40 PSI)	PC*M1200S: 8 Bar (116 PSI) PC*M1220S: 3 Bar (40 PSI)	10 Bar (140 PSI)	11 Bar (155 PSI)
Port Size (in.)	PC*M400S: 1/4 NPTF PC*M620S: 9/16-18 UNF (SAE 6)	PC*M600S: 3/8 NPTF PC*M820S: 3/4-16 UNF (SAE 8)	PC*M800S: 1/2 NPTF PC*M1020S: 7/8-14 UNF (SAE 10)	PC*M1200S: 3/4 NPTF PC*M1220S: 1-1/16-12 UN (SAE 12)	PC*M1600S: 1 NPTF PC*M1620: 1-15/16-12 UN (SAE 16)	PC*M2000S: 1 1/4" NPTF

Figura 84. Válvula reguladora de caudal

C.7. Válvula direccional

Se seleccionan en función del caudal máximo que debe circular por la válvula. Ver Figura 85.

General Description

Series D1VL directional control valves are high-performance, 4-chamber, direct operated, lever controlled, 4-way valves. They are available in 2 or 3-position and conform to NFPA's D03, CETOP 3 mounting patterns.

Features

- Spring return or detent styles available
- Heavy duty handle design

Specifications

Mounting Pattern	NFPA D03, CETOP 3, NG 6
Maximum Pressure	Operating: 345 Bar (5000 PSI) Tank Line: 34 Bar (500 PSI)
Maximum Flow	See Reference Data
Force Required to Shift Lever Operator	25 N (5.6 lbs)

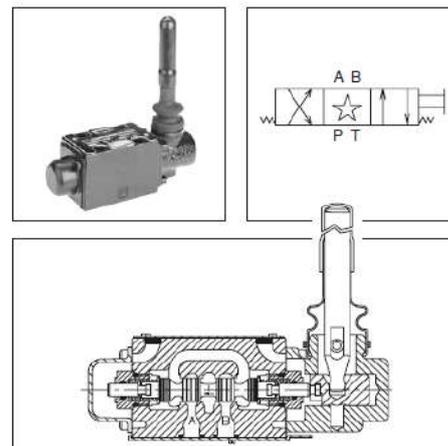


Figura 85. Válvula direccional

C.8. Funcionamiento

Se utiliza el código de colores mostrado en la Figura 86. La unidad de caudal utilizada será $[l/min]$ y la de presión $[bar]$.



Figura 86. Código de colores

C.8.1. Puesta en marcha de las bombas

Parámetros utilizados

Los parámetros seteados en el programa *FluidSim – H* se muestran en la Figura 87 (B1), Figura 88 (B2), Figura 89 (VP1), Figura 90 (VP2) y Figura 91 (VD1, VD2, VD3, VD4 y VD6).

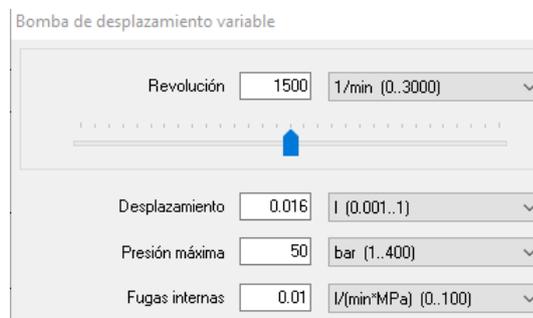


Figura 87. B1.

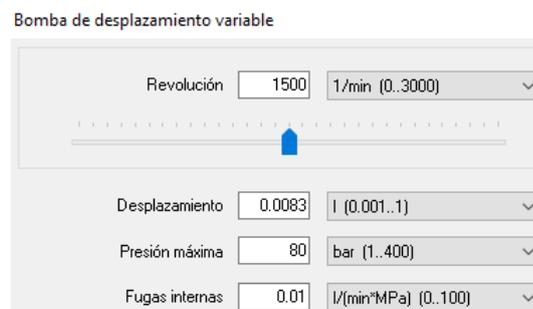


Figura 88. B2.

Válvula limitadora de presión

Presión nominal

60 bar (0..400)

Resistencia hidráulica

0.01 MPa/(l/min)² (1e-007..100)

Figura 89. VP1.

Válvula limitadora de presión

Presión nominal

90 bar (0..400)

Resistencia hidráulica

0.01 MPa/(l/min)² (1e-007..100)

Figura 90. VP2.

Configurar válvula

Accionamiento izquierdo

Retorno de muelle

Pilotado

Alimentación externa

Esfuerzo muscular 

Mecánico

Hidráulico/Eléctrico

Denominación de componentes

Válvula direccional cuádruple de 3 vías de p

Cuerpo de la válvula

Reversible

Posición inicial

Accionamiento derecho

Retorno de muelle

Pilotado

Alimentación externa

Esfuerzo muscular

Mecánico

Hidráulico/Eléctrico

Izquierda Señal dominante Derecha

Resistencia hidráulica 0.01 MPa/(l/min)² (1e-007..100) Curva...

Reflejar

Horizontal

Vertical

Figura 91. VD1,VD2,VD3,VD4 y VD6.

Funcionamiento

Al poner en funcionamiento las bombas, las mismas comienzan a erogar caudal sin generar presión. Ver Figura 92.

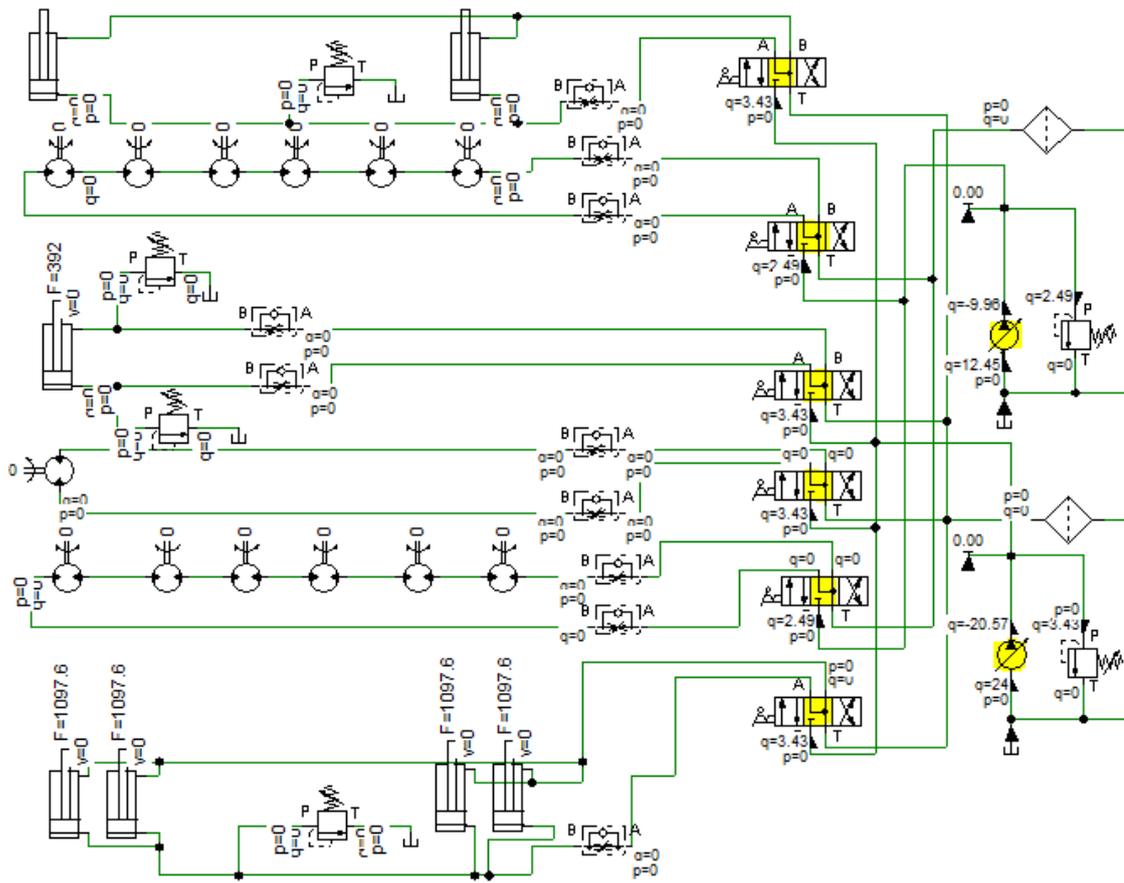


Figura 92. Arranque bombas.

Todas las válvulas direccionales VD1, VD2, VD3, VD4, VD5 y VD6 están en su posición normal, cuya entrada de presión es cerrada. Esto genera que el aceite comience a elevar su presión. En la Figura 93, la bomba B2 ha alcanzado su presión de seteo de 80bar . En este punto la misma comienza a disminuir su caudal manteniendo la presión constante hasta dejar de erogar. La bomba B1 ya se ha estabilizado a su presión de trabajo dejando de erogar caudal.

En la Figura 94 se observa que todo el sistema se ha estabilizado. Ambas bombas mantienen su presión de seteo y han dejado de erogar caudal.

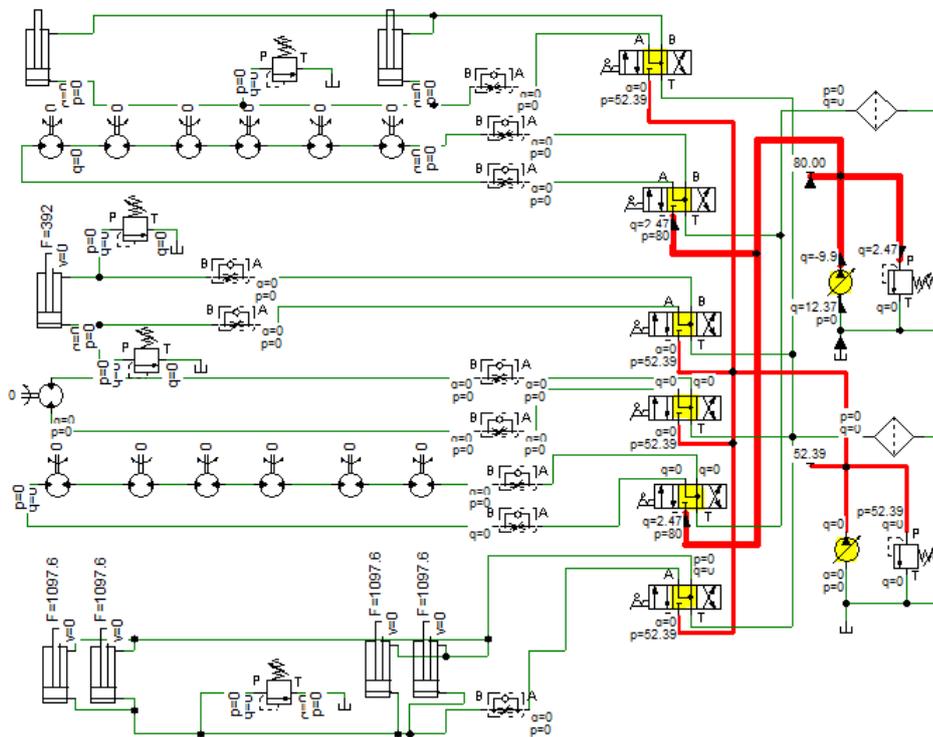


Figura 93. B1 estabilizado.

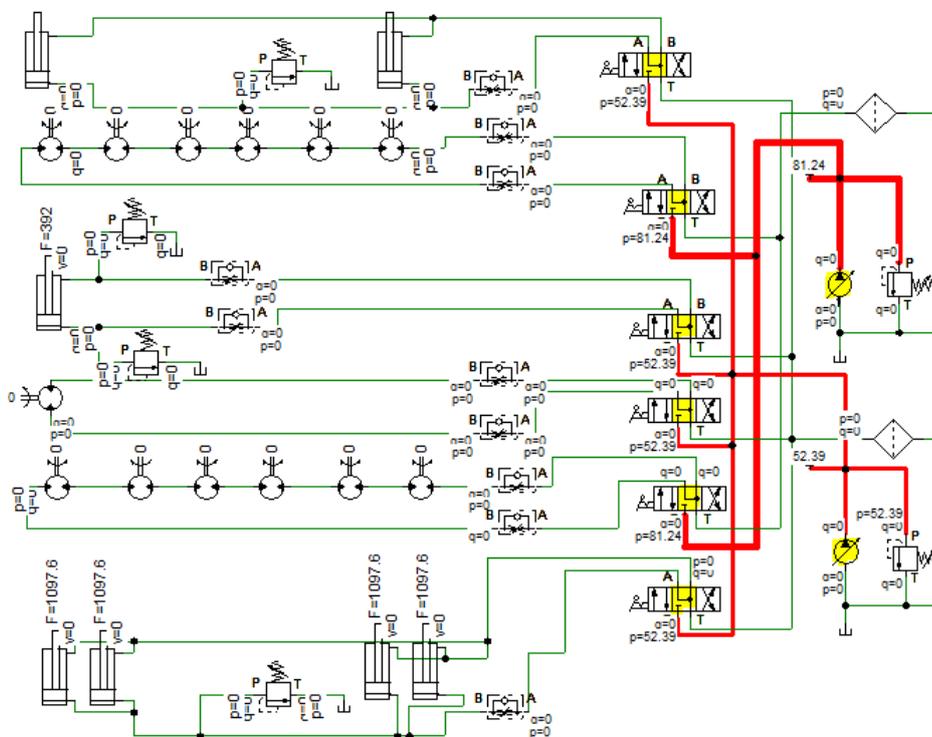


Figura 94. Sistema estabilizado.

C.8.2. Desplazamiento lateral de la barra con C1, C2, C3 y C4

Parámetros utilizados

Acorde a C.2.1 se adoptan los siguientes parámetros en *FluidSIM – H*. La Figura 95, Figura 96, Figura 97 y Figura 98 muestran los parámetros utilizados para C1, C2, C3 y C4. La Figura 99 muestra los valores utilizados para VP3.

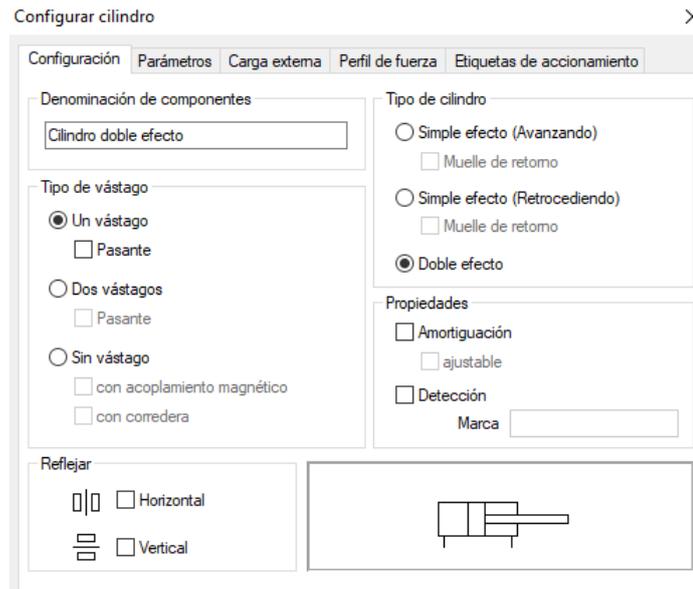


Figura 95. Configuración cilindro.

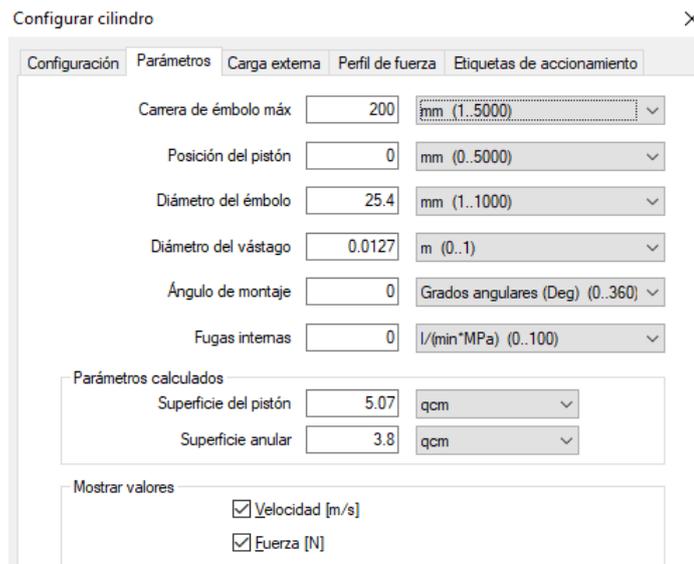


Figura 96. Parámetros cilindro.

Configurar cilindro

Configuración Parámetros Carga externa Perfil de fuerza Etiquetas de accionamiento

Masa en movimiento 112 kg (0..10000)

Rozamiento

Seleccionar material

- Acero sobre acero
- Hierro fundido sobre hierro fundido
- Madera sobre madera
- Acero sobre madera
- Acero sobre hielo
- Neumático sobre asfalto

Introducir manualmente

Coefficiente de rozamiento estático 0 (0..2)

Coefficiente de rozamiento dinámico 0 (0..2)

Nota
El cálculo de la fuerza de rozamiento también depende de ángulo de fijación del cilindro (ver "Parámetros").

Figura 97. Carga externa cilindro.

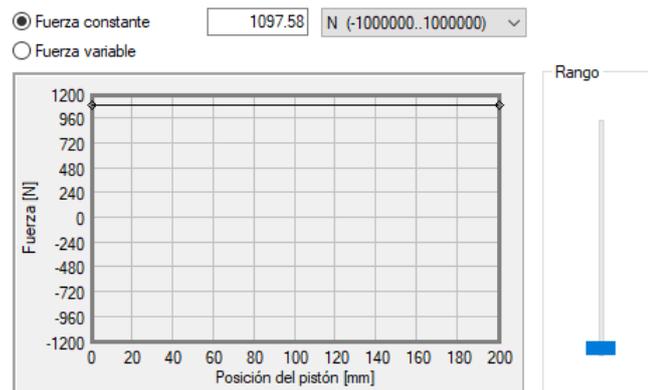


Figura 98. Perfil de fuerza.

Válvula limitadora de presión

Presión nominal

22.5 bar (0..400)

Resistencia hidráulica

0.01 MPa/(l/min)² (1e-007..100) Curva...

Figura 99. Configuración VP3.

Funcionamiento

Avance

Apertura de VD1. La bomba B1 comienza a elevar el caudal para que el fluido circule

hacia los cilindros, ver Figura 100.

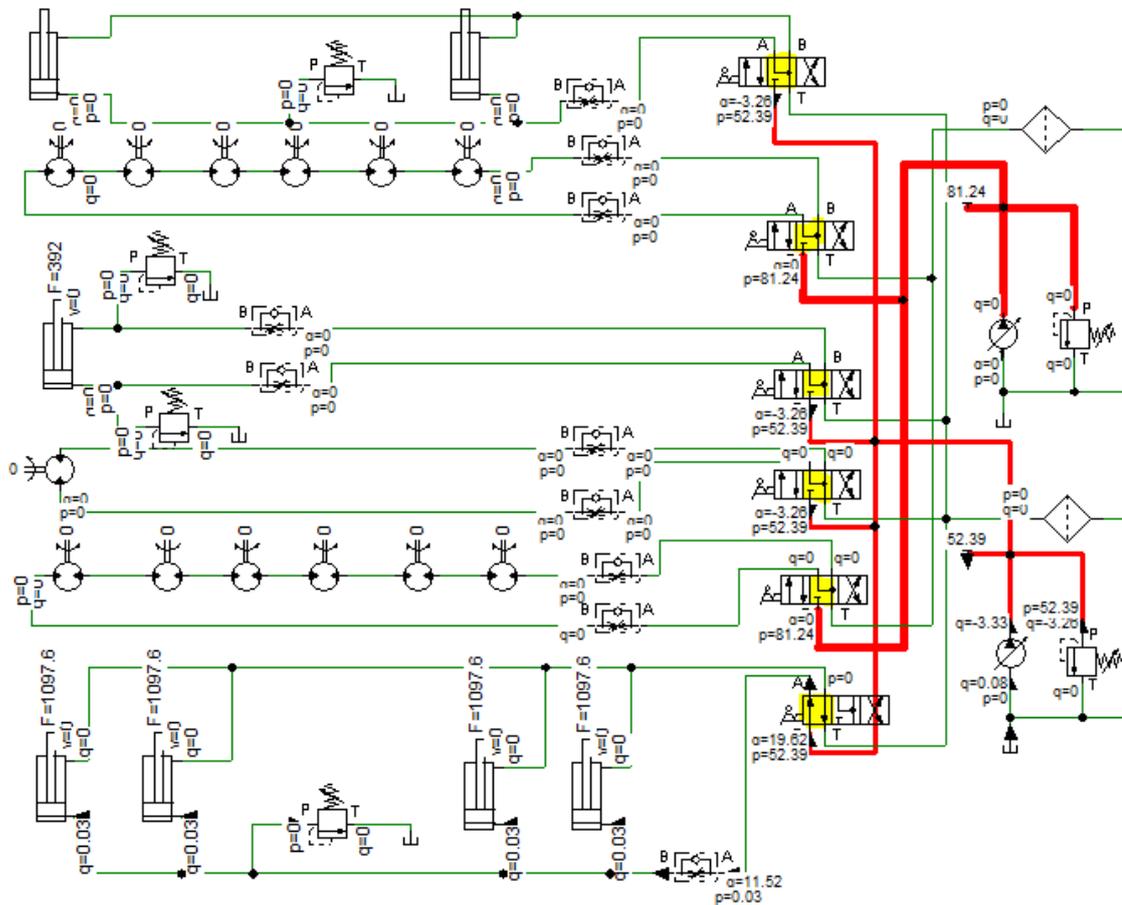


Figura 100. Apertura VD1.

El aceite es reducido en la válvula reguladora de caudal VQ1 y como todos los cilindros son iguales, el caudal en cada uno de ellos es el mismo (Figura 101). El circuito se presurizará hasta el valor seteado en VP3 y entonces podrá elevar la carga.

En la Figura 102, se observan los cilindros avanzando a la misma velocidad con un caudal de entrada de 1 l/min y uno de salida de 0.8 l/min . Por el filtro F1 se observa el caudal de salida de los cuatro cilindros (3.2 l/min) descargando a tanque.

Una vez que los cilindros han llegado a su máxima extensión, la presión se incrementa y la válvula limitadora de presión VP3 se acciona para descargar el caudal a tanque. Como se ve en la Figura 103 el caudal erogado por B1 se va a tanque por VP3.

A pesar de que el programa muestra que los cilindros avanzarán a la misma velocidad, se decide incorporar una válvula divisora de caudal (VDQ1) tal como se muestra en la Figura 43.

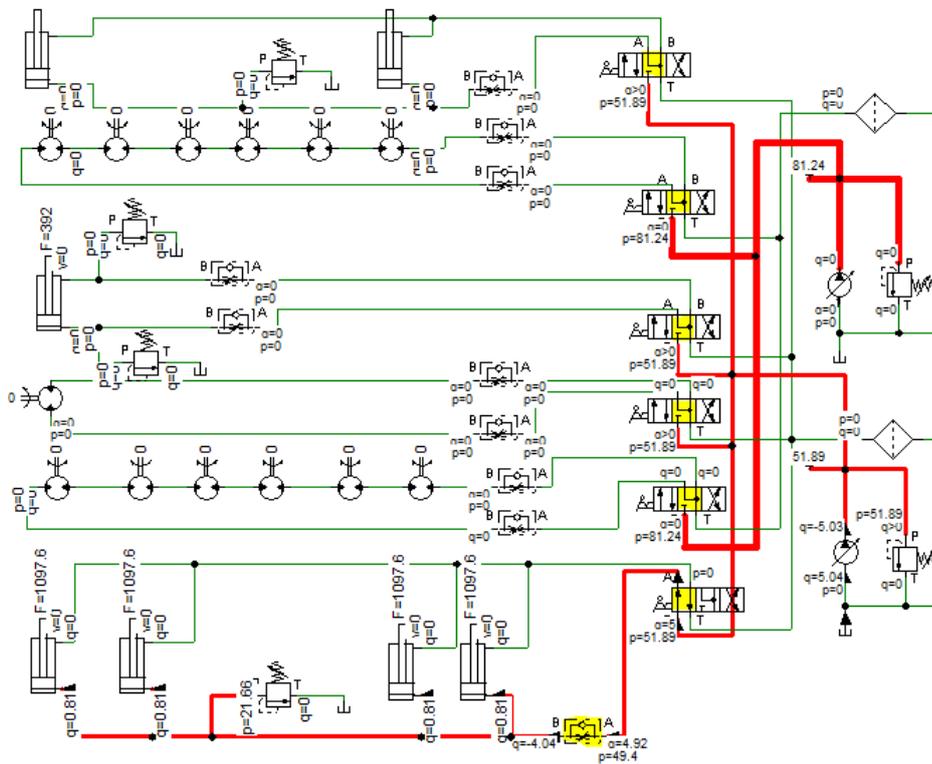


Figura 101. Flujo hacia C1, C2, C3 y C4.

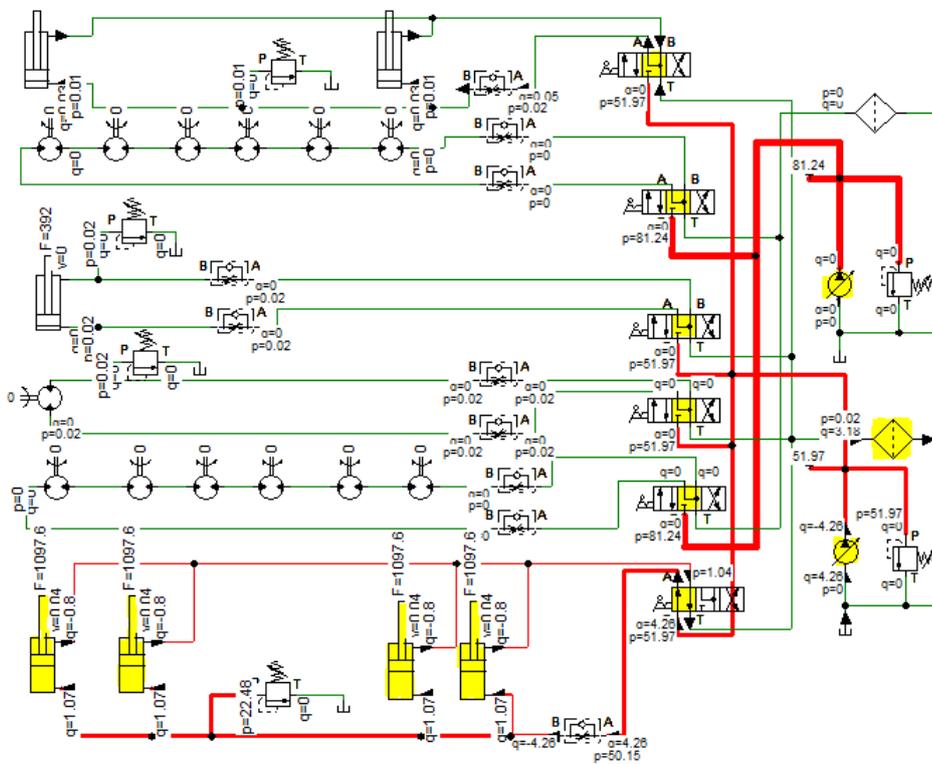


Figura 102. Avance de los cilindros.

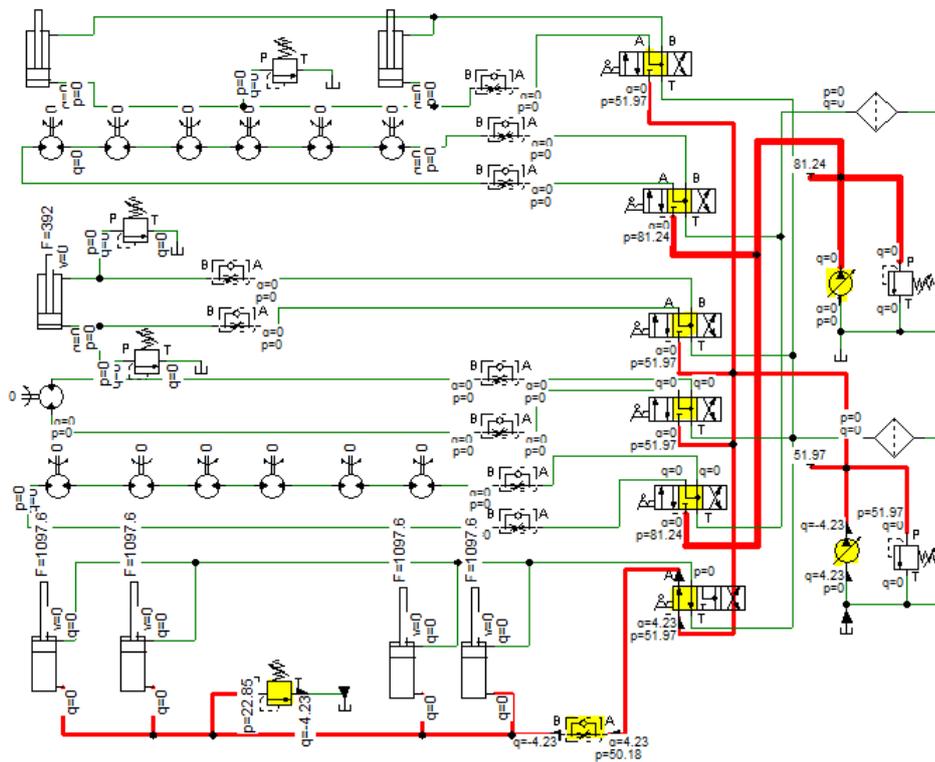


Figura 103. Máxima extensión de los cilindros.

Retroceso

Al regresar, la fuerza solo estará presente durante una parte de la carrera de los pistones ya que, al apoyar la barra sobre el banco de ruedas, estos continuarán sin carga.

Para simular esta situación se cambia el perfil de fuerza sobre el cilindro, donde los 112 kg solo están aplicados en los últimos 50 mm de carrera. Ver Figura 104.

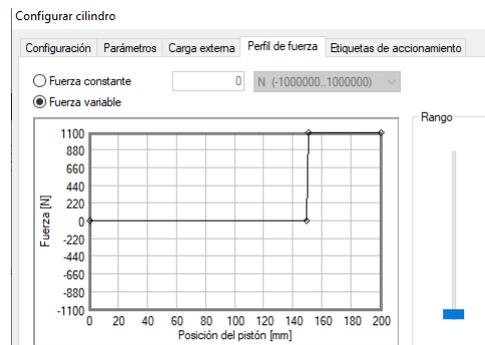


Figura 104. Perfil de fuerza en retroceso.

Se cambia la posición a la mostrada en la Figura 105. Los cilindros descienden hasta sus 150 mm de carrera donde la fuerza disminuye hasta un valor nulo, y es cuando la presión de la rama superior comienza a aumentar (ver Figura 106).

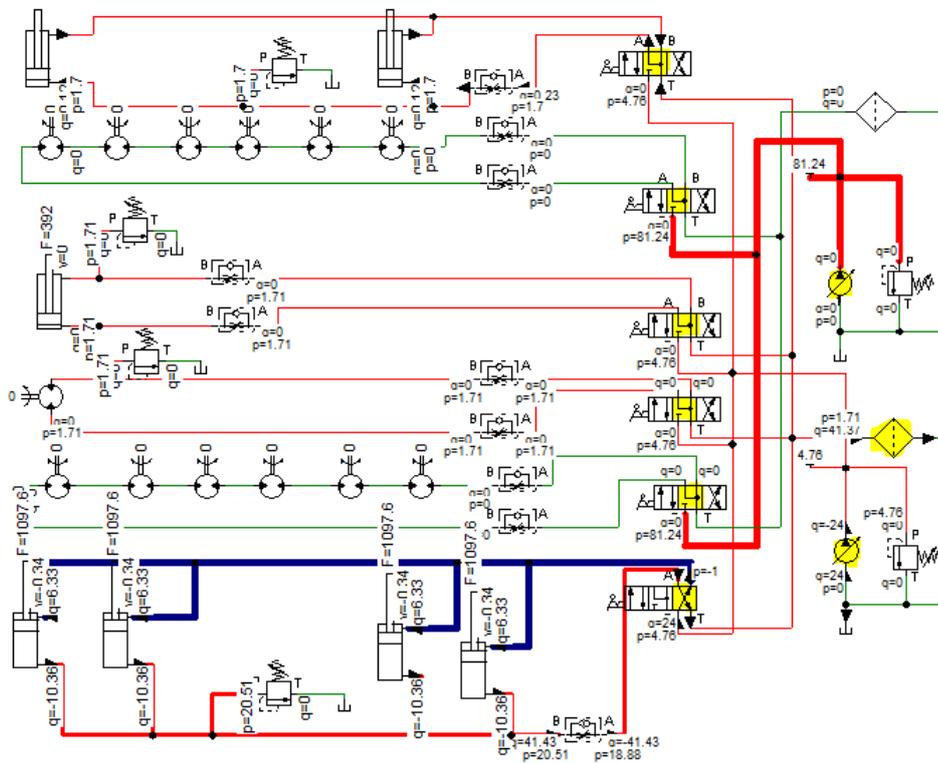


Figura 105. Retroceso. Cambio de posición VD1

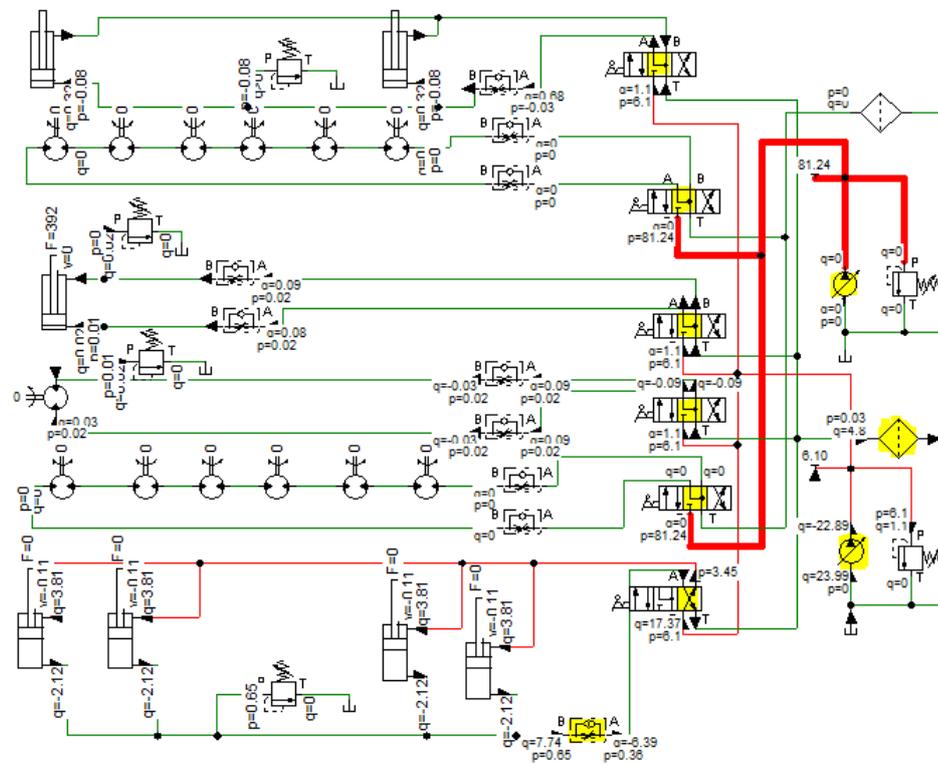


Figura 106. Inicio retroceso de los cilindros.

Finalmente, los cilindros llegan al final de la carrera y la presión sobre la rama superior comienza a aumentar hasta el valor seteado en B1. Luego, B1 comienza a disminuir el caudal hasta llegar a la condición mostrada en la Figura 107.

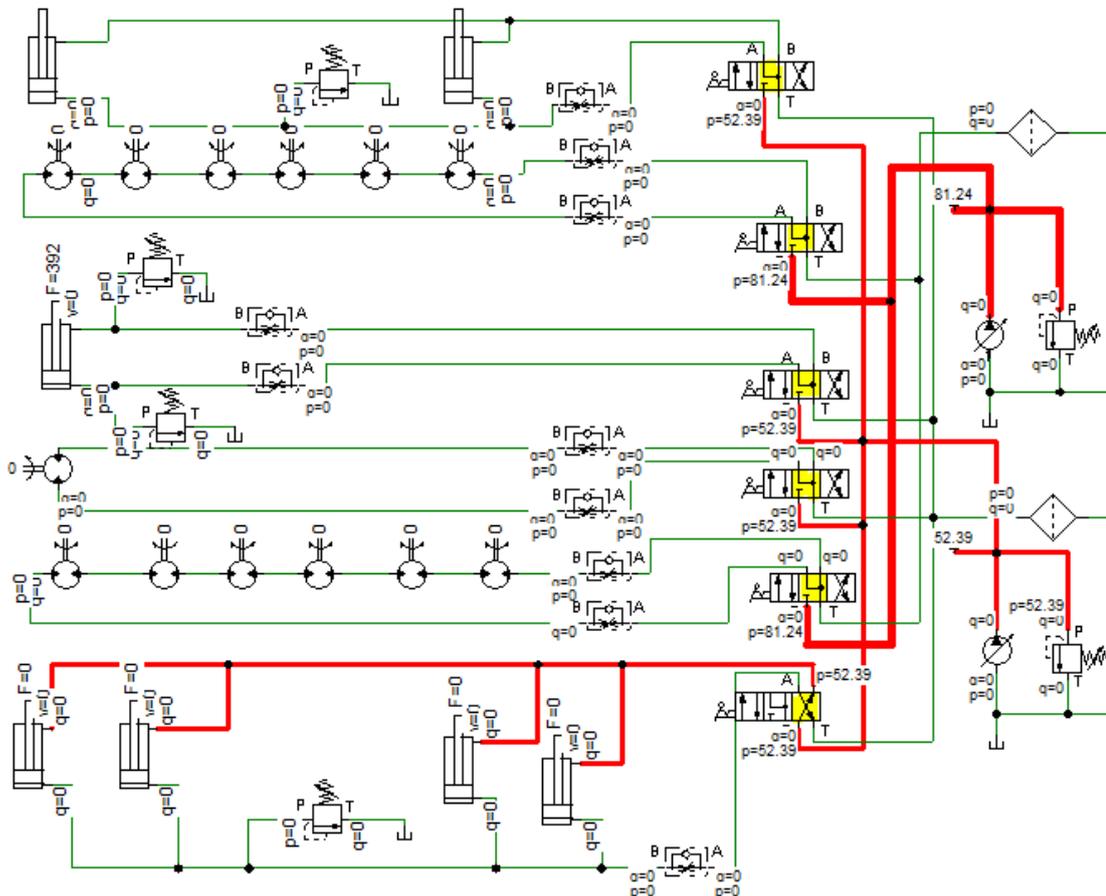


Figura 107. Retroceso finalizado.

Selección del centro de VD1

Como se ve en la Figura 108, si desde la posición de la Figura 103, el operario posicionara VD1 en su posición normal, los pistones empezarían a retroceder por el peso de la barra. Es por esto que se propone un centro como el mostrado la Figura 109, ya que en la misma situación, los cilindros no se mueven. Además, cuando los cilindros vuelven a su posición original, este centro permite que el sistema no quede presurizado.

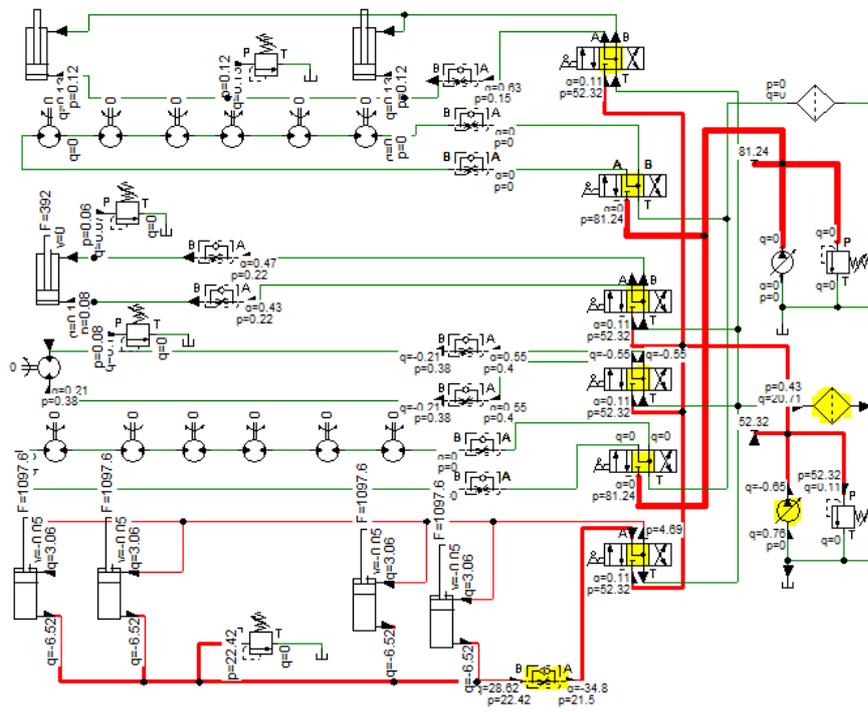


Figura 108. Selección centro VD1.

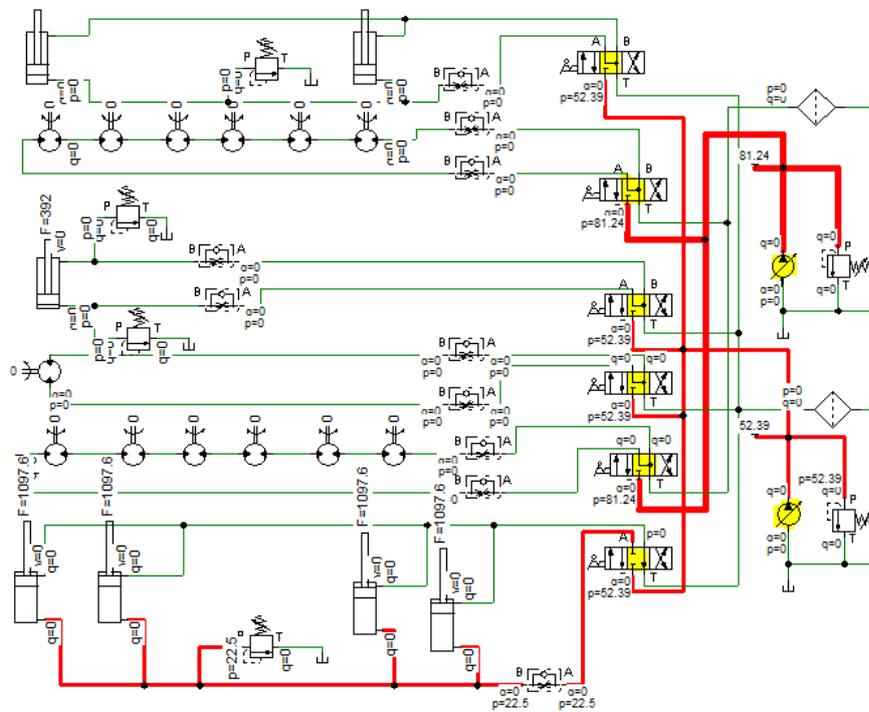


Figura 109. Selección centro VD1.

C.8.3. Funcionamiento del banco de ruedas

Para simular esta situación, se utilizan los valores de torque mostrados en la Tabla 17 y se cargan los parámetros de funcionamiento de cada uno de los motores del banco. La Figura 110 muestra los parámetros correspondientes al motor 1, en los demás solo cambia el valor de torque.

Hidromotor

Desplazamiento	<input type="text" value="0.082"/>	<input type="text" value="l (0.001..5)"/>
Rozamiento	<input type="text" value="0.0128"/>	<input type="text" value="N*m*s/rad (0.001..100)"/>
Momento de inercia	<input type="text" value="0.0001"/>	<input type="text" value="kg*m^2 (0.0001..1)"/>
Par externo	<input type="text" value="10.2"/>	<input type="text" value="Nm (-1000..1000)"/>

Figura 110. Motor 1.

Al asignar valores distintos de cero al par externo, el programa toma como si el hidromotor funcionara como bomba. Esto genera que el mismo gire y desplace aceite, como se observa en la Figura 111, a pesar de estar VD2 en su posición central. Los motores desplazan caudal en dirección M1-M6, es decir de derecha a izquierda. Si se posiciona VD2 de manera que el aceite se desplace en sentido inverso, el torque externo de cada motor se transforma en un momento a vencer, que es el caso que se busca simular.

En la Figura 112 se observa que una vez estabilizado el sistema, los motores giran a $100rpm$, el caudal que circula por todos es $8,28l/min$ y el mismo descarga a tanque pasando por F2. La caída de presión es distinta en cada motor y se analiza en la Tabla 19.

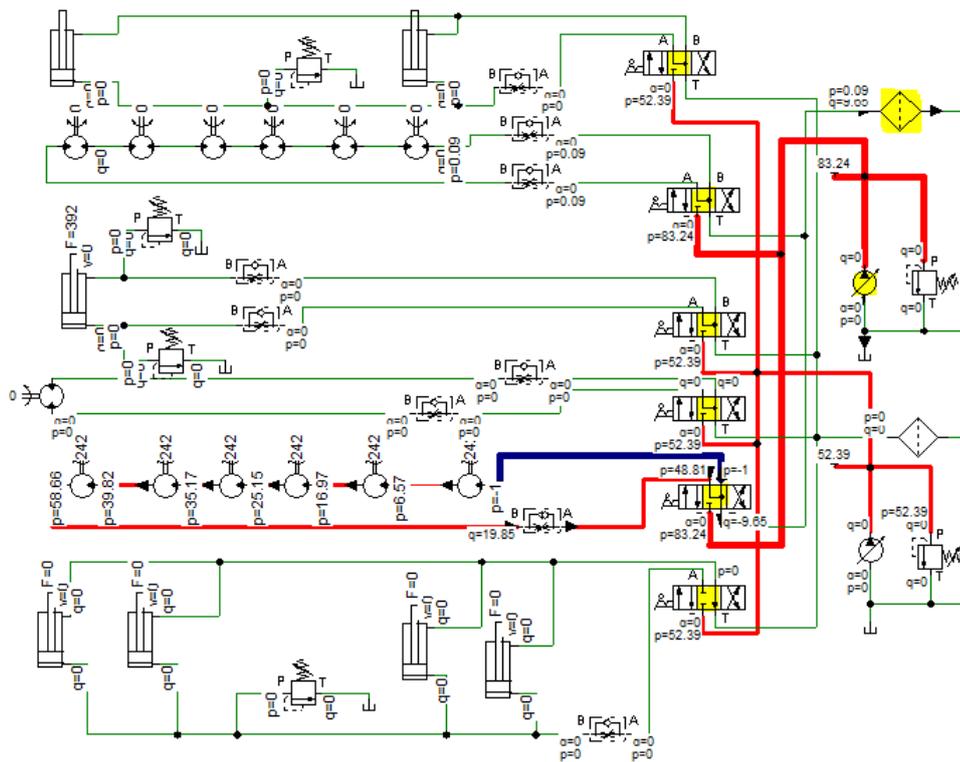


Figura 111. Movimiento de los motores.

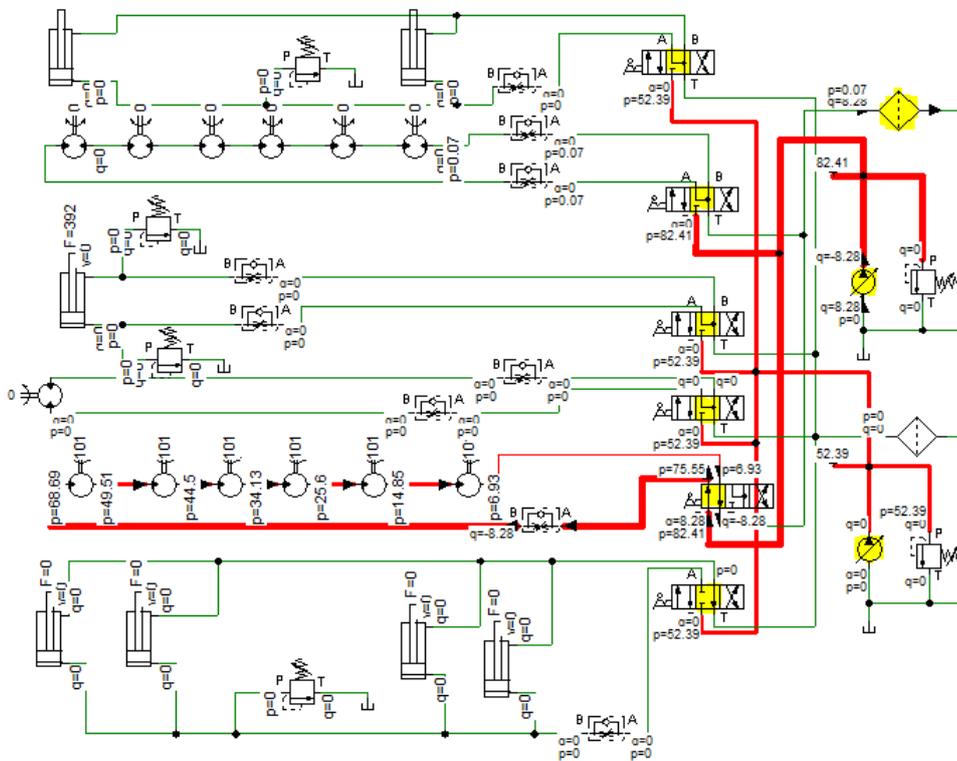


Figura 112. Motores estabilizados.

Tabla 19. Comparación caída de presión en los motores.

Motor	Presión de entrada [bar]	Presión de salida [bar]	ΔP [bar]	$\Delta P_{calculado}$ [bar]	Error relativo [%]
M6	68,69	49,51	19,18	19,11	0,36
M5	49,51	44,5	5,01	4,88	2,59
M4	44,5	34,13	10,37	10,27	0,96
M3	34,13	25,6	8,53	8,42	0,01
M2	25,6	14,85	10,75	10,63	1,12
M1	14,85	6,93	7,92	7,79	1,64

Se observa que el mayor error relativo entre el valor del programa y el calculado es de un 2,59% por lo que la situación establecida es aceptable respecto a la que se espera en operación.

Como se ve en la Figura 112 se ha eliminado VQ3 de la simulación debido a que, como esta situación solo puede ser simulada en un sentido, no cumple ninguna función.

En sentido inverso se espera que el funcionamiento sea análogo. El flujo circulará de M1 a M6 (de derecha a izquierda) y las caídas de presión serán iguales a las mostradas en la Tabla 20.

Tabla 20. Caída de presión en los motores en funcionamiento inverso.

Motor	Presión de entrada [bar]	Presión de salida [bar]	ΔP [bar]
M1	68,69	60,77	7,92
M2	60,77	50,02	10,75
M3	50,02	41,49	8,53
M4	41,49	31,12	10,37
M5	31,12	26,11	5,01
M6	26,11	6,93	19,18

Ambos bancos funcionando en simultáneo

En el proceso lógico de funcionamiento de la máquina, no se espera que ambos bancos funcionen en simultáneo. Si por error se accionará VD2 y VD5 el funcionamiento sería el ilustrado en la Figura 113. No habría problemas de presión ya que ambos bancos están conectados en paralelo, pero el caudal no sería suficiente para que ambos giren a la velocidad deseada. Se observa que el banco correspondiente a VD2 gira a menor velocidad, esto se debe a que a estos motores se les asignó un par externo distinto de cero, a diferencia de los motores del otro banco.

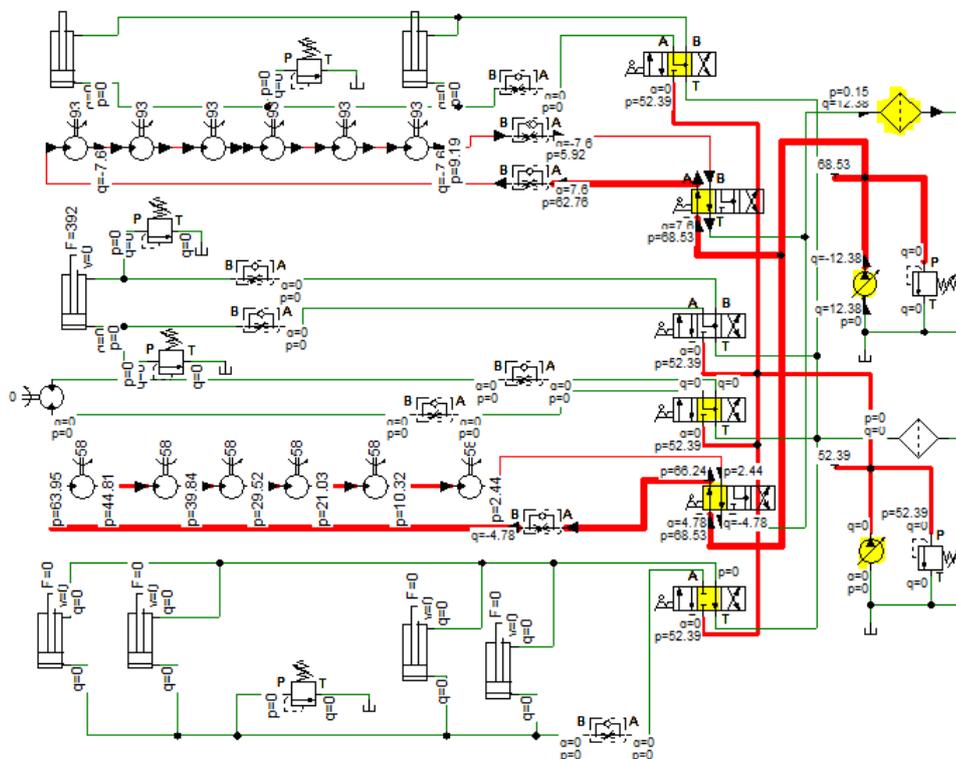


Figura 113. Ambos bancos funcionando en simultáneo.

Las Figuras 114, 115, 116 y 117 muestran el funcionamiento de ambos bancos en forma independiente. Todos los motores tienen par externo nulo por lo que las caídas de presión no son representativas del sistema real.

En la Figura 118 se observa que cuando ambos bancos están en funcionamiento, el caudal erogado por B2 no alcanza para hacer girar los motores a 100rpm . El caudal se reparte en partes iguales en cada banco y todos los motores giran a menos rpm (en este caso 76rpm).

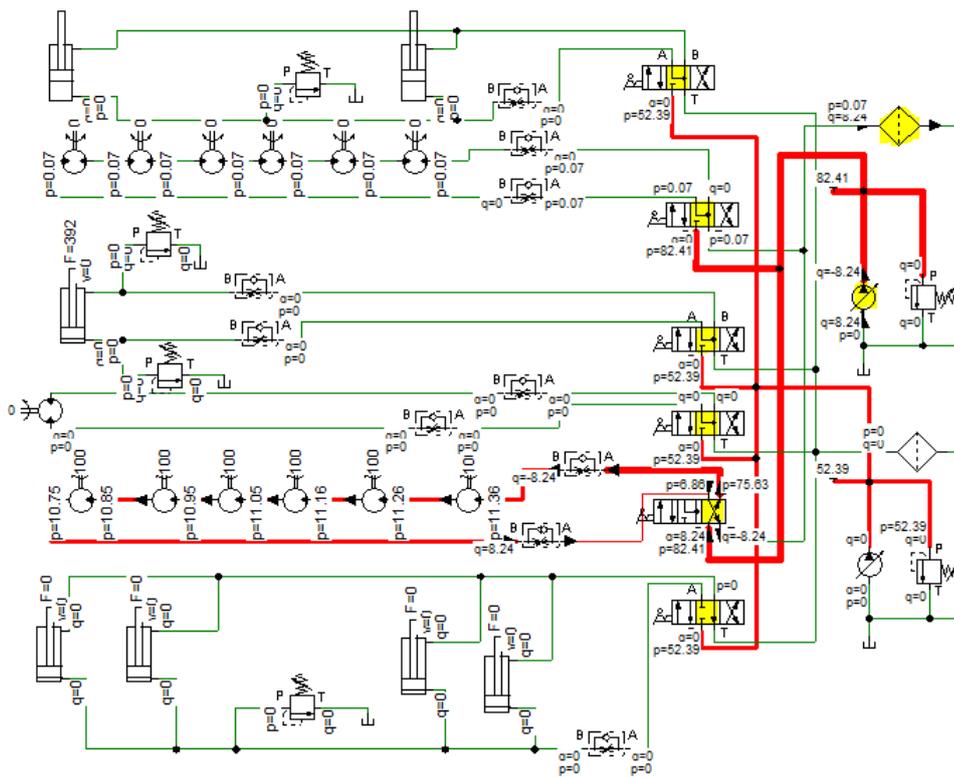


Figura 116. Ambos bancos funcionando en simultáneo.

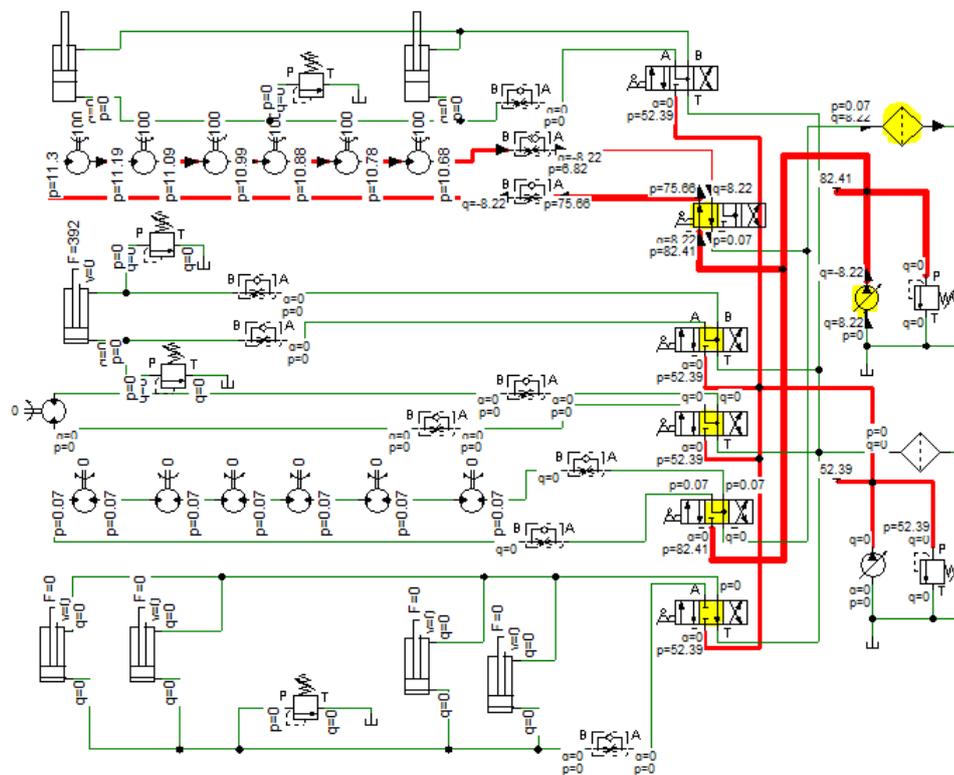


Figura 117. Ambos bancos funcionando en simultáneo.

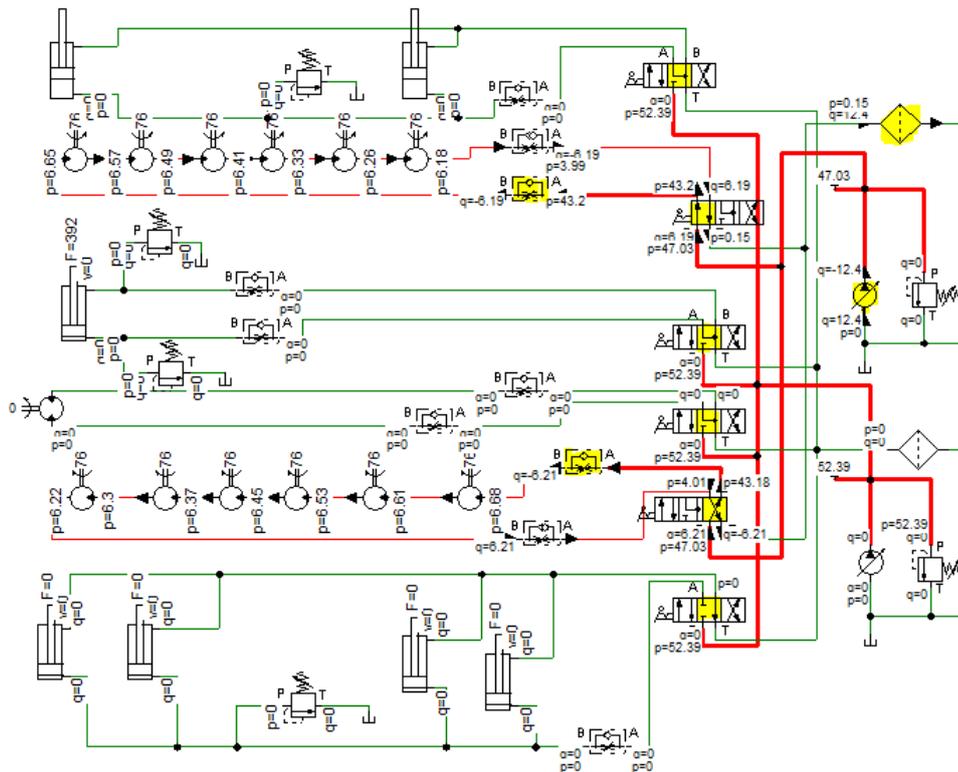


Figura 118. Ambos bancos funcionando en simultáneo.

El único inconveniente sería que los motores girarían a menor velocidad por lo que la barra avanzaría más lento. El operario debería estar atento a esta anomalía y cerrar la válvula direccional VD2 o VD5, según corresponda.

C.8.4. Funcionamiento del motor del cepillo MC

Los parámetros de este motor se han seleccionado acorde a C.3 y son los ilustrados en la Figura 119.

Hidromotor		
Desplazamiento	0.00357	l (0.001..5)
Rozamiento	0.00128	N*m*s/rad (0.001..100)
Momento de inercia	0.0001	kg*m ² (0.0001..1)
Par externo	0	Nm (-1000..1000)

Figura 119. Motor del cepillo.

En la Figura 120 se observa que al abrir VD3, B1 comienza a erogar caudal hacia MC. En VQ4 el caudal es reducido para que MC trabaje a las revoluciones requeridas.

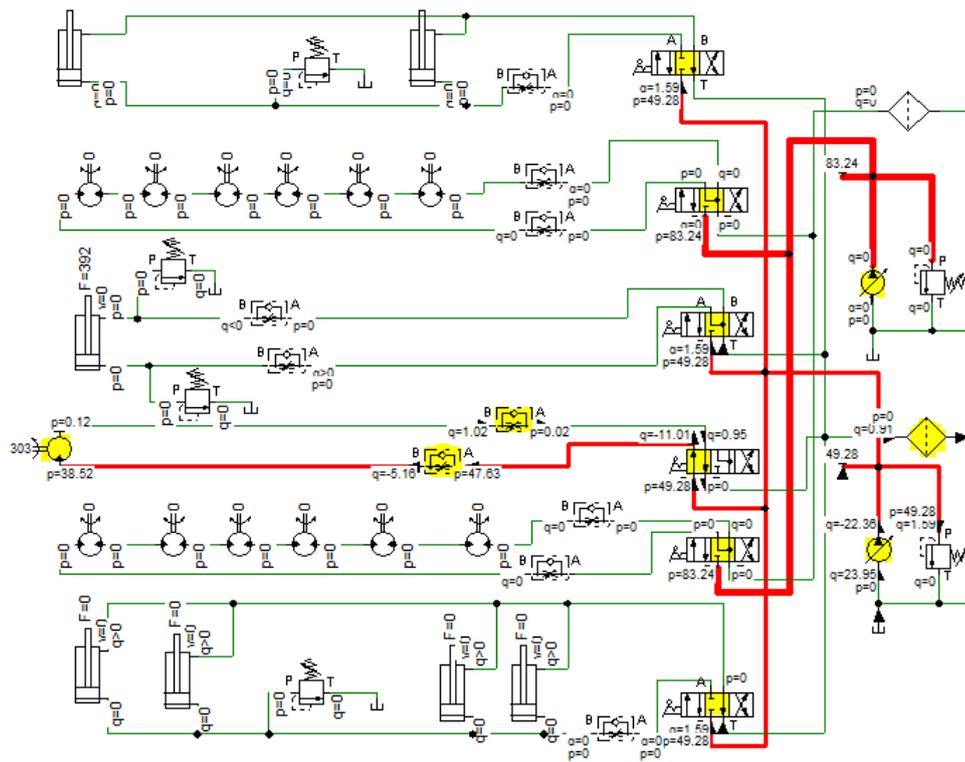


Figura 120. Apertura VD3.

La Figura 121 muestra que cuando el sistema se estabiliza, el motor MC gira a 4500rpm , el caudal que circula por el circuito es de 16l/min y el mismo es eliminado por F1.

El funcionamiento en sentido inverso es análogo y se muestra en la Figura 122.

C.8.5. Funcionamiento MC y C5

La configuración y parámetros del cilindro C5 son los descritos en las Figuras 95 y 96. Lo que cambia es el perfil de la fuerza (Figura 123) acorde a C.2.2.

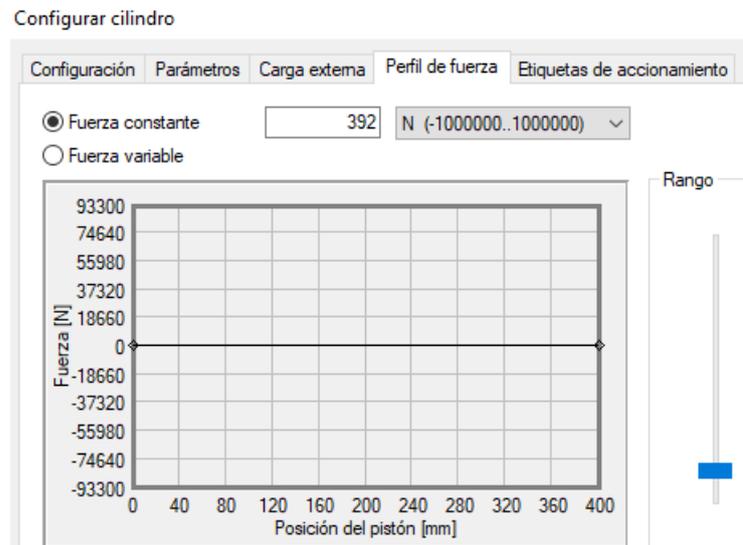


Figura 123. Perfil de fuerza C5.

Los parámetros de las válvulas limitadoras de presión VP4 y VP5 se muestran en las Figura 124 y 125 respectivamente.

Se seleccionó el mismo centro para VD4 que el utilizado en VD1.

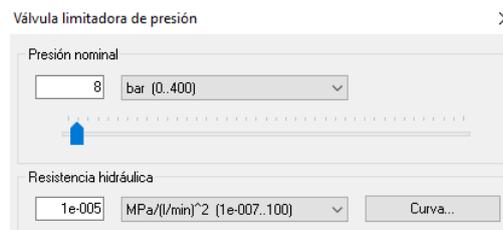


Figura 124. VP4.

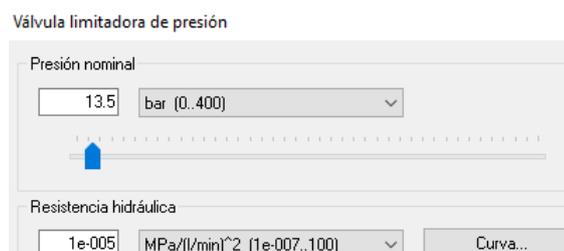


Figura 125. VP5.

Avance C5

Al abrir VD4 (ver Figura 126) se observa que B1 aumenta el caudal y comienza a erogar hacia C5. En esta situación se observa que MC gira a menor velocidad respecto a su funcionamiento normal.

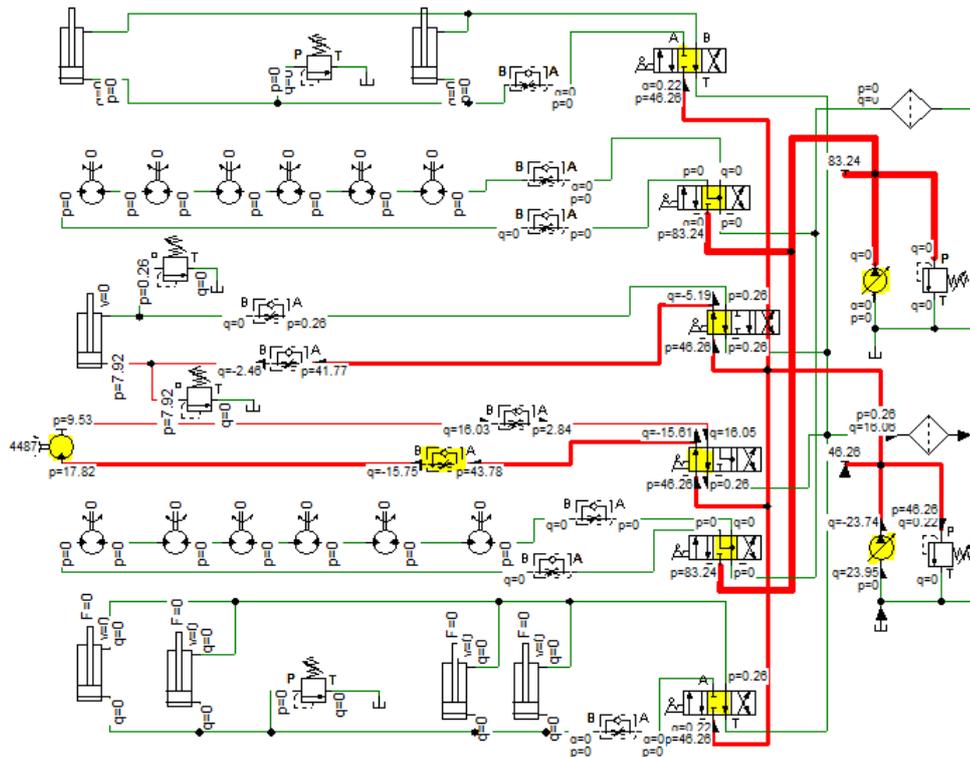


Figura 126. Avance C5.

En la Figura 127 se observa que la válvula limitadora de presión VP4 mantiene una presión constante en el cilindro de 8,34bar. Esto genera que parte del caudal erogado hacia esta rama sea eliminado por esta válvula (en la imagen se ve que 2,48l/min son descargados a tanque). La presión en el cilindro alcanza para hacer avanzar el mismo.

En la Figura 128 se observa que cuando el cilindro alcanza su máxima extensión, la presión se mantiene constante y los 4l/min de esta rama son eliminados por VP4.

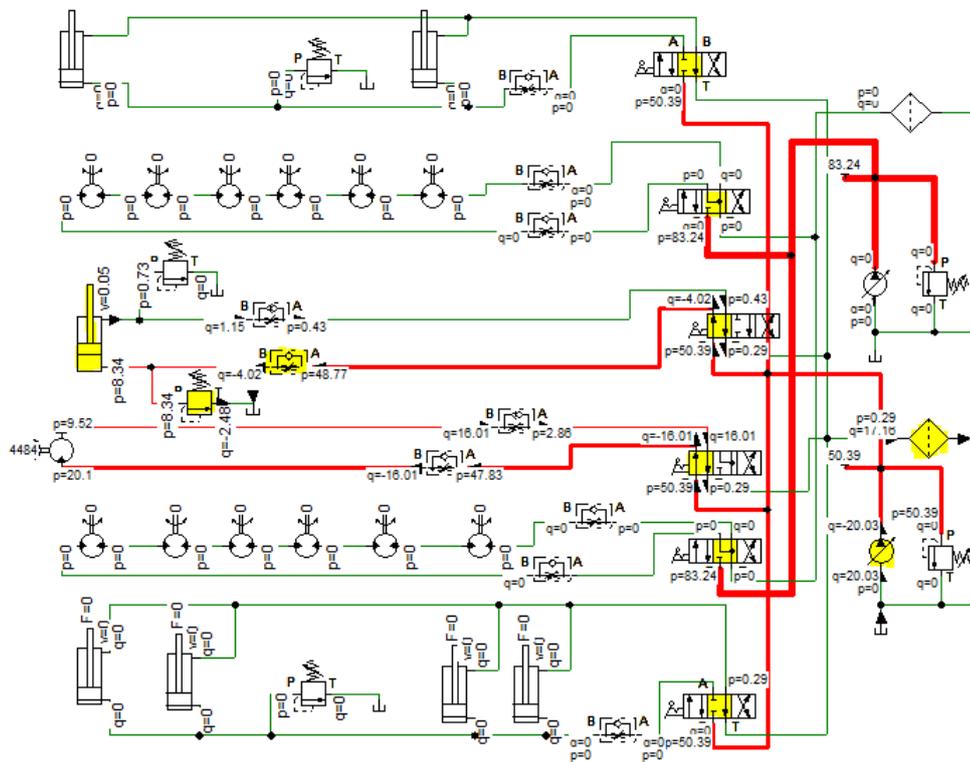


Figura 127. Avance C5.

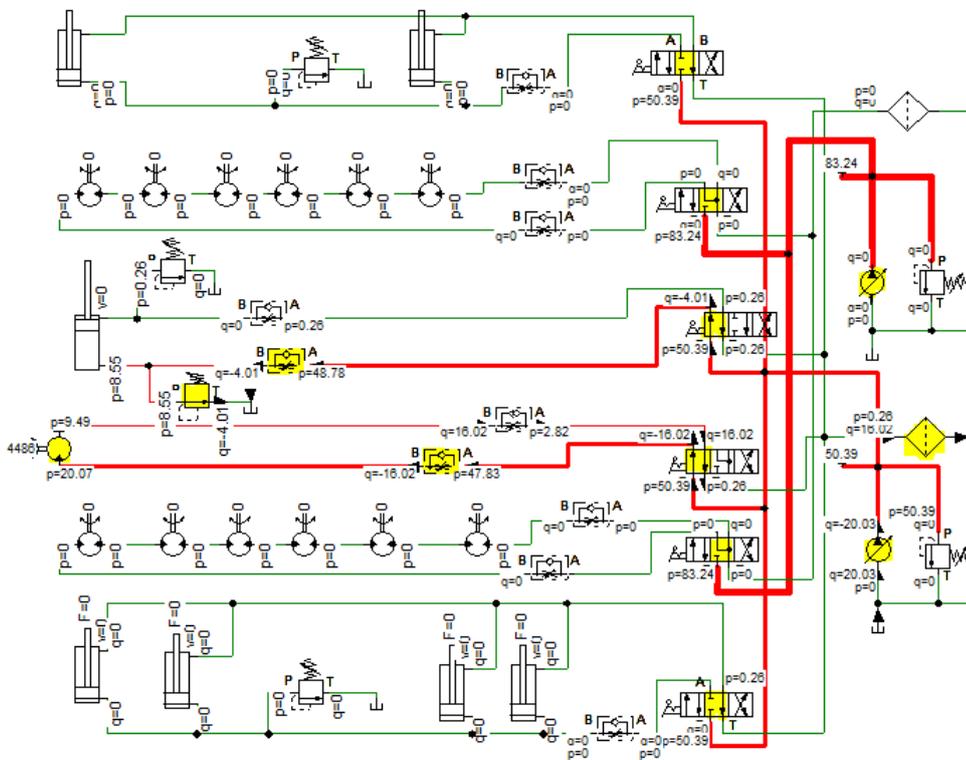


Figura 128. Máxima extensión C5.

Funcionamiento sin VP4

Al eliminar VP4 y abrir VD4 el funcionamiento es el ilustrado en la Figura 129. La diferencia principal respecto a la Figura 127 es que C5 avanza a mayor velocidad debido a que el caudal no puede derivarse.

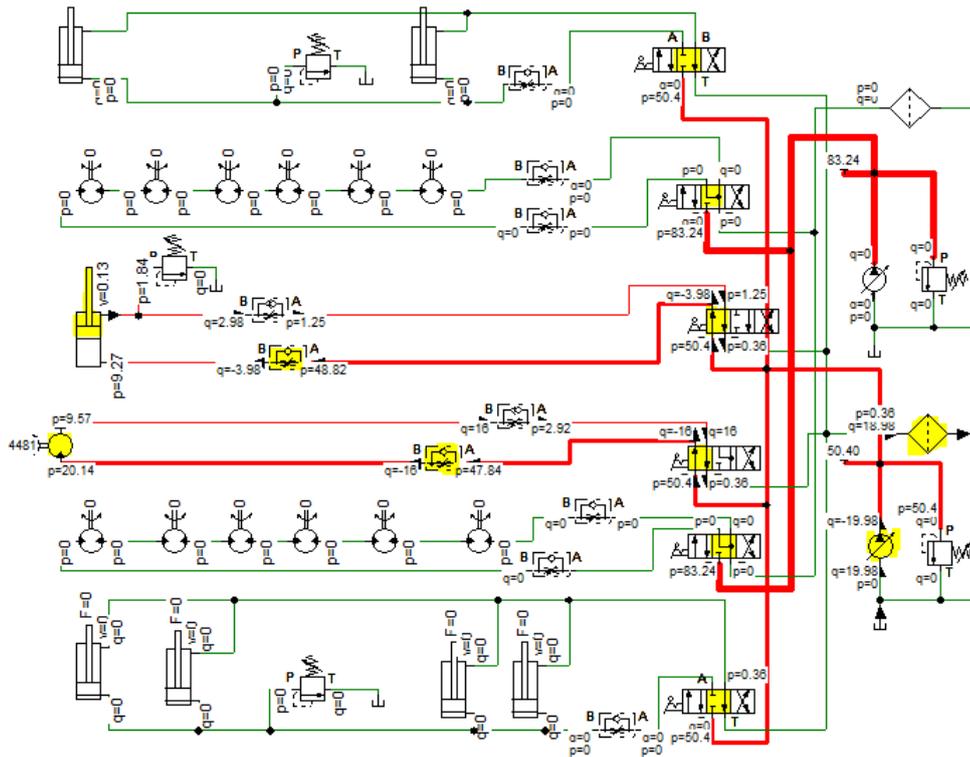


Figura 129. Funcionamiento sin VP4.

En la Figura 130 se observa que cuando C5 llega al final de su carrera la presión se incrementa hasta el valor seteado en B1. El caudal erogado es solo el necesario para MC.

Dado que el funcionamiento sin VP4 es correcto, se decide eliminar esta válvula del sistema.

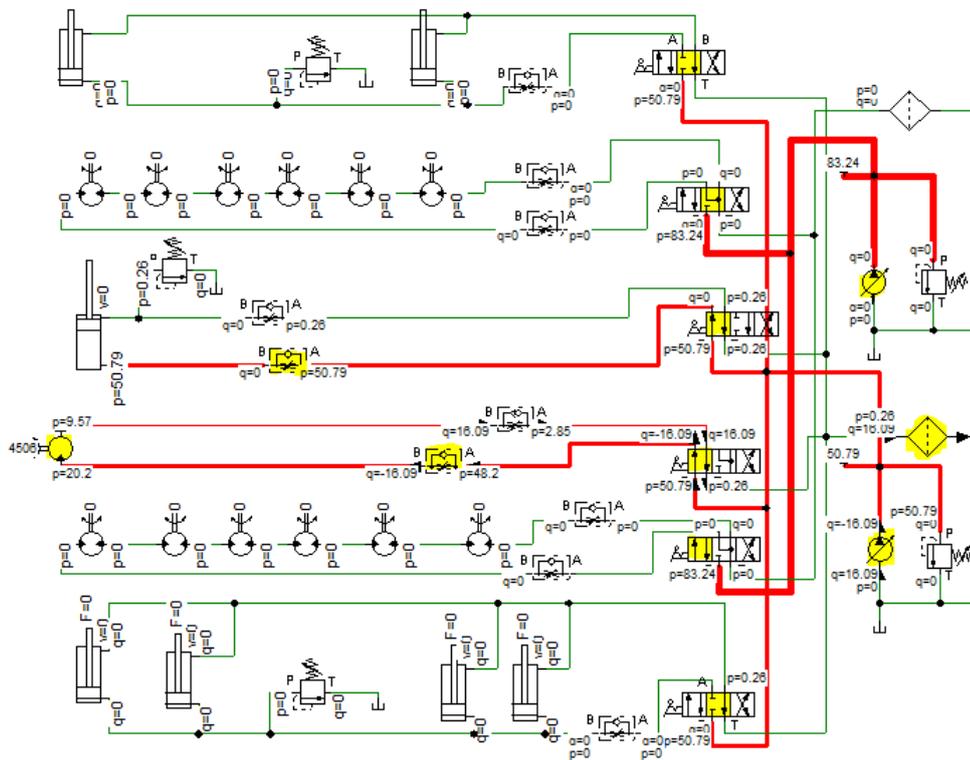


Figura 130. Funcionamiento sin VP4.

Retroceso de C5

El perfil de la fuerza en esta situación cambia. Al entrar en contacto el cepillo y la barra, el cilindro se encuentra con una restricción. Para simular esta situación se cambia el perfil de la fuerza al ilustrado en la Figura 131.

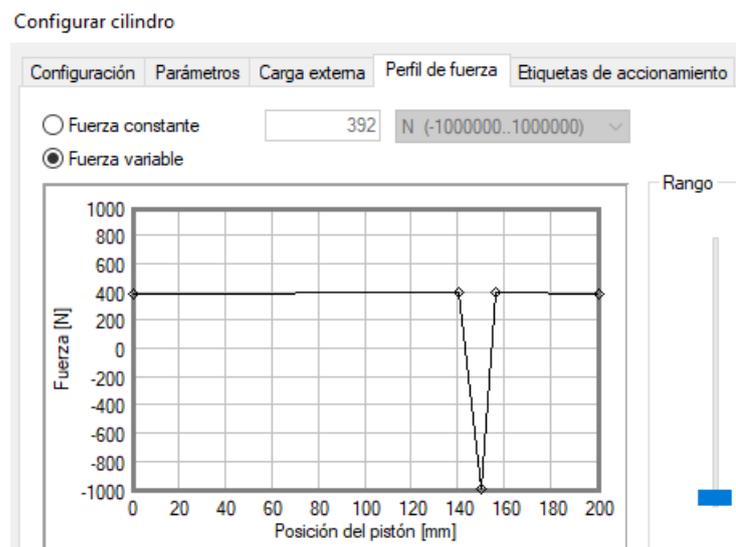


Figura 131. Perfil de fuerza en retroceso.

Al cambiar la posición de VD4, B1 comienza a erogar mayor cantidad de caudal y la rama que contiene a VQ7 eleva su presión. VP5 mantiene la presión constante. Ver Figura 132.

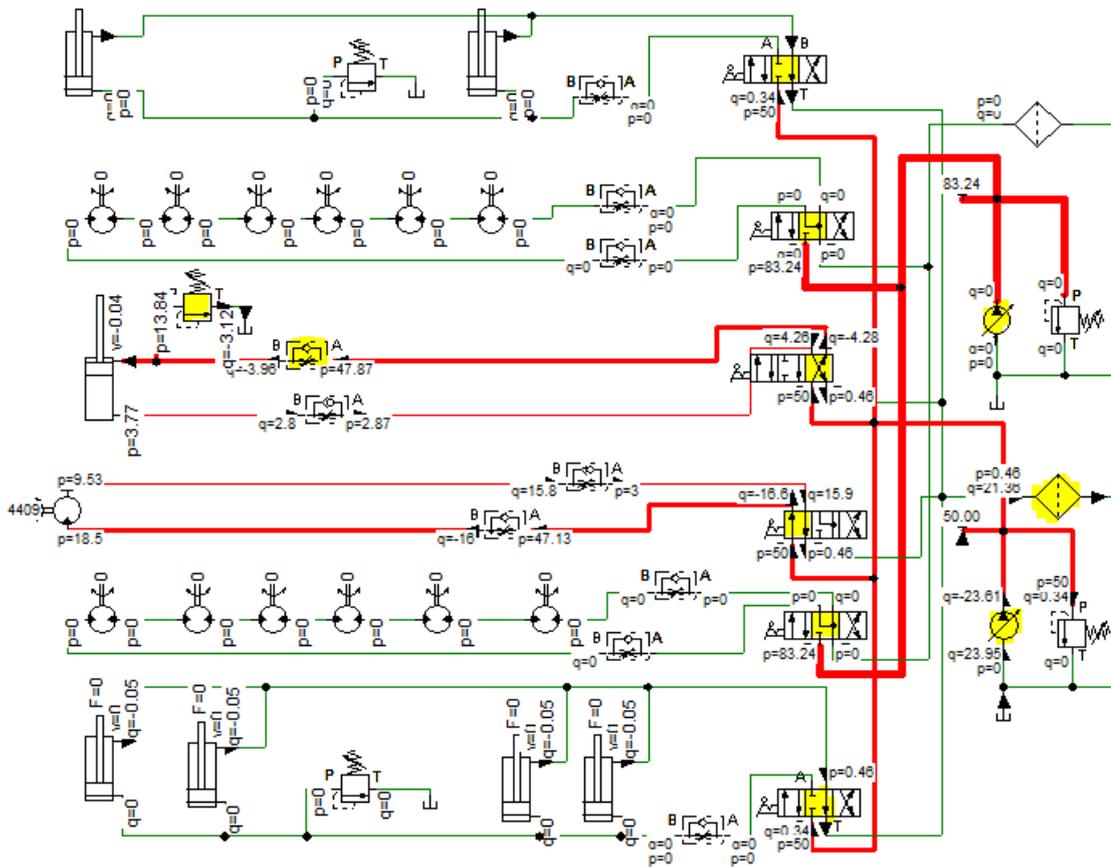


Figura 132. Retroceso C5.

En la Figura 133 se ve que cuando se restringe el retroceso de C5, la presión se eleva hasta el valor establecido en VP5. B1 eroga en esta situación 20 l/min (16 l/min para MC y 4 l/min para C5).

Cuando la barra termina de pasar, la fuerza sobre el cilindro vuelve a tener una configuración como la de la Figura 123. Cuando esto sucede, el cilindro continua su retroceso hasta llegar a la posición ilustrada en la Figura 134.

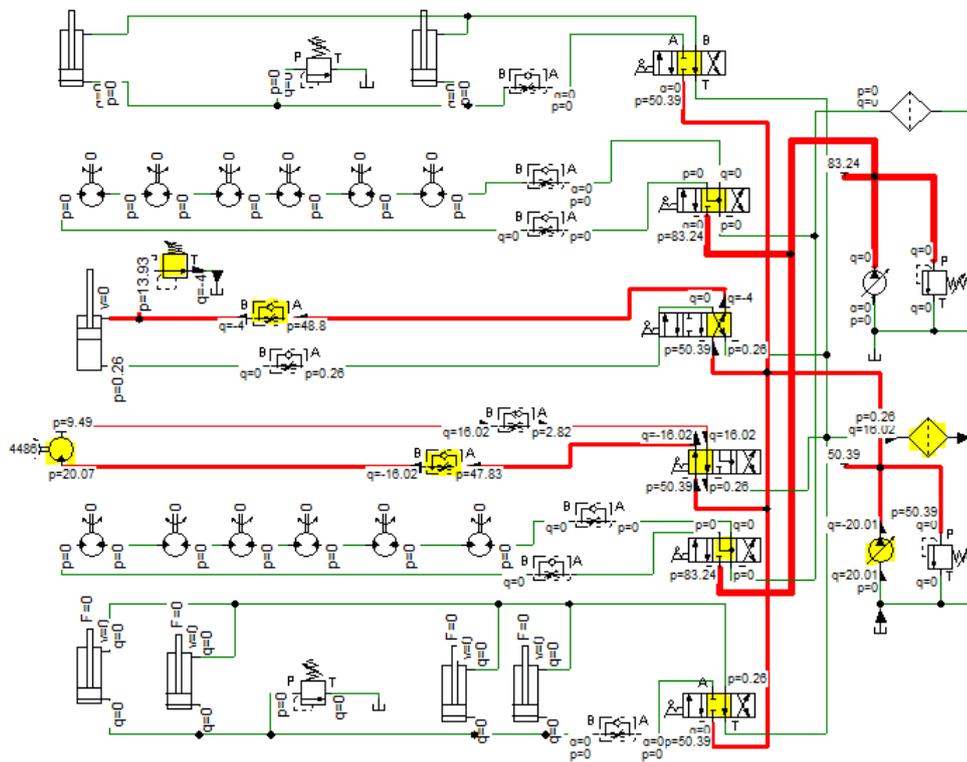


Figura 133. Retrosceso C5.

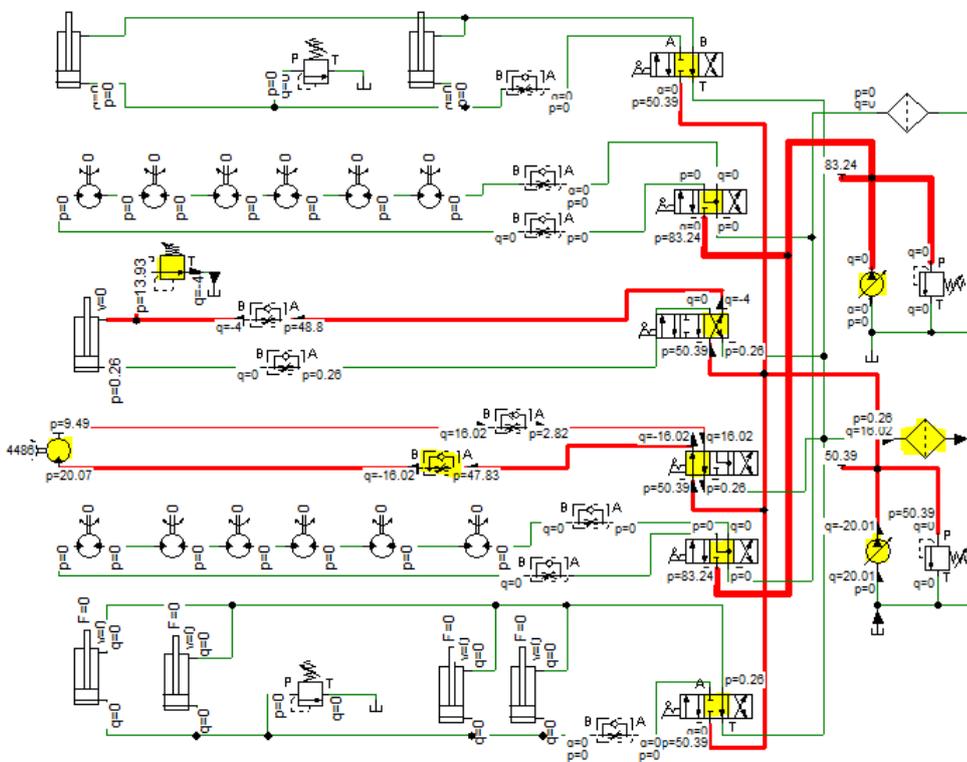


Figura 134. Retrosceso C5.

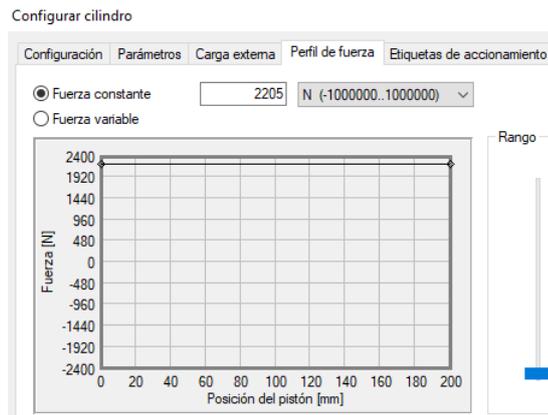


Figura 136. Perfil de fuerza.

Al abrir VD6, B1 comienza a erogar caudal hacia los cilindros C6 y C7. La presión comienza a elevarse pero no supera el valor seteado en VP6. Ver Figura 137.

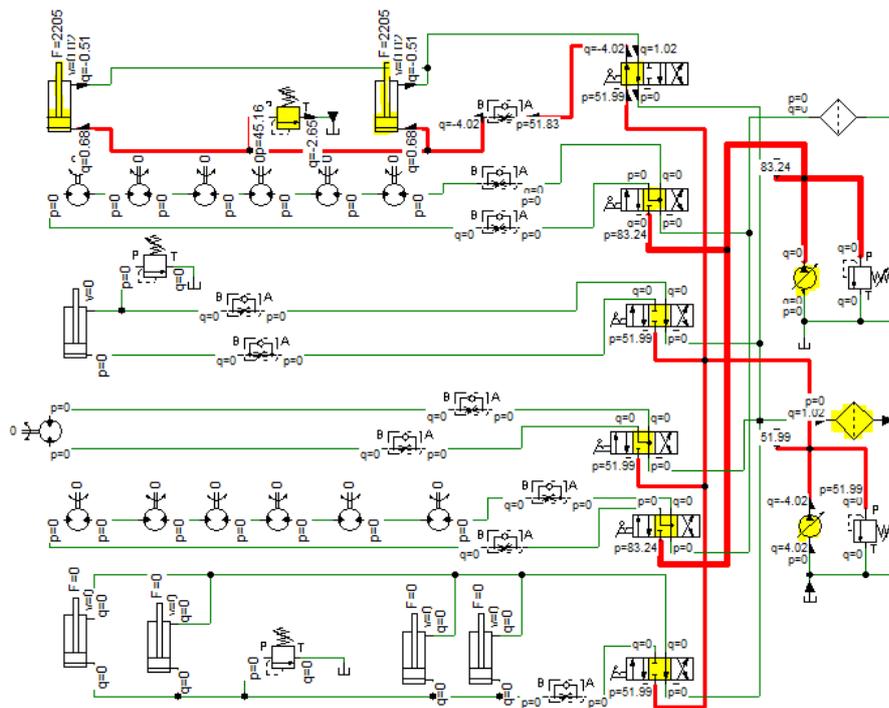


Figura 137. Apertura VD6.

La Figura 138 muestra a C6 y C7 avanzando. Se decide incorporar una válvula divisora de caudal (VDQ2) tal como se muestra en la Figura 43. La Figura 139 muestra a C6 y C7 completamente extendidos. La presión se mantiene constante a 45bar y el caudal erogado por B1 es derivado a tanque por VP6. La barra rodará hacia los caballetes y el retroceso de los cilindros será sin carga.

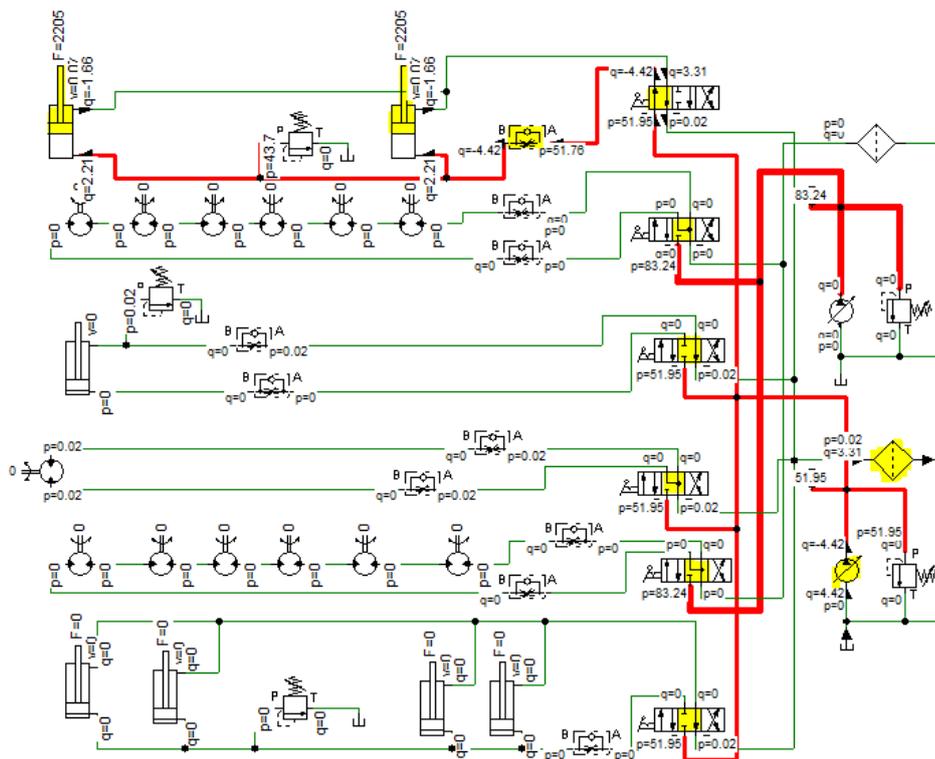


Figura 138. Avance C6 y C7.

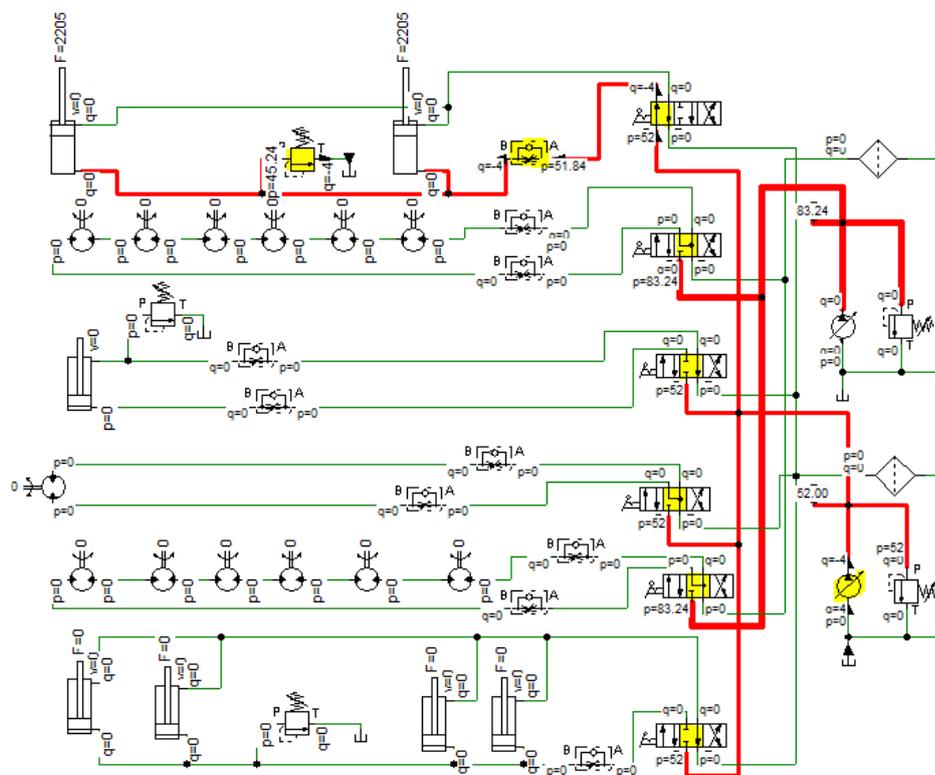


Figura 139. Máxima extensión C6 y C7.

Retroceso

Para esta situación se selecciona una fuerza nula como se muestra en la Figura 140.

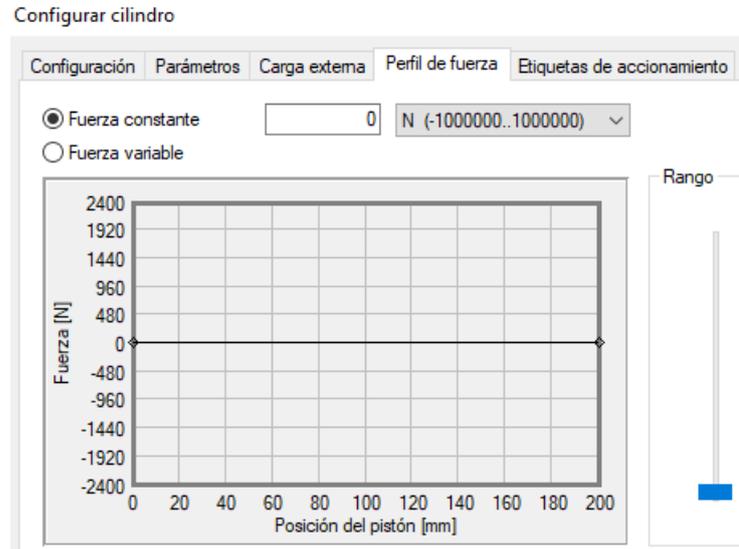


Figura 140. Perfil de fuerza en retroceso.

Al cambiar la posición de VD6, el resultado es el ilustrado en la Figura 141.

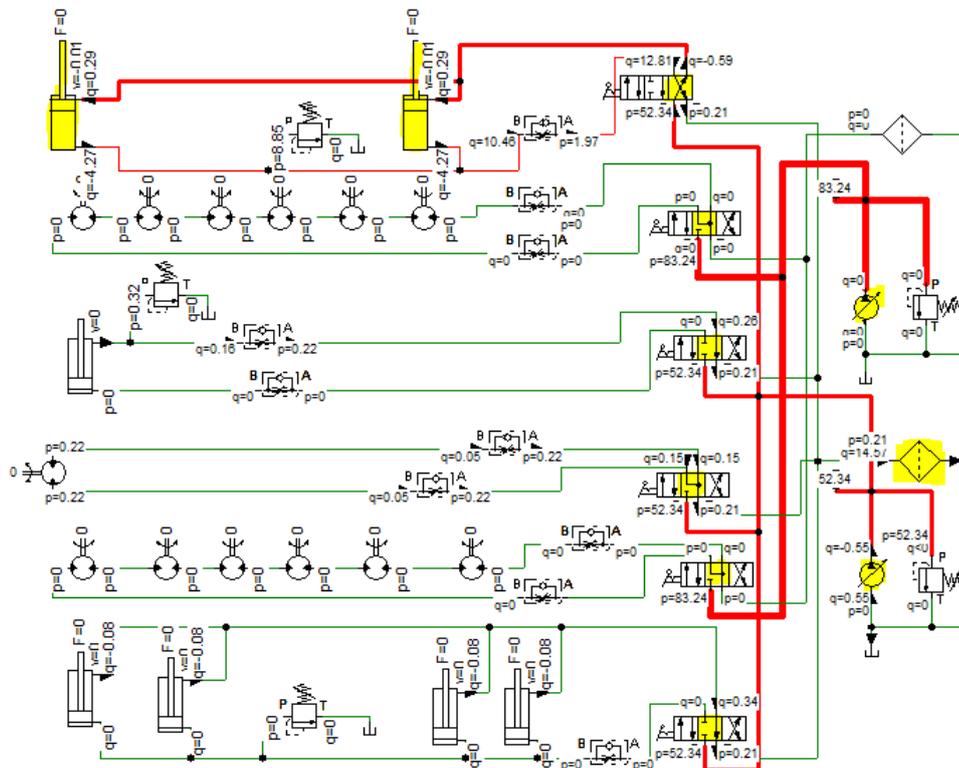


Figura 141. Retroceso.

