



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS DE EXTRACCIÓN DE INCHANCABLES EN
MAQUETA DE CHANCADOR PRIMARIO

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO

RODRIGO ESTEBAN RAMOS TRONCOSO

PROFESOR GUÍA:
RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
LEONEL NÚÑEZ LAZO
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ

SANTIAGO DE CHILE
2018

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: RODRIGO ESTEBAN RAMOS TRONCOSO
FECHA: 2018
PROF. GUÍA: RUBÉN FERNÁNDEZ URRUTIA

EVALUACIÓN DE DISPOSITIVOS DE EXTRACCIÓN DE INCHANCABLES EN MAQUETA DE CHANCADOR PRIMARIO

La minería subterránea presenta varios problemas operacionales que limitan la capacidad de procesamiento de mineral. Uno de estos es el manejo de elementos inchancables metálicos, los que producen atollos en los chancadores primarios, ocasionando largas paradas de planta que repercuten aguas abajo en la producción de cobre.

Una solución para este problema está actualmente en desarrollo en las oficinas de Codelco-Tech, en el marco del proyecto 18-17 nombrado “Sistema integrado de detección y extracción de inchancables en chancador primario” Este proyecto busca encontrar un método para la detección temprana de los inchancables, además de idear un sistema de remoción del material indeseado antes de que este produzca atollos en la máquina.

Considerando el subsistema de extracción, CodelcoTech ha desarrollado varios dispositivos de extracción los que serán puestos a prueba mediante el método de Diseño de Experimentos. El uso de este método espera reducir el tiempo necesario en la toma de pruebas y así encontrar una solución de extracción óptima en un tiempo acotado. Además, con este método se pueden manipular los experimentos y factores que se tomarán en cuenta para obtener un resultado válido luego de haber realizado el análisis adecuado.

Mediante la metodología de Diseño de Experimentos se puede medir el entrenamiento del operario, debido a que se presume que el efecto de esta covariable sea influyente en el resultado experimental. Por esto, se plantea un entrenamiento práctico para obtener conocimiento acerca del funcionamiento del sistema.

Posteriormente se realizaron las pruebas definitivas y luego de esto, se tabularon los resultados obtenidos y se entregó una recomendación acerca de que método de extracción es el más adecuado de utilizar en un prototipo de validación industrial a escala real.

Se logró discernir que diseño de cada dispositivo era el más efectivo frente a cada situación de extracción. A partir de las pruebas mencionadas anteriormente se concluyó que el segundo diseño del *Dispositivo 1* en conjunto con el primer diseño del *Dispositivo 2* son los que tienen mejor rendimiento frente a todos los candidatos.

Agradecimientos

Me gustaría agradecer a todas las personas que me han ayudado durante este largo periodo de estudios, pasando por bachi y llegando a Beauchef, donde un día como hoy termina una gran travesía que comenzó con sólo un consejo de un gran amigo.

Parto agradeciendo a mi familia, a la Sarita y el Danito, que han sido los mejores papás de la vida, siempre estando ahí para todo lo que me he propuesto y logrando siempre motivarme a lograr más. Han sido un apoyo silencioso, constante e incansable. Recuerdo cuando desde chico iba a trabajar con mi viejo al negocio y lo bien que lo pasaba aprendiendo de los fierros, quizás en el fondo por eso terminé acá en el DIMEC. A mi hermana de la vida, la Dani, que ha sido por lejos uno de los motores de mi vida siendo mi fan número uno. Siempre dispuesta a escuchar y darme consejos profesionales y de vida, a la que siempre he visto como un ejemplo y que lo seguirá siendo.

A Francisco, Ignacio, Javier y Matías, que fueron los grandes amigos que cultivé años atrás y que aún me acompañan hoy en día. Qué juntos hemos vividos grandes transformaciones y hemos crecido a través de los años.

A los Bachiamigos, Joti, Nati, Nine, Seba, Shebín y Dani que han estado siempre ahí aguantándome todas mis correteadas y faltas de tiempo y que nunca han dudado en prestarme una mano. Los cabros son la raja y agradezco haber pasado por bachi y haberlos conocido, haberme hecho su amigo y también agradezco que me hayan hecho cambiar muchas veces mi filosofía de vida.

La Javita se me merece una dedicatoria personal, por ser la BFF que siempre ha sido. Desde que te caíste encima mio en la micro, las conversaciones (buenas y malas) y los carretes han forjado una amistad especial e incondicional. Eres por lejos la mejor consejera y amiga, estos ocho años no habrían sido los mismos sin ti.

Al Nachito, que también se ha transformado en un gran consejero y confidente de mis problemas. Que siempre está dispuesto a apañarme y estar ahí cuando lo necesito. Espero que juntos podamos lograr nuestras metas y nos veamos pronto pero en un lugar distinto.

A los Mecanicabros! Que han hecho mi paso por el DIMEC una experiencia que voy a recordar siempre, desde pasar de largo en el cuarto por máquinas, hasta los asados y paseos mecánicos habituales. Ustedes hacen que la vida en el DIMEC sea re tela y agradezco también haber pasado por aquí con ustedes.

A Yves, Cata, Ana, José, Zaq, Ricardo, Matthijs, Daniel y Marleen, que hicieron mi año en Alemania digno de recordar y que gracias a su buena onda hicieron mi estadía mucho más llevadera. Siempre recordaré los viajes, las risas y las tardes en el parque o en Leonberg.

A mis colegas en CodelcoTech que siempre estuvieron dispuestos a ayudar al pobre memorista en apuros. Que siempre apañaron a los viernes de locos y a los completos. Les agradezco toda la dedicación y motivación para enseñarme el funcionamiento tanto de la empresa como de la vida. Muchas gracias por los consejos y conversaciones diarias. Y muchas gracias por haberme dado la oportunidad de pertenecer a su grupo de trabajo.

Me gustaría también agradecer a mis profesores, Rubén y Leonel, que me apoyaron con este proyecto de memoria un poco menos ortodoxo que lo común. Gracias por los consejos y ayuda durante el proceso de memoria. Gracias por las rápidas gestiones en el proceso de titulación y que me ayudaron a seguir adelante con mis proyectos de vida.

Para finalizar, me gustaría agradecer a Fernando, por haberme dado la oportunidad de participar en el proyecto y haberme elegido como memorista del mismo. Gracias por los consejos y conversaciones, la guía y haberme mostrado las buenas (y malas) prácticas en ingeniería. Gracias por las historias de vida y haber encausado un poco más mi rumbo. Gracias por siempre haber sido tan majadero con las correcciones. Finalmente, gracias por las caipirinhas!

Tabla de Contenido

Introducción	1
1. Antecedentes	4
1.1. Minería y Chancado	4
1.2. Diseño de Experimentos	6
2. Metodología	7
3. Recursos	9
3.1. Maqueta de extracción	9
3.2. Dispositivos disponibles	12
3.2.1. <i>Dispositivo 1</i>	12
3.2.2. <i>Dispositivo 2</i>	13
3.2.3. <i>Dispositivo de protección</i>	13
3.3. Inchancables	13
3.3.1. <i>Software</i>	14
4. Diseño de Experimentos	15
4.1. Conceptos iniciales	15
4.2. Diseño factorial	16
4.3. Diseño factorial fraccional	19
4.4. Solapamiento de factores para un experimento de tres factores y tres niveles	22
4.5. Selección de experimentos	26
4.6. Covariables, perturbaciones y otras variables asociadas	28
5. Experimentos	30
5.1. Experimento 1: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde frente del alimentador	32
5.1.1. Descripción	32
5.1.2. Identificación preliminar de factores	33
5.1.3. Respuestas por medir	34
5.2. Experimento 2: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde el buzón de alimentación	35
5.2.1. Descripción	35
5.2.2. Identificación preliminar de factores	35
5.2.3. Respuestas por medir	37

5.3. Experimento 3: Extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> desde la descarga del alimentador	37
5.3.1. Descripción	37
5.3.2. Identificación preliminar de factores	38
5.3.3. Respuestas por medir	39
6. Simplificación de niveles y factores	40
6.1. Reducción de niveles	40
6.1.1. Tipos de inchancables	40
6.1.2. Ubicación de inchancables	41
6.2. Reducción de factores	43
7. Experimentos preliminares	46
7.1. Experimento preliminar: Selección de ubicación	46
7.1.1. Resultados	46
7.2. Experimento preliminar: Selección de <i>Dispositivo de protección</i>	47
7.2.1. Resultados	47
7.2.2. Análisis	49
8. Resultados	51
8.1. Experimento 1: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> desde frente del alimentador	51
8.1.1. Tiempo de captura y tiempo de traslado	53
8.1.2. Calidad de captura, estabilidad del dispositivo y funcionalidad adicional	56
8.1.3. Análisis	59
8.1.4. Selección de candidato	62
8.2. Experimento 2: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> desde el buzón de alimentación	63
8.2.1. Tiempo de captura y tiempo de traslado	64
8.2.2. Calidad de captura, estabilidad del dispositivo y funcionalidad adicional	68
8.2.3. Análisis	72
8.2.4. Selección de candidato	74
8.3. Experimento 3: Extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> desde la descarga del alimentador	75
8.3.1. Tiempo de instalación, captura y retorno	77
8.3.2. Calidad de captura y estabilidad del dispositivo	77
8.3.3. <i>Funcionalidad adicional 2</i> y <i>Funcionalidad adicional 3</i>	79
8.3.4. Análisis	81
8.3.5. Selección de candidato	82
9. Recomendación	83
9.1. <i>Dispositivo 1</i>	83
9.2. <i>Dispositivo 2</i>	84
9.3. <i>Dispositivo de protección</i>	84
Conclusión	84
Bibliografía	86

10. Anexos	89
10.1. Plan de pruebas: Selección de ubicación	89
10.2. Plan de pruebas: Selección de <i>Dispositivo de protección</i>	90
10.3. Plan de pruebas: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde frente del alimentador	91
10.4. Plan de pruebas: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde buzón de alimentación	92
10.5. Plan de pruebas: Extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> desde la descarga del alimentador	93
10.6. Análisis de varianza:Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde frente del alimentador	94
10.7. Análisis de varianza:Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde buzón de alimentación	95
10.8. Análisis de varianza:Extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> desde la descarga del alimentador	96

Índice de Tablas

2.1.	Resumen de factores y niveles a analizar en los experimentos	8
4.1.	Pruebas a realizar para los experimentos y sus respectivos niveles en cada factor	24
5.1.	Factores iniciales del experimento 1: Extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde frente del alimentador	34
5.2.	Respuestas medibles del experimento 1: extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde frente del alimentador	34
5.3.	Factores iniciales del experimento 2: extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> desde buzón de alimentación	35
5.4.	Respuestas medibles del experimento 2: extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> y <i>Dispositivo de protección</i> desde el buzón de alimentación	37
5.5.	Factores iniciales del experimento 3: extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> en la caída del alimentador	39
5.6.	Respuestas medibles del experimento 3: extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> desde la descarga del alimentador	39
6.1.	Ficha experimental de selección de ubicación	43
6.2.	Ficha experimental para selección del <i>Dispositivo de protección</i>	45
7.1.	Datos obtenidos para los tiempos de maniobra del <i>Dispositivo 1</i> frente a los distintos <i>Dispositivos de protección</i>	48
7.2.	Análisis de varianza para el experimento preliminar de selección de <i>Dispositivo de protección</i>	50
8.1.	Ficha descriptiva para experimento 1 para la extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> desde frente del alimentador	51
8.2.	Desempeño para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i>	62
8.3.	Ficha descriptiva para experimento 2 para la extracción mediante <i>Dispositivo 1</i> desde el buzón de alimentación	63
8.4.	Promedios de tiempo de captura para cada diseño de <i>Dispositivo 1</i>	65
8.5.	Promedios de tiempo de traslado para cada diseño de <i>Dispositivo 1</i>	67
8.6.	Escala de tiempo y puntuación para los tiempos de captura y traslado	74
8.7.	Desempeño para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i>	75
8.8.	Ficha descriptiva para experimento 3 para la extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> desde la descarga del alimentador	76
8.9.	Tiempo de instalación, captura y retorno para el <i>Dispositivo 2</i>	77

9.1. Resumen del desempeño para los <i>Dispositivos 1</i>	83
---------------------------------------------------------------------	----

Índice de Ilustraciones

1.1.	Chancador primario de cono [21]	5
1.2.	Foto de inchancables retirados manualmente en la planta	5
3.1.	Planta de chancado primario de colón alto y su respectiva representación en maqueta 1:10	10
3.2.	Diagrama de proceso [19]	11
3.3.	Entorno de maqueta de extracción	12
3.4.	Algunos inchancables disponibles para la maqueta	14
4.1.	Experimento de dos factores y dos niveles con la respuesta en cada esquina del gráfico [11]	17
4.2.	Combinación de tratamientos en un diseño 3^3 [20]	18
4.3.	Tabla de generadores de acuerdo con el número de pruebas[11]	21
4.4.	Ambos posibles generadores para un diseño fraccional 2^3 [20]	21
4.5.	Representación de un experimento con tres factores y tres niveles por factor [20]	23
4.6.	Representación gráfica de los bloques posibles señalando el bloque a utilizar [20]	24
4.7.	Representación del universo de pruebas	26
4.8.	Pruebas de selección inicial	27
4.9.	Purebas de selección final	28
5.1.	División esquemática de pruebas a realizar	31
5.2.	Posición del brazo hidráulico en maqueta virtual.	33
5.3.	Esquema de ubicación dentro del buzón	36
5.4.	Representación del experimento de extracción mediante <i>Dispositivo 2</i> de captura en la descarga del alimentador en maqueta virtual.	38
6.1.	Gráfico de tiempo real de detención anual de acuerdo con el tipo de residuo sólido. [2]	41
6.2.	Esquema del buzón de extracción	42
7.1.	Gráfico de distribución de la caída de inchancables dentro del buzón de alimentación	47
7.2.	Gráfico de tiempos de maniobra del <i>Dispositivo 1</i> con respecto a cada <i>Dispositivo de protección</i>	49
8.1.	Tiempo de captura promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i>	54
8.2.	Tiempo de captura promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i> considerando la interacción con el tipo de inchancable	55

8.3.	Tiempo de captura promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i> considerando la interacción con la ubicación del inchan cable dentro del alimentador	56
8.4.	Calidad de captura promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i>	57
8.5.	Estabilidad promedio del dispositivo para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i>	58
8.6.	Porcentaje de captura promedio para cada diseño del <i>dispositivo 1</i>	59
8.7.	Porcentaje de captura para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i> considerando la interacción con el tipo de inchan cable capturado	60
8.8.	Porcentaje de captura para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i> considerando la interacción con la ubicación del inchan cable capturado	61
8.9.	Promedio de tiempo de captura para cada diseño del <i>Dispositivo 1</i>	65
8.10.	Tiempo de captura para cada diseño de <i>Dispositivo 1</i> considerando su interacción con cada tipo de inchan cable	66
8.11.	Tiempo de traslado a la posición inicial para cada diseño de <i>Dispositivo 1</i> considerando la interacción con los inchan cables	68
8.12.	Calidad de captura para cada diseño de <i>Dispositivo 1</i>	69
8.13.	Estabilidad de cada diseño de <i>Dispositivo 1</i> en el proceso de extracción	70
8.14.	Funcionalidad adicional de cada diseño de <i>Dispositivo 1</i>	71
8.15.	Tiempo de traslado considerando la interacción entre la ubicación del inchan cable y el diseño del <i>Dispositivo 1</i>	72
8.16.	Tiempo de captura considerando la interacción entre la ubicación del inchan cable y el diseño del <i>Dispositivo 1</i>	73
8.17.	Calidad de captura promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 2</i>	78
8.18.	Estabilidad del dispositivo para cada diseño del <i>Dispositivo 2</i>	79
8.19.	Funcionalidad adicional 2 promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 2</i>	80
8.20.	Funcionalidad adicional 3 promedio para cada diseño del <i>Dispositivo 2</i>	81

Introducción

Motivación

En la actualidad se pueden distinguir dos tipos generales de explotación minera, en rajo abierto o en subterránea. Esta última se caracteriza porque requiere una gran cantidad de obras civiles para su fortificación principalmente por seguridad. Esto conlleva a un alto uso de materiales metálicos como planchas, mallas, vigas y chocret.

Por otra parte, en el proceso de explotación y tronaduras, estas fortificaciones metálicas son destruidas consecutivamente a medida que se avanza en la explotación del nivel mina. Luego, continuando con el procesamiento del material, este es llevado a la planta de chancado primario como parte del mineral a procesar, donde llega una mezcla de mineral y elementos metálicos destruidos.

Cuando los elementos metálicos de gran tamaño entran al chancador primario, producen la detención estrepitosa de este, donde el proceso manual de remoción de estos inchancables conlleva a un valioso tiempo de producción perdido, además de afectar negativamente a la confiabilidad de este sector de la planta, y ralentizando el proceso aguas abajo de la producción de cobre.

La solución al problema mencionado anteriormente es lo que busca el proyecto 18-17 de CodelcoTech, filial de innovación de Codelco. Actualmente, dicho proyecto denominado “Sistema integrado de detección y extracción de inchancables metálicos en chancador primario” se encuentra en su fase de prueba, donde el subsistema de detección se encuentra ad- portas de ser validado en un ambiente industrial, mientras que el subsistema de extracción aún está en fase experimental en una maqueta 1:10 en el laboratorio de la misma empresa.

En la etapa experimental, el subsistema de extracción cuenta con una variedad de dispositivos, como el *Dispositivo 1*, *Dispositivo 2* y *Dispositivo de protección* [8], denominaciones asignadas con el fin de resguardar la confidencialidad e integridad del diseño, que han sido concebidos con el objetivo de encontrar la solución óptima al problema de extracción de los inchancables. Estos diseños y métodos de extracción deberán ser sometidos a pruebas experimentales donde se espera utilizar la metodología de Diseño de Experimentos para optimizar este proceso.

Los experimentos se aplican a prácticamente todos los aspectos de la industria o la ciencia con el fin de descubrir, analizar u optimizar algo en particular de algún proceso o sistema.

Cada experimento realizado es una serie de pruebas a la cual se le realizan cambios en las variables de entrada, para posteriormente observar una respuesta de salida.

El proceso de experimentación consiste en la formulación, el diseño, implementación y posterior análisis de una serie de pruebas realizadas a un determinado sistema. El concepto principal recae en idear un procedimiento robusto que sea capaz de entregar una respuesta estable frente a los posibles cambios en las variables de entrada. [20]

Objetivos

Objetivo general

Entregar una recomendación de diseño de un método de extracción de inchancable metálicos, para ser utilizado en el prototipo de validación industrial en la planta de chancado primario de colón alto.

Objetivos específicos

- Evaluar métodos dentro del Diseño de Experimentos aplicables a las pruebas experimentales.
- Definir plan de pruebas de experimentación.
- Llevar a cabo las pruebas cumpliendo la rigurosidad del método.
- Analizar opciones viables y determinar su efectividad.

Alcances

El trabajo de título se enmarca en el proyecto 18-17 denominado “Sistema integrado de detección y extracción de inchancables” donde se cuenta a priori con tres diseños del *Dispositivo 1*, tres diseños *Dispositivo 2* y tres diseños del *Dispositivo de protección*, denominación igualmente usada por confidencialidad, donde este último cubrirá el alimentador del chancador primario.

El trabajo incluye la investigación de la metodología de Diseño de Experimentos para adecuar la técnica al contexto del proyecto antes nombrado. Además, se realiza una adaptación general para un modelo de tres niveles y tres factores para cada experimento.

El trabajo de memoria incluye igualmente la realización de experimentos preliminar para discernir que variables son menos influyentes en el proceso experimental, por lo tanto, descartables. A partir de lo anterior se incluye la realización de tres experimentos correspondiente a tres situaciones posibles utilizando los dispositivos disponibles.

Finalmente, se realiza un análisis cualitativo y cuantitativo de los resultados de los experimentos para lograr determinar el desempeño de cada dispositivo en los experimentos planteados para entregar una recomendación para su posterior utilización en un prototipo de validación industrial.

Capítulo 1

Antecedentes

1.1. Minería y Chancado

La minería subterránea es el proceso de extracción de mineral que se realiza por debajo de la superficie de la corteza terrestre. Generalmente, este tipo de minería se realiza cuando la extracción a cielo abierto no es viable debido a la profundidad de mineral, regulación ambiental, etc.

Los métodos más empleados son mediante la construcción de túneles y pilares, corte y relleno, sublevel stopping, block caving, panel caving, entre otros. Este último, panel caving, se basa en la extracción mediante la fuerza de gravedad y consiste en dividir el sector a explotar en paneles, que se quiebran secuencialmente mediante explosivos. Posteriormente, al ya haber sido fragmentado, estos caen a un nivel inferior denominado nivel producción, en donde son retirados mediante cargadores LHD (*Load Haul Dump*) y son enviados mediante piques y/o galerías al nivel de transporte, desde donde son llevadas al proceso de chancado.



Figura 1.1: Chancador primario de cono [21]

El siguiente proceso en la línea de producción es el chancado, este se realiza para disminuir el tamaño de las rocas mineralizadas, las cuales se trituran mediante chancadores y molinos. En el caso del chancador primario, generalmente se utiliza trituradores de cono, donde se tienen dos superficies cónicas invertidas, la exterior que está fija y la interior que es móvil gira excéntricamente de acuerdo con un eje de rotación diferente con respecto al de la superficie exterior. En este proceso, usualmente el material P80 se reduce a unas 8 pulgadas de diámetro. En la Figura 1.1 se muestra un chancador primario donde la alimentación se produce por la parte superior y se descarga por su parte inferior a través de la apertura entre el cono móvil y la carcasa. [18]



Figura 1.2: Foto de inchantables retirados manualmente en la planta

En este proceso de chancado primario es donde se producen atollos debido a materiales inchantables (ver Figura 1.2) los que llegan a la planta de chancado mezclados con el material.

1.2. Diseño de Experimentos

Inicialmente los diseños factoriales comenzaron a utilizarse en el siglo XIX principalmente por biólogos e individuos relacionados con la agricultura. Posteriormente, en 1926 Ronald Fisher investigó que los diseños factoriales, que hasta ese momento eran considerados complejos, eran en cambio más eficientes que realizando el estudio con el cambio de un factor a la vez. Estos diseños factoriales, se basan en el cambio dinámico de los factores, es decir, analizar distintos escenarios expuestos a distintas condiciones de acuerdo con ciertos factores, donde la permutación de estas variables entrega información más completa con respecto a la interacción, entre otros. A pesar de esto, los diseños factoriales presentan la desventaja con respecto a las técnicas actuales, debido a que involucran un gran número de pruebas a realizar.

Por otra parte, el Diseño de Experimentos engloba un set de métodos y técnicas experimentales que han sido concebidos a través de la historia y que posteriormente fueron recopiladas dentro de un método unificado capaz de entregar herramientas para distintos contextos experimentales. Dentro de este método, se encuentra el diseño factorial, que tiene la capacidad de realizar un análisis acabado del sistema debido a que este utiliza todas las combinaciones posibles de pruebas. Por otra parte, el diseño fraccional factorial es capaz de reducir la carga de trabajo, a cambio de la introducción de errores y el solapamiento de efectos.

Finalmente, se tienen otros métodos más actuales como el diseño de Plackett-Burman y Taguchi, que permiten una reducción extrema de pruebas a realizar, pero ambos se caracterizan por ser aplicables a experimentos con variables continuas y sólo dos niveles por factor respectivamente.

A partir de lo anterior, se considera más apropiado para el objetivo de estas pruebas el uso del método factorial fraccional, debido a que tiene la capacidad de entregar más libertad al experimentador, para lograr realizar una optimización considerable en el número de pruebas y también es posible implementarlo con variables categóricas y con niveles no homogéneos para cada factor. [1]

Capítulo 2

Metodología

En primer lugar, se realizará un estudio bibliográfico del método de Diseño de Experimentos, con esto se espera encontrar una forma de reducir la cantidad de pruebas definidas inicialmente por CodelcoTech. [9]

Luego de analizar las variables involucradas en el experimento se espera adquirir experiencia previa con la maqueta de extracción. Para esto, se contempla un periodo de entrenamiento para familiarizarse con el mecanismo de funcionamiento de la maqueta de extracción y los dispositivos de extracción disponibles.

La maqueta de extracción en escala 1:10 ha sido construida para homologar el proceso productivo en el chancador primario de Colón Alto. Esta maqueta está mecanizada y tiene comandos hidráulicos para ser operada manualmente por algún operario. Para esto se ha definido un circuito de recirculación de mineral que consta principalmente de 5 elementos:

1. Tolva de traspaso
2. Alimentador (Correa transportadora 1)
3. Buzón de alimentación
4. Correa transportadora (2)
5. Elevador de capachos

El mineral se almacena en la tolva de traspaso, que es llevado mediante el alimentador al buzón de alimentación, que corresponde al área en donde se realizan los experimentos. Posteriormente, el mineral cae mediante un chute de descarga (que está dispuesto en la posición del chancador) a una cinta transportadora ubicada en la parte inferior del buzón, esta cinta se encarga de llevar el mineral al elevador de capachos que sube nuevamente el material a la tolva de traspaso para reiniciar la circulación del cuarzo.[4]

Por otra parte, se define un tiempo de diseño de pruebas iniciales y la realización de estas, con el fin de documentar la experiencia previa y también analizar posibles problemas como los efectos de las covariables y perturbaciones presentes.

Para analizar adecuadamente el experimento, se han definido los factores presentes a

tomar en cuenta en los experimentos. En primer lugar, el factor “Diseño” para el *Dispositivo 1*, *Dispositivo 2* y *Dispositivo de protección*, los que en los tres casos están presentes en tres niveles Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3. Luego se tiene el factor “Inchancable” que está presente en cinco niveles Viga, Malla, Plancha, Riel, Cañería y el factor “Ubicación” que tiene 4 niveles {Sobre mineral, Bajo mineral, Costado izquierdo apron, Costado derecho *apron*}.[9] Aparte de estos factores, también se considerará la covariable “Aprendizaje” que será de ayuda para evitar que la curva de aprendizaje del operario con la máquina afecte a los experimentos.

Tabla 2.1: Resumen de factores y niveles a analizar en los experimentos

Factor	Niveles
Diseño <i>Dispositivo 1</i>	{Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
Diseño <i>Dispositivo 2</i>	{Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
Diseño <i>Dispositivo de protección</i>	{Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
Ubicación	{Sobre mineral, Bajo mineral, Costado derecho del apron, Costado izquierdo del apron}
Inchancable	{Viga, Malla, Riel, Cañería, Plancha}

Luego, se definirá un plan de pruebas de acuerdo con la revisión bibliográfica, es decir, una cantidad limitada de pruebas que sean capaces de mostrar la mayor cantidad de información para su posterior análisis. Además, considerando los factores y problemas antes nombrados. Finalmente, al haber obtenido los datos, se analizarán de forma cuantitativa y cualitativa para determinar que método de extracción es el más adecuado para situación simulada en la maqueta.

Capítulo 3

Recursos

3.1. Maqueta de extracción

El proyecto dentro del cual se desarrolla esta memoria cuenta con una maqueta de extracción a escala 1:10 del chancador primario de colón alto. La planta que representa esta maqueta tiene un chancador primario alimentado por dos *apron feeders* ubicados en paralelo. Por simetría el proceso a escala ha sido construido con solo un alimentador que simula a uno de los *aprons* de la planta como se muestra en la Figura 3.1.

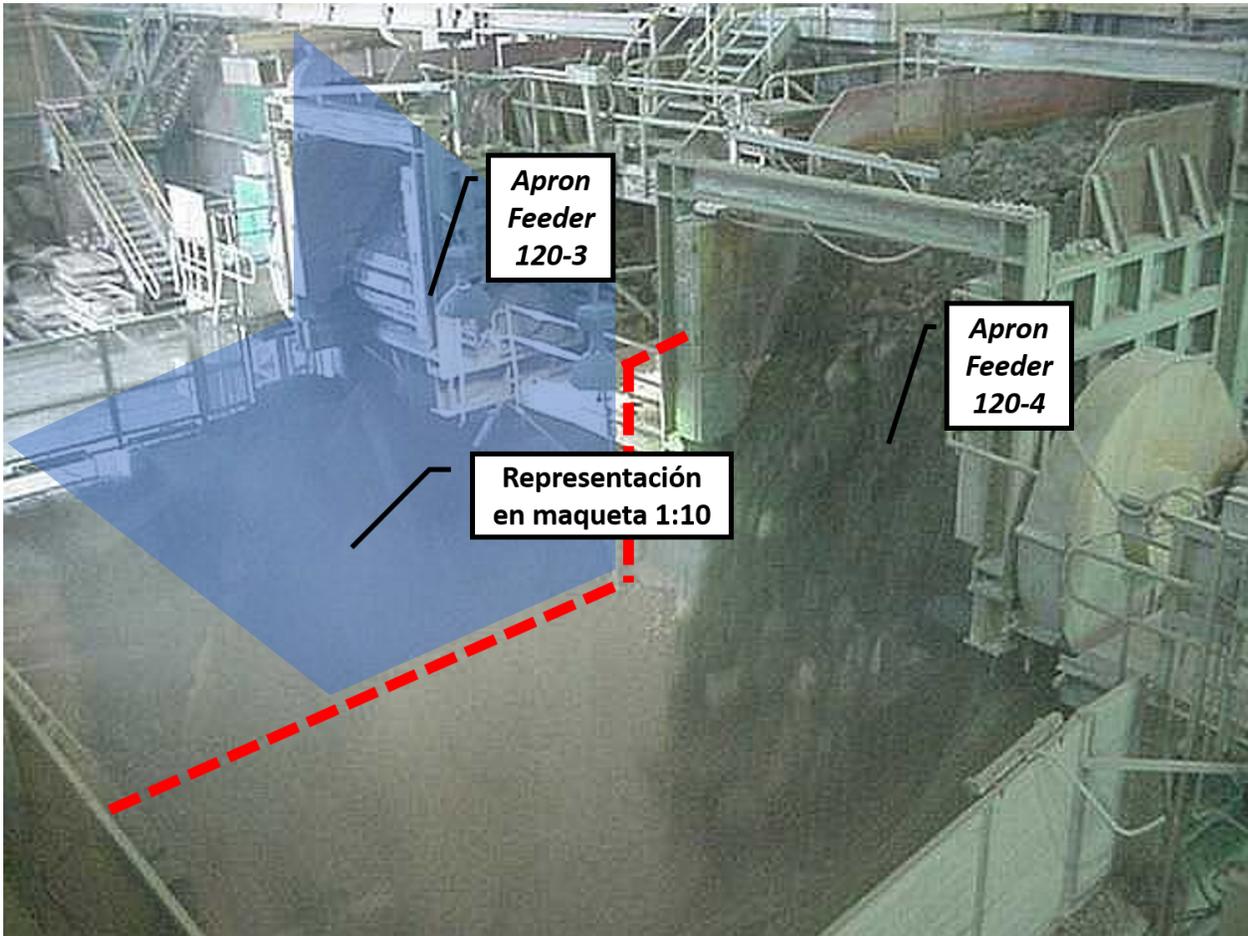


Figura 3.1: Planta de chancado primario de colón alto y su respectiva representación en maqueta 1:10

La maqueta respeta el diagrama de procesos mostrado en la Figura 3.2, que está dividida en dos partes, en rojo se muestra la representación de la planta, que cuenta con cuatro elementos básicos: Un alimentador (CT1) que representa el apron 120-3 de la planta real con velocidad variable (entre 0 m/s y 0,65 m/s); Un brazo hidráulico en conjunto con el *Dispositivo 1* de extracción de acuerdo a las dimensiones de la planta real (por disponibilidad de componentes comerciales el brazo no fue construido a escala, pero cumple con los requisitos de movimiento necesarios cubriendo el 99 % del volumen del buzón de alimentación del chancador, los diseños de *Dispositivo 1* si están escalados a la realidad); Un buzón de alimentación del chancador, el que igualmente tiene dimensiones escaladas a la realidad; y finalmente, un puente grúa, el que tiene una capacidad de 500 kg suficiente para las operaciones que se simularán en la maqueta, considerando que para este equipo el escalamiento es de 1:100 con respecto a la planta real. El chancador está representado por un chute de geometría equivalente, ya que no se requiere la función “chancado” para las pruebas de extracción.

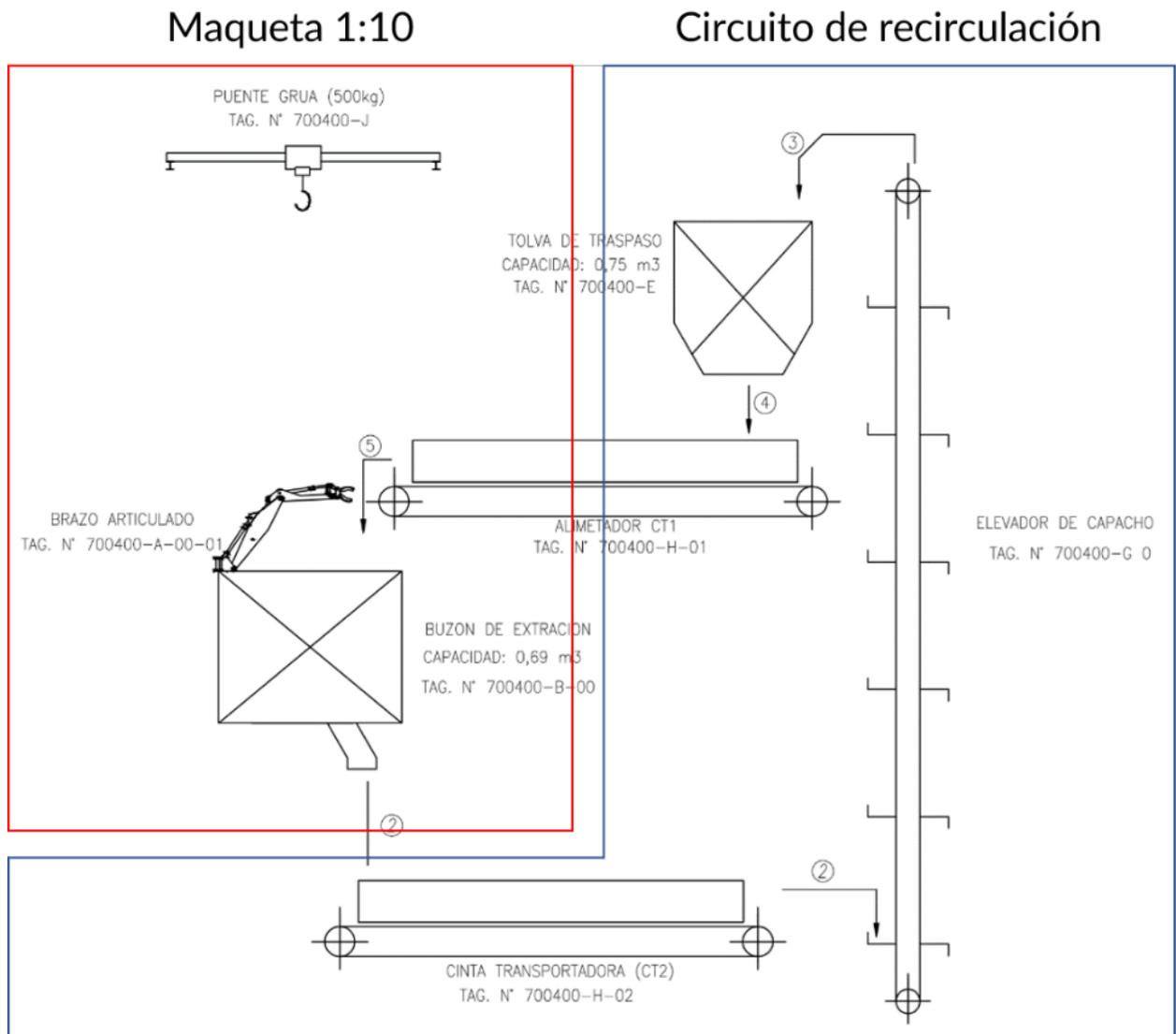


Figura 3.2: Diagrama de proceso [19]

Por otra parte, en azul se representa un circuito de recirculación de material, que se utiliza para facilitar la repetición de las pruebas experimentales, para esto se han definidos varios equipos principales que hacen posible la recirculación del cuarzo, que es utilizado con una granulometría equivalente al presente en la planta. Los tres equipos de este circuito son: una cinta transportadora (CT2) ubicada bajo el buzón de alimentación del chancador; un elevador de capachos que es el encargado de subir el material hacia la tolva de traspaso; y una tolva de traspaso, que es la encargada de almacenar el material para las pruebas y cargar el Alimentador CT1. En la Figura 3.3 se muestra una foto del entorno real de la maqueta de chancado.



Figura 3.3: Entorno de maqueta de extracción

3.2. Dispositivos disponibles

3.2.1. *Dispositivo 1*

Actualmente en la planta se encuentra un brazo hidráulico con un aditamento de pala, el que permite mover el material dentro del buzón de alimentación del chancador. Los tres diseños disponibles del *Dispositivo 1* [12] [13] [14] tendrían la capacidad de acoplarse a este brazo hidráulico, en lugar de la pala y realizar la captura y extracción de inchancales metálicos ya sea desde el buzón o desde el mismo alimentador debido a su capacidad de movimiento.

El *Dispositivo 1* se caracteriza por su capacidad de agarre de los inchancables de forma selectiva, similar a una pinza o garra.

3.2.2. *Dispositivo 2*

Los tres diseños del *Dispositivo 2* [5][6][7] se instala directamente en el alimentador que descarga dentro del buzón del chancador primario, este dispositivo se instala solamente durante la operación de remoción del inchancable, se produce la captura y posteriormente se retira del alimentador.

El *Dispositivo 2* al estar instalado sobre el alimentador actúa como un receptáculo de inchancables el que posteriormente se retira para ser descargado.

3.2.3. *Dispositivo de protección*

El *Dispositivo de protección* corresponde a un elemento que se posiciona por sobre la boca de alimentación del chancador y actúa como una tapa evitando que tanto material como elementos inchancable ingresen al chancador y que produzcan posibles atollos. De este dispositivo igualmente hay tres diseños disponibles.[15]

3.3. Inchancables

Otro recurso que se tiene que considerar es el inchancable disponible para realizar las pruebas. En la Figura 3.4 se muestran tres tipos de inchancables seleccionados con su longitud para su comparación. Estos miden aproximadamente 10x2x2 cm. [3]

Estos inchancables son los que se capturarán en todas las pruebas de extracción que serán definidas en una próxima sección. Se considera una malla, una plancha, una cañería, un riel y una viga rectangular para la realización de las pruebas. Además, cabe destacar, que en la actualidad no existen datos con respecto a la variabilidad de los inchancables en la planta, es decir, sólo existe registro del tipo de evento, pero no por ejemplo el tamaño exacto de los inchancables encontrados en el proceso.



(a) Viga



(b) Malla



(c) Plancha

Figura 3.4: Algunos inchancables disponibles para la maqueta

3.3.1. *Software*

Lenguaje R

Para realizar todos los cálculos estadísticos y numéricos, se utilizó el lenguaje de programación R, esto debido a sus ventajas para el manejo de problemas estadísticos. Además este cuenta con *Packages* que son capaces de programar y realizar las operaciones requeridas para confeccionar un plan de pruebas experimental [16] y posteriormente analizarlo [17] mediante una interfaz de usuario.

Capítulo 4

Diseño de Experimentos

El Diseño de experimentos, como se menciona anteriormente en el Capítulo 1 corresponde a una metodología para la elaboración de experimentos de forma práctica y rápida. Donde posteriormente al ser realizado los experimentos, el método también cuenta con los elementos y herramientas necesarias para analizar correctamente los datos obtenidos. Para utilizar un lenguaje común a lo largo de la memoria, se definen los siguientes conceptos fundamentales.

4.1. Conceptos iniciales

Factores: Corresponden a las **variables** dentro de un experimento, las que debido a su cambio generan una alteración en la respuesta del sistema. Estos factores pueden ser categóricos o numéricos, donde los primeros son discretos, por ejemplo, la aplicación de un tratamiento A, B o C al acabado de un producto, mientras que los factores numéricos, pertenecen a un rango continuo de un tipo de variable, por ejemplo, temperatura, humedad, etc. Otra categoría de clasificación de factores son los controlables e incontrolables. [20]

- **Factores controlables:** Son los que el experimentador puede cambiar de acuerdo con sus capacidades y los que se espera investigar dentro del experimento para producir cierta respuesta.[11]
- **Factores incontrolables:** Son factores que no son controlables por el investigador o que no son de importancia para la investigación. Son también denominados *nuisance*, del francés: molesto. Estas variables se deben reducir lo más posible con la ayuda de la aleatorización. [11]

Niveles: Estos corresponden al rango de una variable, ya sea categórica o numérica. Pueden corresponder a un tipo de tratamiento o elemento categórico donde se debe aplicar un valor “alto” o “bajo” de en orden aleatorio para poder ser utilizadas dentro del modelo experimental a implementar. Mientras que, para las variables numéricas, igualmente se deben establecer al menos dos valores de “alto” y “bajo” para poder ser introducidos en el modelo. [20]

Covariable: Corresponde a un parámetro presente en el experimento, que es medible, pero este no puede ser controlado por el investigador, por ejemplo, la radiación solar, cantidad de lluvia, etc. Por la condición de que no pueden ser controladas, pero si medidas es que se deben utilizar técnicas de aleatoriedad en los experimentos para evitar de que estas covariables afecten positiva- o negativamente a la respuesta del sistema. [20]

Perturbación: Una perturbación corresponde a algún parámetro o valor presente en el experimento, que es a la vez no medible e incontrolable, por ejemplo, la curva de aprendizaje de un operador de una máquina. Estas variables son de gran importancia debido a que, al ser incontrolables pueden producir un impacto que pase desapercibido por el experimentador. [20]

Prueba: Corresponde a un test realizado con distintos factores utilizados y fijados a cierto nivel, de donde se espera obtener una respuesta de algún sistema o proceso evaluado. Cada prueba busca demostrar o emular un estado particular del sistema. [20]

Replicado: Corresponde a un conjunto de pruebas previamente definido por el experimentador que constituye un experimento. Para realizar un análisis más complejo, por ejemplo, ver la varianza, son necesarios al menos dos replicados de todo el set de pruebas elegidos. Al tener una gran cantidad de réplicas del experimento es posible considerar el error asociado a cada prueba y posteriormente realizar comparaciones entre las respuestas obtenidas de un mismo test.[20]

Respuesta: Es la variable por medir dentro de un experimento, es decir, él o los *outputs* de las pruebas experimentales. Estas se deben definir previamente a la realización de las pruebas, en conjunto con sus unidades de medida, escala y método de medición para verificar que efectivamente, la medición de estas variables puede ser utilizada para el análisis posterior. [20]

4.2. Diseño factorial

El diseño factorial de experimentos espera estudiar dos o más factores a la vez, buscando una mayor eficiencia en el proceso experimental. Se propone que, en cada replicado, todos los niveles de los factores sean investigados. Por ejemplo, si hay a niveles de un factor A y b niveles del factor B, Cada replicado contiene todas las combinaciones ab posibles. La forma más común de representar un experimento factorial es mediante un gráfico de cubo (o cuadrado), que es capaz de mostrar la información de los niveles de los factores expuesto además de la respuesta obtenida de acuerdo con las combinaciones. [11] En la Figura 4.1 se muestra un ejemplo para un experimento con dos factores y dos niveles.

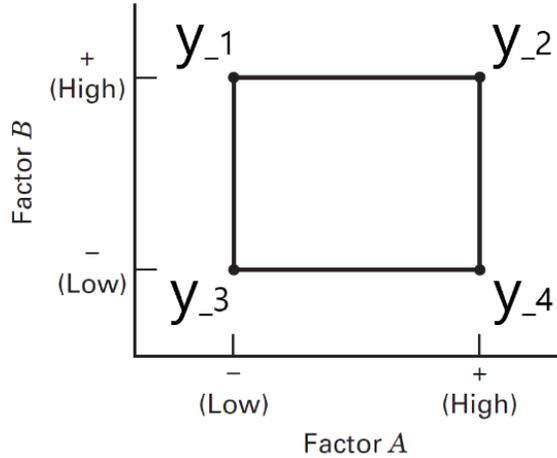


Figura 4.1: Experimento de dos factores y dos niveles con la respuesta en cada esquina del gráfico [11]

Con el gráfico anterior, es fácil calcular el incremento (o decremento) promedio en la respuesta debido a un factor fijado a un determinado nivel. Por ejemplo, para calcular el cambio debido al factor A en el sistema se puede calcular según lo siguiente:

$$A = \frac{y_2 + y_4}{2} - \frac{y_1 + y_3}{2} \quad (4.1)$$

Cuando las diferencias entre y_2 e y_1 en conjunto con la diferencia entre y_4 e y_3 difieren, indica que existe una interacción entre los factores. Esto implica que el factor A depende del factor B y viceversa, por lo que influye directamente uno en otro y por consiguiente en la respuesta del sistema.

Con los datos anteriores es posible realizar un modelo de predicción del ensayo y de la respuesta del sistema mediante un modelo lineal, de forma general, un experimento factorial de dos factores puede ser escrito de la siguiente manera:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (4.2)$$

Donde y representa la respuesta, los β 's representan a los parámetros que deben ser determinados, β_0 corresponde al intercepto o el promedio de las variables, β_1 y β_2 son los parámetros de los factores A y B respectivamente, mientras que β_{12} simboliza al parámetro de interacción de segundo grado entre ambos factores nombrados anteriormente, finalmente, ε corresponde al error. Por otra parte las variables x_1 y x_2 son las variables codificadas en escala $\{-1,+1\}$ para poder predecir la respuesta de acuerdo con el modelo.

Lo anterior es completamente aplicable, por ejemplo, para modelos mucho más complejos como los que contienen tres niveles y tres factores a tratar, donde el esquema de este sistema en un gráfico de cubo queda de la siguiente manera:

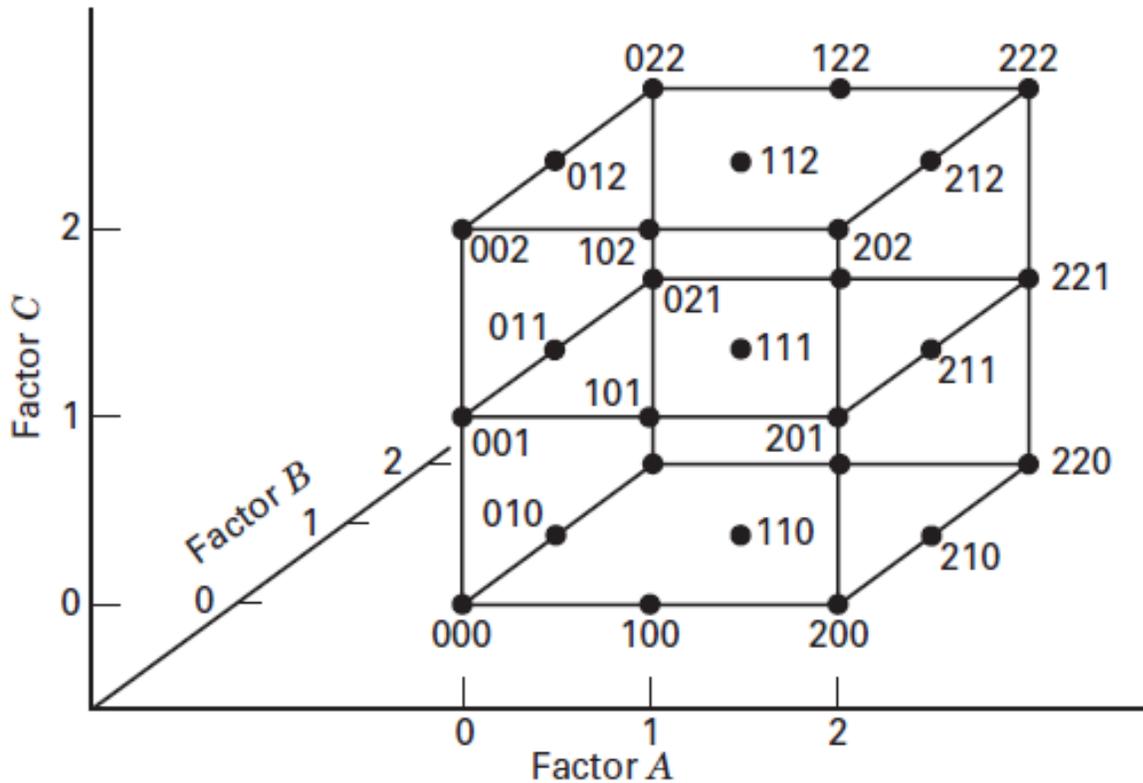


Figura 4.2: Combinación de tratamientos en un diseño 3^3 [20]

La regresión de este modelo queda como:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_{12}x_1x_2 + \beta_{13}x_1x_3 + \beta_{23}x_2x_3 + \beta_{11}x_1^2 + \beta_{22}x_2^2 + \beta_{33}x_3^2 + \varepsilon \quad (4.3)$$

Donde es posible obtener niveles “bajo”, “medio” y “alto” que corresponden a la escala $\{-1, 0, +1\}$ respectivamente y permite tener un tercer nivel del factor provocando una relación cuadrática entre los factores de diseño y el modelo. A pesar de que este modelo es aplicable de forma general, al ir aumentando la cantidad de variables y niveles involucrados este método consume más recursos de tiempo y presupuesto. Por lo anterior, es posible realizar un experimento fraccional, el que busca recabar la mayor cantidad de información a cambio de un menor número de pruebas reduciendo el tiempo de ejecución total del experimento. [20]

A pesar de esto, un experimento se puede definir como n^k , donde k representa la cantidad de factores y n corresponde al número de niveles de estos factores. Por lo tanto, al mantener constante los niveles, y aumentar la cantidad de factores, la cantidad de pruebas aumenta exponencialmente, mientras que al aumentar los niveles y mantener constante los factores, el aumento de la cantidad de pruebas es de acuerdo con el factor k .

4.3. Diseño factorial fraccional

A medida que el número de factores y niveles aumenta en el diseño factorial, aumenta también la cantidad de pruebas que se requieren para completar un replicado y rápidamente sobrepasan los recursos disponibles para cualquier experimento. Por ejemplo, al tener un experimento con 6 factores con solamente dos niveles, este requiere 64 pruebas para realizar el diseño factorial completo. A pesar de esto, 6 grados de libertad corresponden a los factores principales y solamente 15 correspondan a interacción entre dos efectos, mientras que los restantes 42 grados de libertad están asociados a la interacción de tres factores o más, los que generalmente son despreciables.

Cuando razonablemente se puede asumir que la respuesta del sistema está determinada por los efectos principales y por los efectos de interacción de bajo nivel, es posible obtener resultados certeros con sólo un set de pruebas previamente seleccionados.

La cantidad de experimentos son reducidos mediante generadores, los que son combinaciones de factores impuestos por el diseñador de experimentos, por ejemplo, para el caso de un experimento de 3 factores, se tienen los factores A, B y C, donde cada uno tiene un efecto principal asociado, las interacciones de segundo grado, AB, BC y AC, y la interacción de tercer grado corresponde a ABC.

Al combinar los factores, se fuerza al sistema a igualar un efecto con respecto a otro. Esto se produce debido a los denominados generadores, por ejemplo, se puede definir un generador $C = AB$, con esto se logra igualar el efecto principal C al efecto de la interacción de segundo nivel entre los factores A y B. Al realizar esta operación, no sólo afecta a las variables previamente nombradas, sino que a todo el sistema. [11] Luego para obtener la estructura de solapamiento se debe considerar que $X * X = I$, donde X es el efecto de algún factor (A,B,C, etc) e I corresponde al denominado intercepto o promedio. A partir de lo anterior, se obtienen las siguientes ecuaciones.

$$A = BC \tag{4.4}$$

$$B = AC \tag{4.5}$$

$$C = AB \tag{4.6}$$

$$I = ABC \tag{4.7}$$

Donde se debe notar que la ecuación $I = ABC$ implica que el intercepto, que es el promedio de todas las respuestas, está solapado con una interacción de tercer grado. Con esto, se busca ordenar y encontrar los factores que no interactuarán entre si meramente mediante sentido común, es decir, que si el experimentador sabe que la interacción $BC \sim 0$, al encontrar los

valores que corresponden a los efectos de A y BC, se puede deducir entonces que el efecto en la respuesta está siendo ocasionado por el factor A. Por lo tanto, es tarea del investigador agrupar y determinar los factores que serán clave y que no interactuarán en el sistema para no producir futuros errores en la predicción.

En la Figura 4.3, se muestra que pueden existir múltiples generadores, incluso para un número mayor de factores, lo que implica que al solapar más efectos, entonces más factores del sistema estarán solapados, lo que lleva a una compensación de mayor grado dentro del experimento. La reducción en el número de experimentos se realiza según la siguiente ecuación:

$$2^{k-p} \tag{4.8}$$

Donde, k representa a la cantidad de factores, y p corresponde a la reducción de trabajo. Además de esto, $k - p$ indica también la resolución del experimento. Por otra parte, el diseño factorial fraccional con un gran número de variables es ampliamente utilizado en la selección de experimentos, para reducir la cantidad de factores relevantes, caso que se verá en el próximo capítulo. Por otra parte, el valor de p también es el que indica la cantidad de elementos en la ecuación de definición del experimento. La cantidad de elementos se define como 2^p “palabras”, en el caso anterior, ABC e I corresponden a los elementos de la ecuación de definición. Otro ejemplo es usando 5 factores considerando los generadores $D = AB$ y $E = AC$ para 8 pruebas. En este caso se tienen 2^2 elementos y la ecuación de definición queda como:

$$I = ABD = ACE = BCDE \tag{4.9}$$

Debido a que se tienen $2^2 = 4$ palabras en la ecuación de definición.

		Number of factors, k					
		3	4	5	6	7	8
increasing cost  Number of runs	4	2^{3-1}_{III} $\pm C=AB$					
	8	2^3 full	2^{4-1}_{IV} $\pm D=ABC$	2^{5-2}_{III} $\pm D=AB$ $\pm E=AC$	2^{6-3}_{III} $\pm D=AB$ $\pm E=AC$ $\pm F=BC$	2^{7-4}_{III} $\pm D=AB$ $\pm E=AC$ $\pm F=BC$ $\pm G=ABC$	
	16	2^3 twice	2^4 full	2^{5-1}_V $\pm E=ABCD$	2^{6-2}_{IV} $\pm E=ABC$ $\pm F=BCD$	2^{7-3}_{IV} $\pm E=ABC$ $\pm F=BCD$ $\pm G=ACD$	2^{8-4}_{IV} $\pm E=BCD$ $\pm F=ACD$ $\pm G=ABC$ $\pm H=ABD$
	32	2^3 4 times	2^4 twice	2^5 full	2^{6-1}_{VI} $\pm F=ABCDE$	2^{7-2}_{IV} $\pm F=ABCD$ $\pm G=ABDE$	2^{8-3}_{IV} $\pm F=ABC$ $\pm G=ABD$ $\pm H=BCDE$
	64	2^3 8 times	2^4 4 times	2^5 twice	2^6 full	2^{7-1}_{VII} $\pm G=ABCDEF$	2^{8-2}_V $\pm G=ABCD$ $\pm H=ABEF$

 more factors, lower resolution fewer factors, higher resolution

Figura 4.3: Tabla de generadores de acuerdo con el número de pruebas[11]

Lo anterior, para un experimento de tres factores y dos niveles, se ve traducido en el gráfico de cubo en la Figura 4.4, donde se ve la selección de posibles experimentos a realizar utilizando el generador $\pm C=AB$, donde al tener dos generadores, se generan igualmente los denominados bloques, que entregan una representación del experimento con un número fraccional de pruebas.

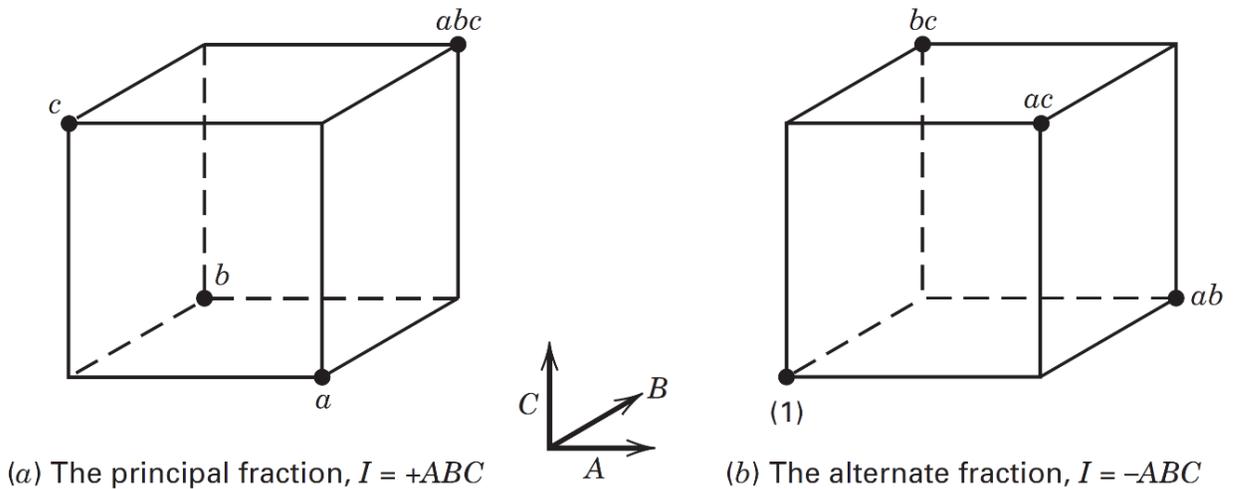


Figura 4.4: Ambos posibles generadores para un diseño fraccional 2^3 [20]

Finalmente, otro aspecto importante al realizar experimentos es la antes nombrada resolución, donde son principalmente importantes las resoluciones III, IV y V. [22] Estas se pueden definir como:

- Resolución III: Estos diseños producen que los efectos principales no estén solapados con ningún otro efecto principal, pero estos mismos efectos principales están solapados con la interacción de dos factores y algunos efectos de segundo grado pueden estar enmascarados entre ellos.
- Resolución IV: Estos diseños producen que los efectos principales no estén solapados con ningún efecto primario o interacción de segundo grado, pero los factores de interacción de segundo grado pueden estar solapados con otros de segundo grado.
- Resolución V: Estos diseños permiten que los efectos principales o que los factores de interacción de segundo nivel no estén solapados con ningún otro factor de primer o segundo nivel, pero son posibles los solapamientos con interacciones de tercer nivel.

A pesar de que existe un número mayor de resoluciones, estos no serán vistos debido a que escapan los objetivos del trabajo de título.

4.4. Solapamiento de factores para un experimento de tres factores y tres niveles

Para el caso particular de interés de un experimento de tres niveles y tres factores, se presenta la metodología de reducción de pruebas mediante el solapamiento de factores. A partir de este punto, sabiendo que todos los factores tienen tres niveles y son del tipo cualitativos, se utilizará la siguiente notación, {0}: Bajo; {1}: Medio; {2}: Alto. Con esto es posible representar los tres factores nombrados anteriormente en un gráfico de cubo, donde se puede ver todas las combinaciones en la Figura 4.5:

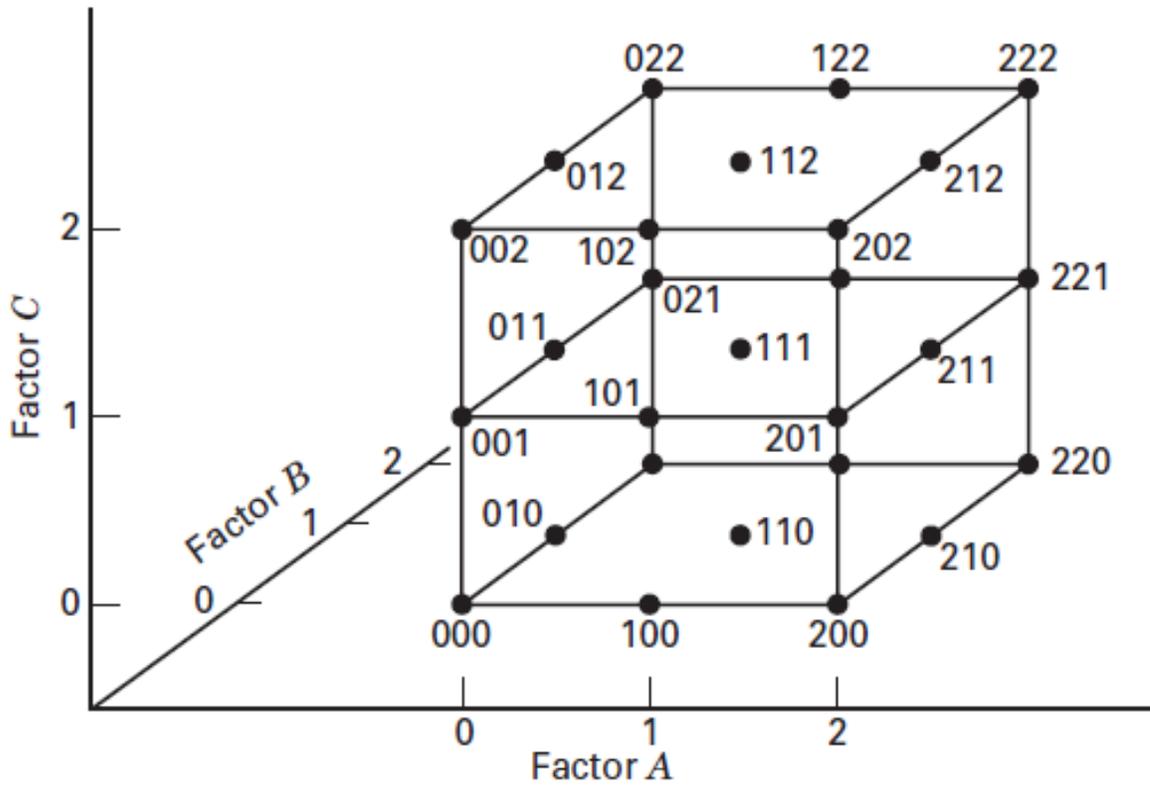


Figura 4.5: Representación de un experimento con tres factores y tres niveles por factor [20]

Se obtienen 27 pruebas a realizar para este tipo de experimentos, por lo que se optará por realizar una fracción representativa de este. Para llevar a cabo esta operación, se debe reducir el trabajo de a tercios, es decir, $3^{(k-p)}$ donde k corresponde al diseño factorial completo y p es la reducción de trabajo. En este caso, se utilizará $3^{(3-1)} = 9$.

Por lo tanto, para encontrar el contraste definitivo (ecuación de definición), se debe resolver la siguiente ecuación:

$$L = \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 \quad (4.10)$$

Donde L puede tomar los valores $\{0,1,2\}$ debido a que se definen tres bloques. Mientras que los valores de α también pueden tomar los valores 0,1,2. Finalmente, los valores de x corresponden a los niveles interpretados como $\{0\}$:Bajo; $\{1\}$: Medio; $\{2\}$: Alto. Con esto, es posible encontrar todos los bloques del sistema y así tener disponibles las combinaciones representativas del sistema. En este caso, tomando arbitrariamente el solapamiento del factor de interacción de tercer nivel AB^2C^2 se obtiene la ecuación:

$$L = x_1 + 2x_2 + 2x_3 \quad (4.11)$$

Buscando el bloque principal definido por $L=0$, se obtiene que las combinaciones posibles de este bloque son las siguientes:

Tabla 4.1: Pruebas a realizar para los experimentos y sus respectivos niveles en cada factor

Prueba	Nivel del factor A	Nivel del factor B	Nivel del factor C
1	0	0	0
2	0	1	2
3	0	2	1
4	1	0	1
5	1	1	0
6	1	2	2
7	2	0	2
8	2	1	1
9	2	2	0

Las combinaciones de niveles anteriormente mencionadas se pueden ver gráficamente en la Figura 4.6:

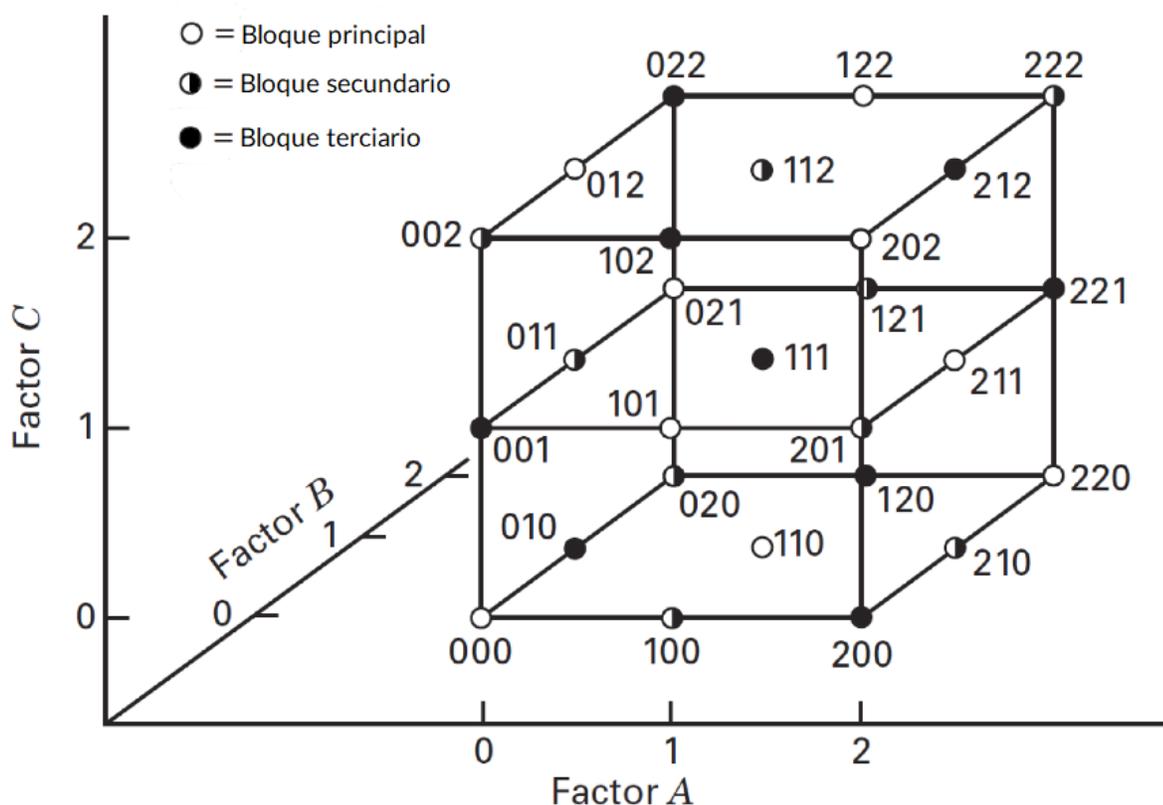


Figura 4.6: Representación gráfica de los bloques posibles señalando el bloque a utilizar [20]

En la figura Figura 4.6 se pueden distinguir tres simbologías, círculos llenos, círculos medios y círculos vacíos. Estos tres representan cada uno un bloque formado a partir de

la Ecuación 4.10 donde cada uno de estos es una representación del experimento completo, es decir, veintisiete pruebas. Para realizar las pruebas se puede utilizar cualquiera de estos tres bloques pero por simplicidad se utilizará el bloque principal representado por círculos blancos.

Como se menciona anteriormente, este procedimiento de reducción de pruebas es el que se espera aplicar a todos los experimentos propuestos en el Capítulo 5, por lo que se utilizará el mismo bloque para todas las pruebas de todos los experimentos.

Al reducir el número de pruebas se introducen efectos de solapamiento entre los factores, por lo tanto, considerando que se utilizará la interacción AB^2C^2 se tiene la siguiente estructura de solapamiento para los factores principales y de interacción.

$$A = A(AB^2C^2) = A^2B^2C^2 = ABC \quad (4.12)$$

$$A = A(AB^2C^2)^2 = A^2B^4C^4 = BC \quad (4.13)$$

$$B = B(AB^2C^2) = AB^3C^2 = AC^2 \quad (4.14)$$

$$B = B(AB^2C^2)^2 = A^2B^5C^4 = ABC^2 \quad (4.15)$$

$$C = C(AB^2C^2) = AB^2C^3 = AB^2 \quad (4.16)$$

$$C = C(AB^2C^2)^2 = A^2B^4C^5 = AB^2C \quad (4.17)$$

$$AB = AB(AB^2C^2) = A^2B^3C^2 = AC \quad (4.18)$$

$$AB = AB(AB^2C^2) = A^3B^5C^4 = BC^2 \quad (4.19)$$

Con esto se puede apreciar que todos los factores principales están solapados con interacciones de segundo y tercer nivel, por lo que es importante determinar y aislar las variables para ser capaz de establecer eficientemente cómo influyen los elementos en la respuesta del sistema.

Finalmente, las estructuras de solapamiento se representan según las siguientes ecuaciones:

$$A = A + BC + ABC \quad (4.20)$$

$$B = B + AC^2 + ABC^2 \quad (4.21)$$

$$C = C + AB^2 + AB^2C \quad (4.22)$$

$$AB = AB + AC + BC^2 \quad (4.23)$$

Dichas ecuaciones se verán reducidas y simplificadas nuevamente en las siguientes secciones que corresponden a cada caso de experimento.

4.5. Selección de experimentos

Una característica útil del Diseño de Experimentos a la hora de realizar un plan de pruebas es que el proceso experimental puede ser iterativo y por etapas consecutivas, con esto, se espera reducir la cantidad de pruebas definitivas que serán representativas del experimento. Por lo tanto, se pueden usar varios pasos de división en bloques de las etapas, por ejemplo, con el uso de la Figura 4.3 se pueden solapar varios efectos y considerar múltiples variables a la vez. conociendo que existe una compensación. Lo que se busca con realizar experimentos fraccionales iniciales es eliminar y reducir el número de factores que son irrelevantes para el experimento. [20] Por ejemplo, utilizando un caso extremo, donde se tiene un experimento con 8 factores con dos niveles cada uno, se obtiene un total de $2^8 = 256$ pruebas para un experimento factorial completo, lo que ocasiona diversos problemas, principalmente relacionado con el tema de recursos disponibles.

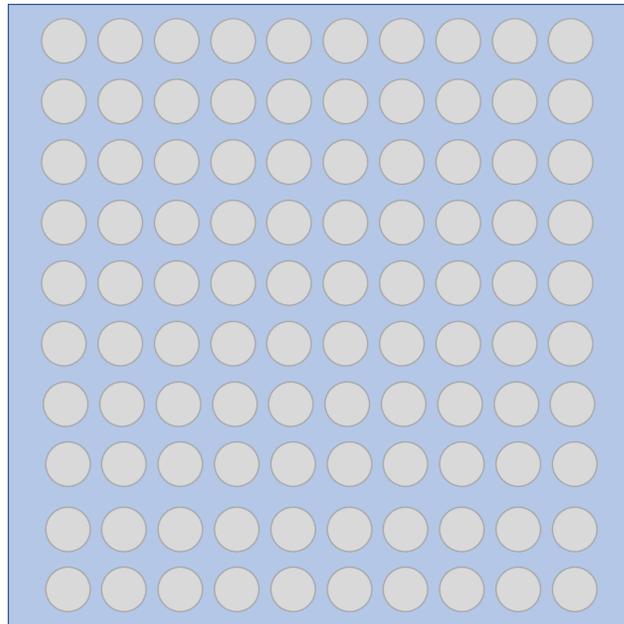


Figura 4.7: Representación del universo de pruebas

Como se menciona anteriormente, se puede realizar un proceso de solapamiento de factores cuando estos son agrupados en bloques representativos. Con esto se logra realizar un set de prueba iniciales que dan un panorama general del experimento y que da la capacidad de discernir que factores son verdaderamente influyentes. Por lo tanto, continuando con el ejemplo, al utilizar un experimento de resolución IV (ver Figura 4.3), es posible reducir el número de pruebas a 16, lo que disminuye en gran medida el trabajo realizado inicialmente, pero se tiene también un alto costo de pérdida de información. Debido a esta pérdida de información es que el experimentador debe discernir claramente cuáles son los factores que deben estar solapados, para que posteriormente, al ya haber realizado los 16 experimentos sea capaz de eliminar los efectos que no producen un gran cambio en la respuesta del experimento. A continuación, La Figura 4.8 muestra elementos en rojo, los que fueron las pruebas de selección inicial para un experimento genérico.

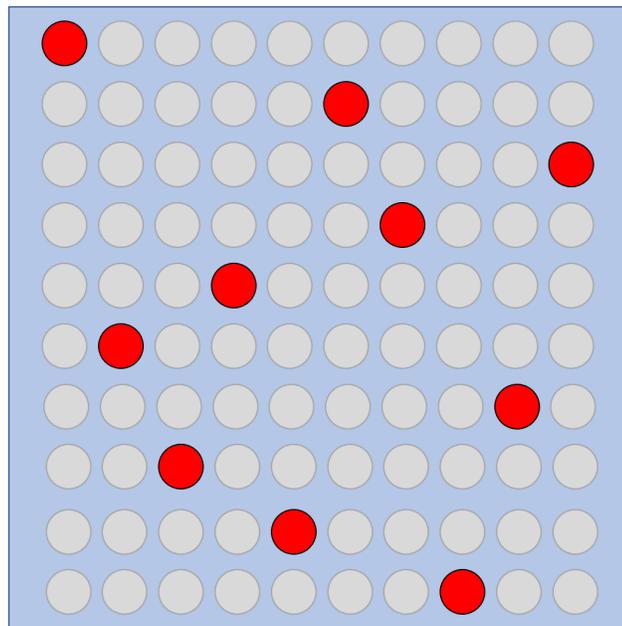


Figura 4.8: Pruebas de selección inicial

Luego de haber realizado las pruebas y al haber eliminado factores, es posible encontrar un sub-conjunto dentro del universo de pruebas original, gracias al procedimiento anterior, es posible asegurar que el óptimo de la respuesta buscada se encuentra dentro de ese número acotado de pruebas. Siguiendo con el ejemplo, se podrían reducir 2 factores con las pruebas iniciales ya realizadas, lo que ocasiona que el experimento dé un total de $2^6 = 64$ pruebas, por lo tanto, el experimento sólo necesita 80 pruebas, 16 iniciales y 64 definitivas, número mucho menor a las 256 pruebas inicialmente planteadas.

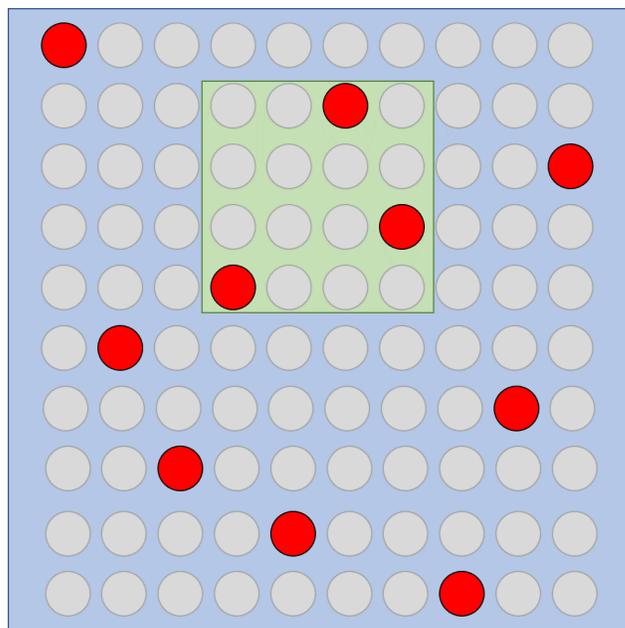


Figura 4.9: Purebas de selección final

Con los procedimientos anteriormente nombrados es posible llegar a un diseño de experimentos que sea compatible con la cantidad de tiempo y recursos disponibles para cualquier experimento que se proponga.

4.6. Covariables, perturbaciones y otras variables asociadas

Las covariables son los factores que son considerados medibles, incontrolables y que no son de interés para el experimento en cuestión. Para este caso en particular, se tomará en cuenta la curva de aprendizaje del operador como una covariable, debido a que no es controlable, es medible a través de los replicados y no es de interés para la determinación de la recomendación de método a elegir. La hipótesis inicial es que esta covariable afecte positivamente al experimento, es decir, que a medida que más se utiliza la maqueta, más rápida serán las acciones de captura y traslado. A pesar de esto, se considerará como análisis anexo para mostrar si está o no presente efectivamente dentro del experimento. Considerando que la maqueta será operada por alguien sin experiencia previa, se espera una mejora en la experticia y operación de la máquina a través del tiempo.

En primer lugar, para contrarrestar el error de esta covariable, se realizará un conjunto experimental inicial que contempla algunas combinaciones aleatorias para cada experimento, esto con el fin de que el operador se sienta cómodo con el sistema al que está expuesto. Posterior a esto y durante el proceso experimental, se utilizarán tres replicados de las pruebas experimentales para analizar la varianza entre el primer, segundo y tercer replicado y determinar finalmente si el efecto de la covariable está aún presente.

Por otra parte, se tienen los factores que no son medibles ni tampoco controlables por el experimentador, para lograr reducir y distribuir normalmente los errores en las pruebas, estas se deben ejecutar en orden aleatorio para que los errores aleatorios y perturbaciones no se concentren en variables determinadas. Los planes de pruebas mostrados en los anexos desde la Sección 10.3 hasta la Sección 10.5 han sido ordenados de forma aleatoria mediante un algoritmo aleatorio (*random*) de Python.

Capítulo 5

Experimentos

Para solucionar el problema de la extracción de elementos inchancables en el chancador primario, dentro del proyecto, previo al marco de esta memoria, se han bosquejado distintas ideas [8], las que fueron llevadas a una selección de estas para poder establecer métodos viables para llevar a cabo este proceso de remoción de material indeseado. Por lo mismo, se establecieron dentro del proyecto 18-17 dos líneas de diseño, considerando un *Dispositivo 1* y un *Dispositivo 2* de captura. Estos dispositivos han dado como resultado tres escenarios de retiro de inchancables[9], una extracción mediante un *Dispositivo 2* en la descarga del alimentador de la maqueta y por otra parte, un *Dispositivo 1* con un sistema hidráulico, el que puede extraer material directamente desde el buzón del chancador o desde el *apron*. La división de estas pruebas se ve esquematizada en la Figura 5.1:

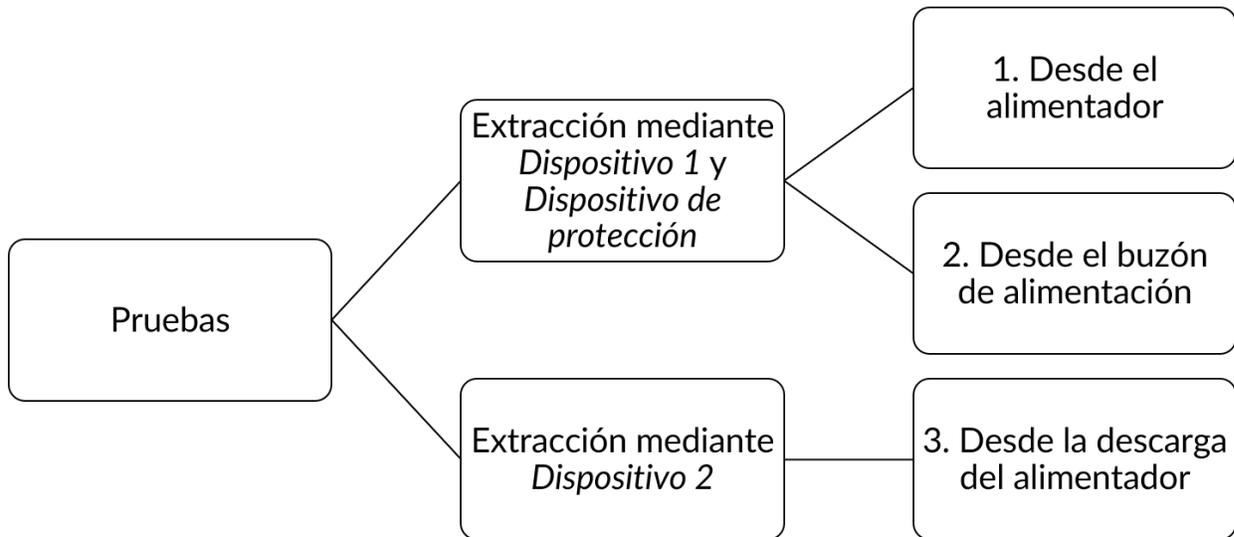


Figura 5.1: División esquemática de pruebas a realizar

Se han definido tres métodos de extracción a partir de las dos líneas de diseño, por lo que se tienen tres experimentos aislados, que son:

- Experimento 1: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde frente del alimentador
- Experimento 2: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde el buzón de alimentación
- Experimento 3: Extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

5.1. Experimento 1: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde frente del alimentador

5.1.1. Descripción

El primer experimento, consiste en el uso del Dispositivo 1 adosado a un brazo que tiene la capacidad de moverse tanto dentro como fuera del buzón de alimentación del chancador primario a escala. Además, al tener gran alcance, el brazo puede llegar hasta el alimentador o *apron*, por lo que también es posible la remoción de materiales metálicos desde este sector. Otra característica del brazo es que su base se encuentra en la misma posición geométrica con respecto a la planta de Colón Alto.

Secuencia de operación:

En primer lugar, se debe instalar el *Dispositivo de protección* en el buzón de alimentación del chancador para evitar el paso de inchancables al chancador. Luego, el *apron* al tener velocidad variable, es posible obtener una velocidad muy lenta que permita acercar el inchancable, ya antes detectado, al sector de descarga y detener su funcionamiento cuando esté visible al alcance del *Dispositivo 1*. Posteriormente para realizar el retiro del inchancable se procede a maniobrar con el brazo hidráulico desde la posición inicial, hasta alcanzar al elemento metálico que está dentro del alimentador, recogerlo y volver al punto inicial.

La posición inicial elegida para los experimentos es el costado del alimentador principalmente porque en este lugar existe mayor espacio para comenzar las maniobras. Cabe destacar, que en la planta, el brazo hidráulico está alineado con la boca del chancador entre dos *aprons*, en la Figura 5.2 se muestra una representación virtual de la maqueta . La posición inicial del brazo no afecta en la calidad de captura de los inchancables, sino que solamente a los tiempos de traslado desde y hacia la posición inicial definida.[10]

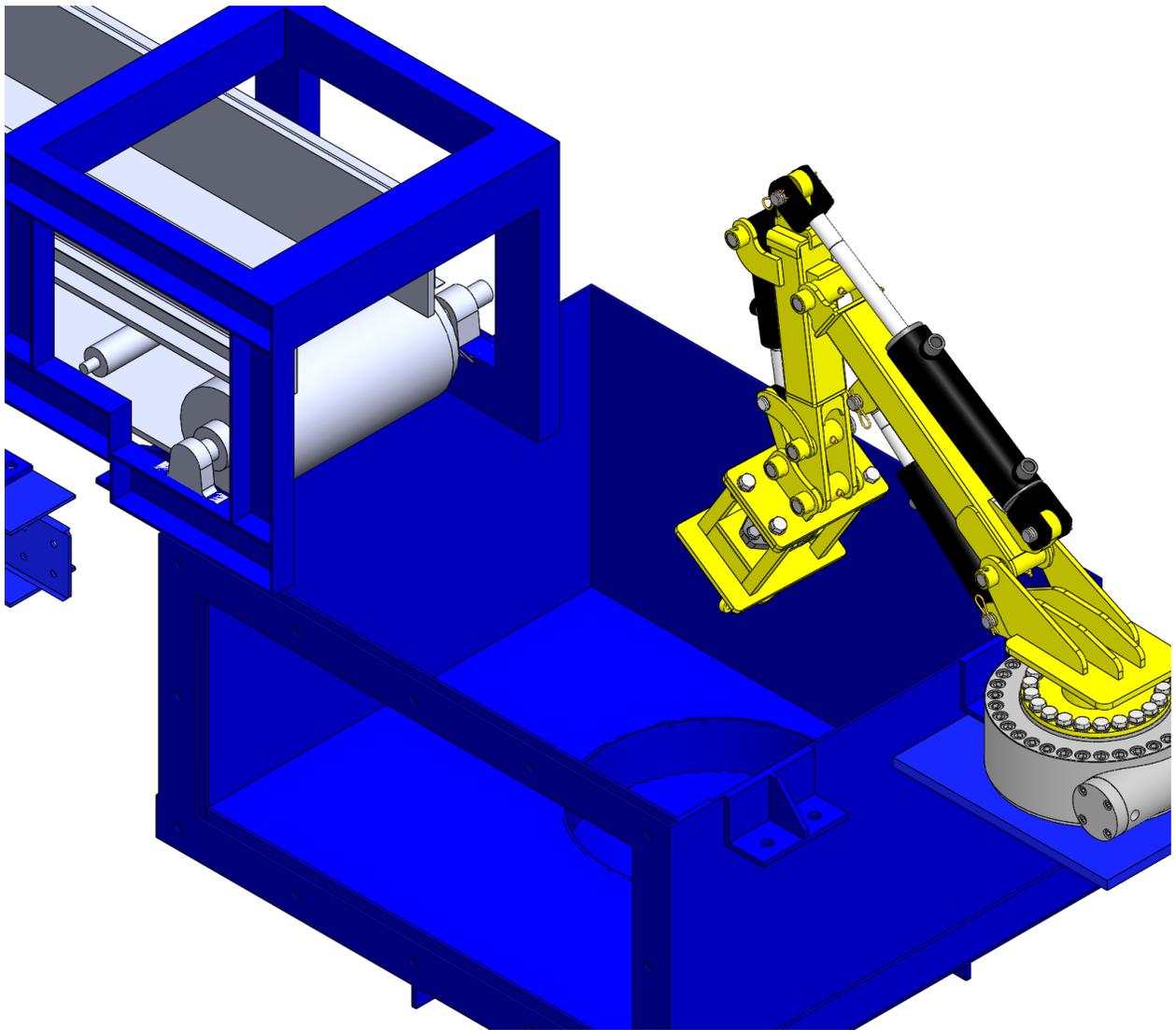


Figura 5.2: Posición del brazo hidráulico en maqueta virtual.

5.1.2. Identificación preliminar de factores

En el experimento donde se debe realizar la extracción mediante el *Dispositivo 1*, desde frente del alimentador, se identifican cuatro factores que se tomarán en cuenta inicialmente para el análisis. Se debe notar que tres de estos factores tienen tres niveles. Estos factores corresponden a los diseños de los *Dispositivo 1*, *Dispositivos de protección* y la ubicación del inchancable. Mientras que un factor tiene cinco niveles que corresponden a los tipos de inchancable. Las variables son los siguientes:

Tabla 5.1: Factores iniciales del experimento 1: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde frente del alimentador

Factor	Niveles
<i>Dispositivo 1</i>	Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3
<i>Disp. de protección</i>	Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3
Ubicación	Sobre mineral, Bajo mineral, Un costado del <i>apron</i>
Inchancable	Viga, Riel, Cañería, Malla, Plancha

5.1.3. Respuestas por medir

Las respuestas a tomar en cuenta para este experimento se muestran en la Tabla 5.2 donde el tiempo está medido en segundos, el índice de captura en porcentaje y la calidad de captura y estabilidad del dispositivo se medirán en una escala de uno a tres puntos, donde tres puntos indica una buena respuesta y un punto indica un mal desempeño.

Estas últimas dos escalas se ven explicadas de la siguiente manera. La Calidad de captura se ve relacionada con la facilidad de captura del inchancable, es decir, cuando la captura se produce al primer intento se le otorgan tres puntos a la pruebas y por cada intento fallido se le descuenta un punto.

De igual forma, la Estabilidad del dispositivo explica la facilidad de volver al punto inicial sin botar el inchancable capturado, por lo tanto se le otorgan tres puntos si el inchancable no cae durante el traslado y se descuenta un punto cada vez que el inchancable cae y tiene que volver a ser recogido.

Tabla 5.2: Respuestas medibles del experimento 1: extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde frente del alimentador

Respuesta medible	Medición
Tiempo de captura	X [segundos]
Calidad de captura	Buena / Regular / Mala
Estabilidad del dispositivo	Buena / Regular / Mala
Porcentaje de captura	X [%]

5.2. Experimento 2: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde el buzón de alimentación

5.2.1. Descripción

El brazo hidráulico usado para las pruebas cuenta con tres partes principales, el brazo, la pluma y la articulación del *Dispositivo 1*, además de esto, se cuenta con un mecanismo rotador del *Dispositivo 1* entre la articulación de la pluma y el *Dispositivo 1*. Estos componentes son los que permiten al brazo hidráulico alcanzar a barrer el 99% del volumen del buzón de alimentación. Gracias a esto, el inchancable puede ser retirado por el brazo en prácticamente todo el buzón de alimentación del chancador.

El procedimiento de extracción de este experimento parte instalando el *Dispositivo de protección* en el buzón de alimentación antes de comenzar la maniobra para asegurar que el inchancable no caiga al chancador. Posteriormente el brazo hidráulico se mueve desde su posición inicial hasta la ubicación dentro del buzón en donde se encuentra el inchancable a retirar. Dicha posición será impuesta a partir de la ubicación más probable, la cual será determinada a partir de un experimento de caída de inchancables que se verá en la Subsección 6.1.2. Luego el inchancable se captura con el *Dispositivo 1* y se lleva nuevamente a la posición inicial donde termina el experimento.

5.2.2. Identificación preliminar de factores

Al realizar las pruebas relacionadas con la extracción mediante el *Dispositivo 1* desde el buzón de alimentación, se han encontrado igualmente cuatro factores que influyen en la respuesta final del sistema. Estos factores corresponden a los diseños disponibles del *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección*, donde las dos variables están presentes en tres niveles, mientras que la ubicación del inchancable tiene cuatro niveles y para el tipo de inchancable se tienen cinco niveles, los que se esperan reducir en el siguiente proceso.

Tabla 5.3: Factores iniciales del experimento 2: extracción mediante *Dispositivo 1* desde buzón de alimentación

Factor	Niveles
<i>Dispositivo 1</i>	Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3
<i>Disp. de protección</i>	Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3
Ubicación	Sobre mineral, Bajo mineral, Extremo izquierdo bajo mineral, Extremo derecho bajo mineral
Inchancable	Viga, Riel, Cañería, Malla, Plancha

Con respecto al factor “Ubicación” se puede ver que existen cuatro niveles, estas cuatro

posiciones no están definidas, es decir, sobre mineral y bajo mineral solamente indican el estado del inchancable pero no la posición dentro del buzón de alimentación para realizar las pruebas. Por otra parte, se han definido las posiciones extremo izquierdo y extremo derecho bajo mineral de acuerdo con la Figura 5.3 a continuación:

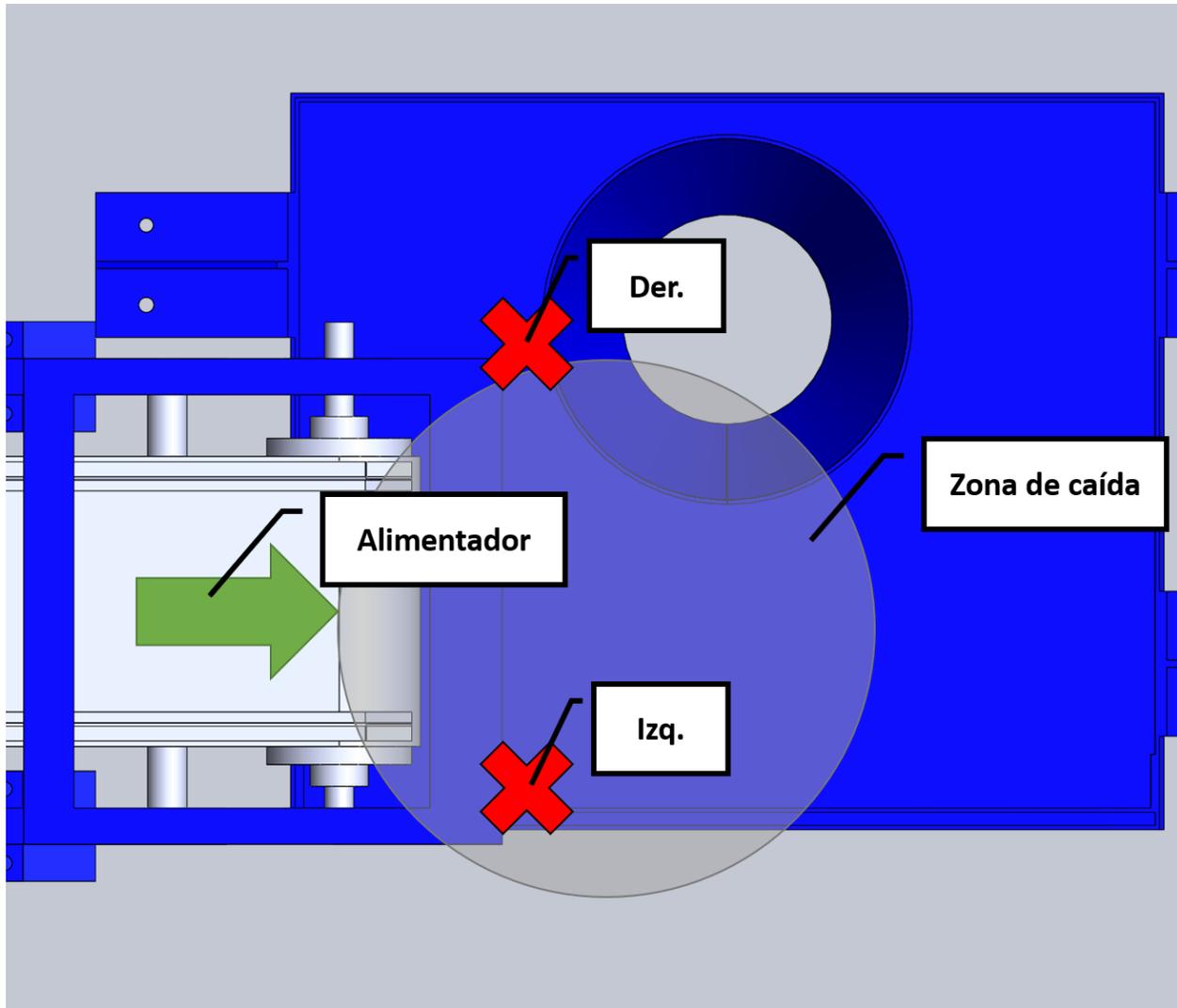


Figura 5.3: Esquema de ubicación dentro del buzón

En esta Figura 5.3, se representan los lugares extremos con una “X” en color rojo, mientras que se muestra un área en azul que representa la ubicación aproximada de la caída de un inchancable. En la sección de pruebas preliminares (Figura 4.8) se muestra el procedimiento para elegir una ubicación extrema y una ubicación más probable dentro del buzón para comenzar la ejecución del experimento.

5.2.3. Respuestas por medir

Al igual que en el experimento anterior, se medirá el porcentaje y tiempo de captura, además del tiempo de traslado hasta volver a un punto inicial previamente fijado.

También en este caso se medirá la Calidad de captura y Estabilidad del dispositivo de la misma forma que en el primer experimento, es decir, con una escala de uno a tres puntos donde tres puntos indica un buen rendimiento y un punto se traduce en un mal desempeño.

Además, aquí se agrega una respuesta denominada "Funcionalidad adicional 1", la que se relaciona directamente con cómo se puede homologar el diseño analizado a una pala dentro del buzón de extracción. Nuevamente, tres puntos indica un buen desempeño y un punto un bajo desempeño.

Tabla 5.4: Respuestas medibles del experimento 2: extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde el buzón de alimentación

Respuesta medible	Medición
Porcentaje de captura	X [%]
Tiempo de captura	X [segundos]
Tiempo de traslado	X [segundos]
Calidad de captura	Buena / Regular / Mala
Estabilidad del dispositivo	Buena / Regular / Mala
Funcionalidad adicional 1	Buena / Regular / Mala

5.3. Experimento 3: Extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

5.3.1. Descripción

El tercer experimento utiliza el *Dispositivo 2* de captura, el que se posiciona en la descarga del alimentador al buzón, este se ve instalado en la Figura 5.4 a continuación.

El experimento consiste en que se detiene el alimentador posterior a la detección del inchancable, luego se instala el *Dispositivo 2* con el alimentador detenido, luego se activa nuevamente el alimentador para que el inchancable metálico se acerque al *Dispositivo 2* y este capture el inchancable. Finalmente, el *Dispositivo 2* es retirado usando un puente grúa para volver con el inchancable a la posición de estacionamiento.

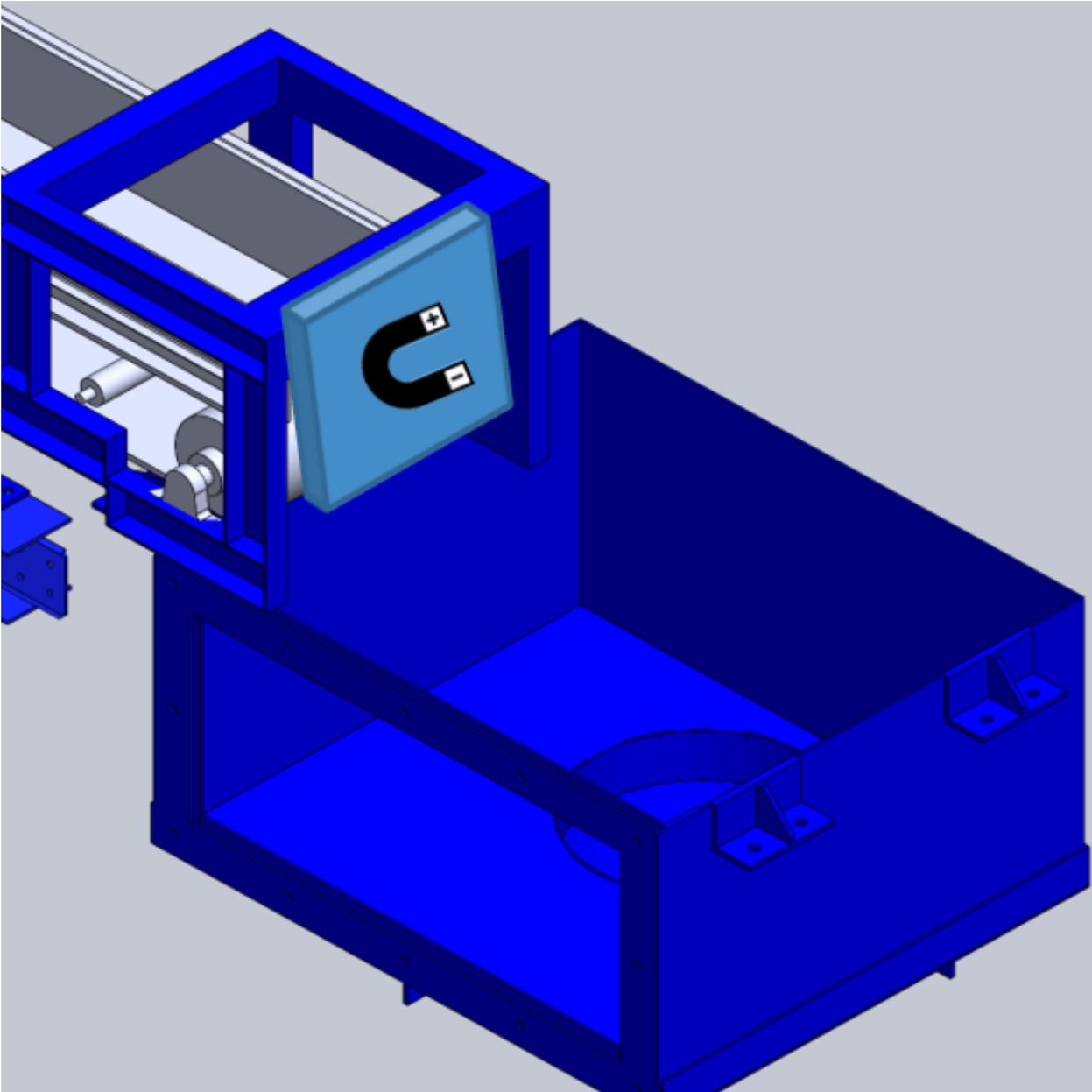


Figura 5.4: Representación del experimento de extracción mediante *Dispositivo 2* de captura en la descarga del alimentador en maqueta virtual.

5.3.2. Identificación preliminar de factores

En el tercer experimento de extracción mediante *Dispositivo 2*, se han definido dos factores con tres niveles, el diseño del *Dispositivo 2* y la ubicación del inchantable, mientras que en el tipo de inchantable se han definido cinco niveles. En la Tabla 5.5 se muestran los factores y sus niveles.

Tabla 5.5: Factores iniciales del experimento 3: extracción mediante *Dispositivo 2* en la caída del alimentador

Factor	Niveles
<i>Dispositivo 2</i>	Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3
Ubicación	Sobre mineral, Bajo mineral, Un costado del <i>apron</i>
Inchancable	Viga, Riel, Cañería, Malla, Plancha

5.3.3. Respuestas por medir

En este caso se medirán más respuestas debido a la complejidad del proceso. A pesar de esto se considera igualmente el porcentaje de captura como una de las respuestas más importantes a analizar.

Por otra parte, se considera igualmente el tiempo de instalación, de captura y de retorno al punto inicial del *Dispositivo 2*. También se consideran las respuestas de Calidad de captura y Estabilidad del dispositivo de acuerdo a las escalas mencionadas en los experimentos anteriores.

Se agregan dos respuestas genéricas denominadas “Funcionalidad adicional 2” y “Funcionalidad adicional 3” ambas medidas en porcentaje, estas tienen relación con respecto a la cantidad de material pasante a través del dispositivo y la cantidad de material evacuado por el dispositivo.

Tabla 5.6: Respuestas medibles del experimento 3: extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

Respuesta medible	Medición
Porcentaje de captura	X [%]
Tiempo de instalación	X [segundos]
Tiempo de captura	X [segundos]
Tiempo de retorno	X [segundos]
Calidad de captura	Buena / Regular / Mala
Estabilidad del dispositivo	Buena / Regular / Mala
Funcionalidad adicional 2	X [%]
Funcionalidad adicional 3	X [%]

Capítulo 6

Simplificación de niveles y factores

El proyecto 18-17 en el cual se enmarca el tema de memoria, corresponde a la continuación del proyecto 02-15 de CodelcoTech. En este proyecto se sentaron las bases de los diseños de los dispositivos a probar, los parámetros operacionales y en primera instancia, los integrantes del grupo de trabajo del proyecto bosquejaron un plan de pruebas inicial considerando los factores mencionados hasta este punto.

Estas pruebas se definieron en un total de ciento cincuenta pruebas con cuatro factores y quince niveles heterogéneos, es decir, con una cantidad desigual de niveles por factor. Esto conllevó a que el tiempo necesario para realizar las pruebas fuera incompatible con los plazos estimados del proyecto. Por eso para realizar las pruebas, fue necesario realizar una reducción tanto de factores a tomar en cuenta como de los niveles más importantes dentro de estos factores.

6.1. Reducción de niveles

Es necesario reducir el número de pruebas de acuerdo con estimaciones fundadas para no perturbar la respuesta final del sistema y para que el experimento siga siendo válido. Para esto, se ha decidido llegar a un sistema cúbico de experimentos con tres factores y tres niveles, por lo que es necesario disminuir el número de inchancables a tratar y las ubicaciones posibles de los mismos dentro del sistema.

6.1.1. Tipos de inchancables

En la Figura 6.1, se puede apreciar la distribución de tiempo de detención anual en el chancador primario debido al atollo de distintos inchancables. Dentro de estos, se puede ver que los elementos que más tiempo requieren para su remoción son las vigas y las planchas metálicas, mientras que en tercer lugar están las mallas metálicas. Considerando que estos tres elementos son los que producen un mayor tiempo de detención (setenta y seis por ciento del

tiempo total de detención producido por atollos de inchancables), son lo que se van a utilizar como niveles del factor “inchancable” dentro del experimento, descartando los elementos correspondientes a cañería y riel. Se omitió el uso de hormigón principalmente debido a que el tiempo de detención es bajo y además, este tipo de inchancable no ha sido probado en el sistema de detección del proyecto y al ser un sistema integrado se prefiere su omisión del estudio.

Cabe mencionar que los candidatos mencionados anteriormente, viga, malla y plancha tienen un tiempo de detención alto en el conjunto de todos los eventos. Analizando el tiempo de detención por evento, se estima que para estos tres tipos de inchancables, el tiempo promedio de detención está entre 0,4 y 0,6 hrs. El único evento que produce más tiempo de detención (0,85 hrs/ evento) es cuando aparece hormigón. Este caso se descarta debido a que los casos son más aislados y hasta la fecha no se han realizado pruebas en el sistema de detección utilizando este tipo de inchancables.

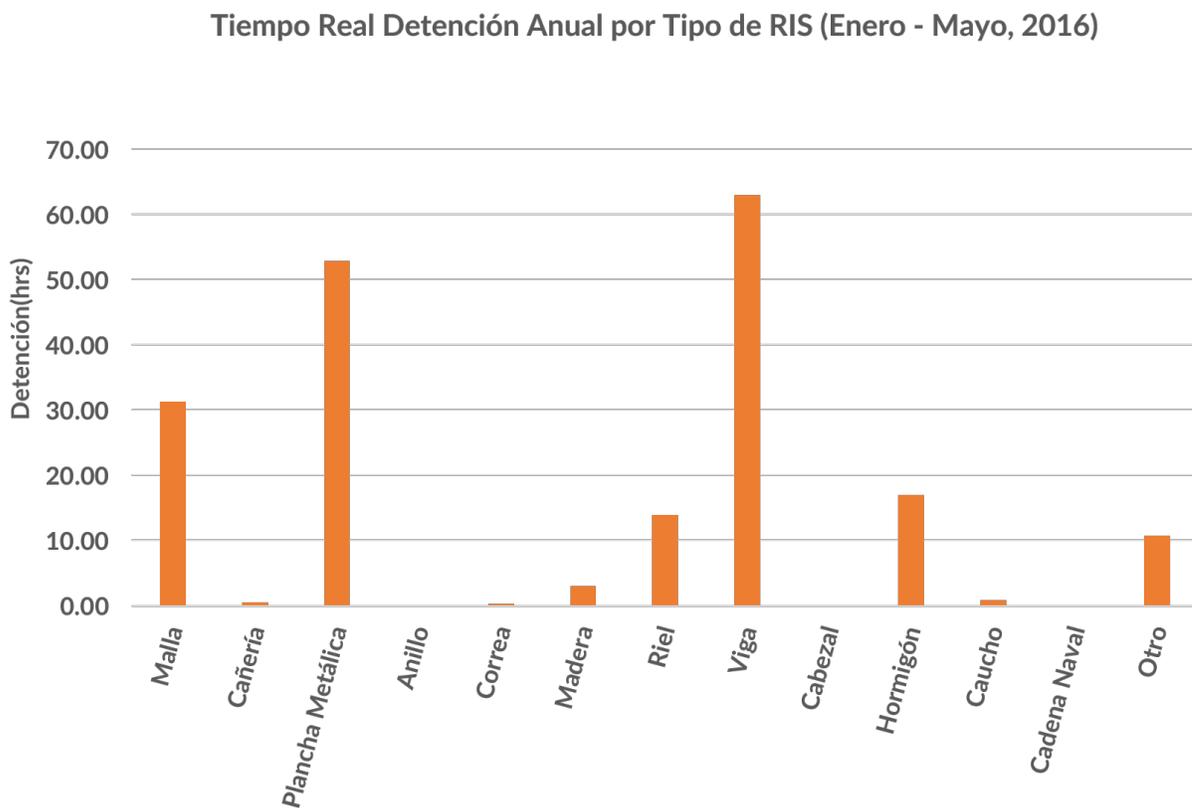


Figura 6.1: Gráfico de tiempo real de detención anual de acuerdo con el tipo de residuo sólido. [2]

6.1.2. Ubicación de inchancables

Por otra parte, en el segundo experimento aún se tiene un factor con cuatro niveles, el que corresponde a la ubicación del inchancable dentro del buzón. Para reducir el número de niveles dentro del factor “ubicación” se debe realizar un experimento preliminar para

determinar la distribución de probabilidad correspondiente al lugar de caída del elemento metálico luego de ser expulsado del alimentador. De acuerdo con el programa inicial de pruebas, la ubicación sobre mineral y bajo mineral son condiciones de borde, por lo que no se eliminarán del proceso experimental. Luego, para descartar entre “extremo izquierdo bajo mineral” y “extremo derecho bajo mineral” se tendrá el sistema que se representa en la Figura 6.2:

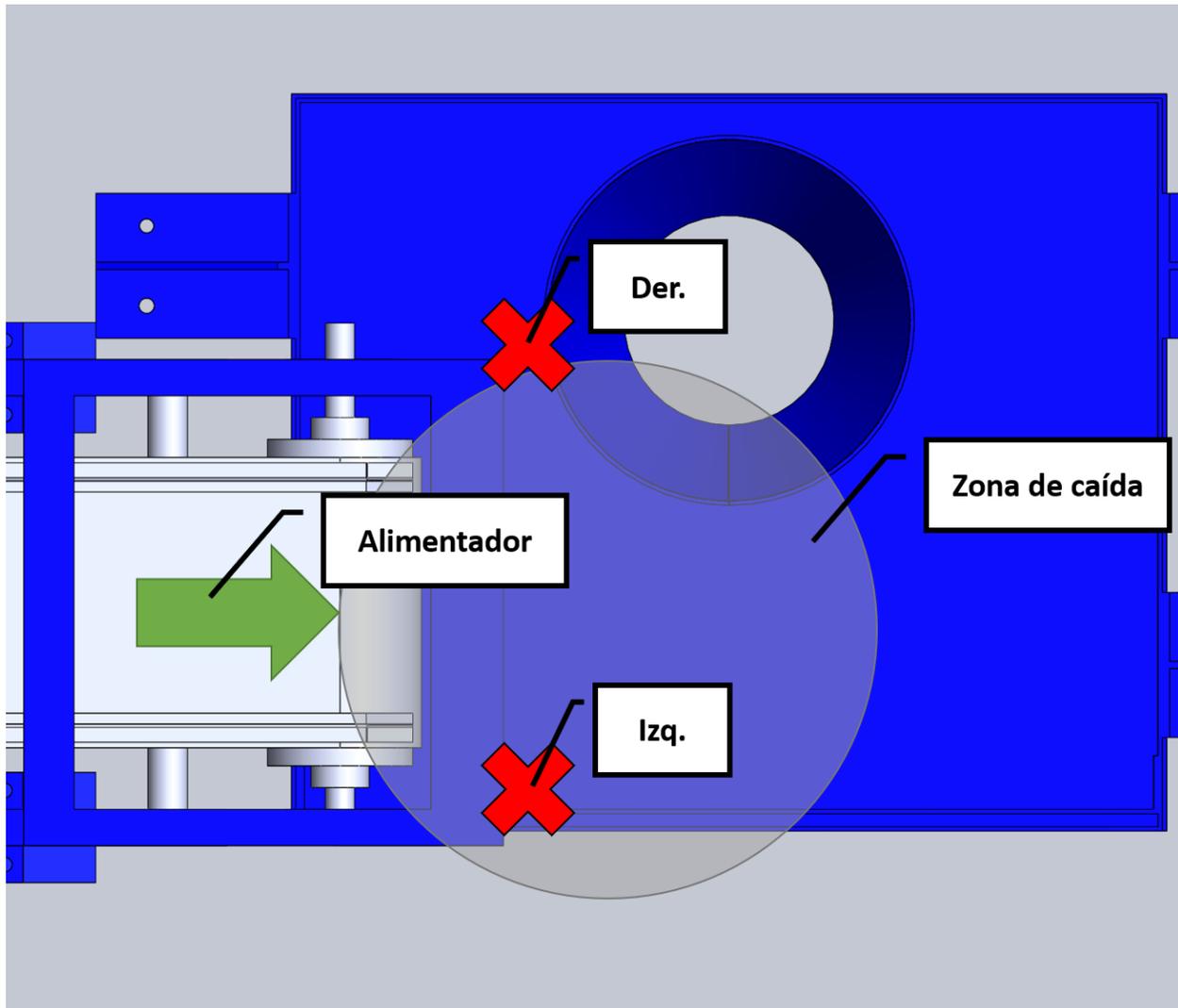


Figura 6.2: Esquema del buzón de extracción

En la Figura 6.2 se puede apreciar que los puntos extremos están marcados con “X” en la izquierda y la derecha del lugar de extracción. Para que el proceso se pueda desarrollar adecuadamente se debe evitar la introducción de condiciones experimentales indeseadas, por lo mismo, se debe proseguir de la siguiente forma para realizar la simulación de ubicación de inchantables:

- Tener la boca del alimentador abierta para simular estado productivo del chancador
- Introducir los elementos inchantables individualmente a la tolva para que el proceso sea similar al de la planta

- Comenzar el funcionamiento del alimentador a una velocidad nominal de 0,35 m/s
- Detectar la presencia del inchancable en el alimentador CT1 y detenerlo
- Tapar la boca del alimentador con el *Dispositivo de protección*
- Reiniciar el avance del alimentador a velocidad mínima hasta observar la caída del inchancable en el buzón de alimentación del chancador
- Analizar y descartar la posición menos probable dentro del buzón

Luego de realizar el procedimiento siete veces, se reduce un nivel en el factor ubicación del inchancable obteniendo niveles homogéneos para todos los factores.

Como se menciona anteriormente, es necesario encontrar la posición espacial más probable dentro del buzón, esto para asignar la condición de “sobre mineral” y “bajo mineral” al inchancable en una posición fija. Por lo tanto, al obtener los datos de caída del material, también estos se pueden utilizar para determinar la ubicación más probable de caída dentro del círculo azul representado en la Figura 6.2 y utilizar esta posición para los experimentos.

Por otra parte, a partir de esta prueba y la distribución de los inchancables dentro del buzón, se puede determinar si existe interacción entre el tipo de inchancable y alguna posición determinada dentro del buzón.

Para determinar efectivamente la posición más probable y discriminar la posición extrema a utilizar, se plantea un experimento inicial siguiendo la metodología descrita anteriormente con un total de treinta y cinco pruebas con cinco inchancables (La viga, malla y plancha de los experimentos anteriores y una barra y planchas soldadas como inchancables adicionales) distintos para obtener un mayor número de datos. El plan de pruebas a realizar se muestra en Sección 10.1 “Plan de pruebas: Selección de ubicación” y en la Tabla 6.1 se muestra la ficha experimental.

Tabla 6.1: Ficha experimental de selección de ubicación

Experimento	Selección de ubicación más probable para la caída de elementos metálicos inchancables
Objetivo	Determinar la ubicación más probable de caída de distintos elementos inchancables dentro del buzón de alimentación de chancador primario
Factores	Inchancable: Barra, Malla, Plancha, Planchas soldadas, Viga
Respuesta	Posición (x,y) dentro del buzón de alimentación.

6.2. Reducción de factores

Luego de haber homogeneizado los niveles dentro de los factores, aún se tiene un número de ensayos que dificulta la realización de estas en un corto periodo de tiempo, debido a que se tienen ochenta y una pruebas para los experimentos uno y dos. Por lo tanto, se desea realizar un experimento inicial para lograr eliminar un factor dentro del experimento. Para esto, se

ha definido el tiempo t como variable de decisión a tomar en cuenta para el descarte de un factor. Se tienen 3 tiempos según lo siguiente:

$$t_1 = t(\textit{Dispositivo de protección}, \textit{Volumen Dispositivo 1}, \textit{Ubicación}) \quad (6.1)$$

$$t_2 = t(\textit{Dispositivo 1}, \textit{Inchancable}) \quad (6.2)$$

$$t_3 = t(\textit{Dispositivo de protección}, \textit{Volumen Dispositivo 1}, \textit{Ubicación}) \quad (6.3)$$

El tiempo t_1 corresponde al tiempo de traslado del *Dispositivo 1* desde su posición inicial hasta la posición en donde se encuentra el inchancable. Este t_1 depende del *Dispositivo de protección*, volumen del *Dispositivo 1* y de la ubicación del elemento metálico.

El tiempo t_2 simboliza la demora del agarre del inchancable realizado por el *Dispositivo 1*. Este depende solamente del *Dispositivo 1* y del tipo de inchancable.

Finalmente, el tiempo t_3 es el tiempo de vuelta del brazo a su posición inicial. Este tiempo t_3 igualmente sólo depende del *Dispositivo de protección*, volumen del *Dispositivo 1* y la ubicación del material.

El problema relacionado con el *Dispositivo de protección* es principalmente la reducción de las maniobras posibles por el operador debido al volumen del *Dispositivo de protección* y si un diseño de estos dispositivos complica mucho la operación de extracción, entonces este diseño debe ser descartado. Por esto, se puede ver que solamente el tiempo t_1 y t_3 dependen del *Dispositivo de protección*.

Considerando la simplificación, que el volumen de los tres *Dispositivo 1* disponibles es similar, se puede concluir que el cambio entre estas no influirá en la variación de los tiempos t_1 y t_3 , por otra parte, también es posible apreciar que la ubicación es un factor en el cambio de los tiempos previamente mencionados, pero es posible fijar una posición del inchancable para las pruebas para posteriormente eliminar la dependencia de la ubicación. Finalmente se calculan los tiempos como sigue:

$$t_1 = t(\textit{Dispositivo de protección}) \quad (6.4)$$

$$t_3 = t(\textit{Dispositivo de protección}) \quad (6.5)$$

Con esto, se espera determinar qué tipo de *Dispositivo de protección* es el más adecuado para reducir el tiempo de traslado con y sin inchancable a su posición inicial. Para el plan de pruebas de selección de Dispositivos de protección se muestra la ficha experimental en la Tabla 6.2:

Tabla 6.2: Ficha experimental para selección del *Dispositivo de protección*

Experimento	Selección de <i>Dispositivo de protección</i> para la protección del buzón de extracción en maqueta 1:10 de chancador primario
Objetivo	Determinar que diseño es capaz de reducir el tiempo de traslado y retorno del brazo hidráulico con respecto a la influencia del <i>Dispositivo de protección</i> dentro del sistema. Además, medir la facilidad de remoción del <i>Dispositivo de protección</i> del sistema, con material sobre el, mediante un puente grúa ubicado en la parte superior de la maqueta.
Factores	Diseño de <i>Dispositivos de protección</i> : {Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
Respuesta	Tiempo: $t_1 + t_3$ Calidad de retiro del <i>Dispositivo de protección</i> : {Buena, Regular, Mala}

El experimento descrito en la Tabla 6.2 tiene solamente un factor, tres niveles a analizar y tres pruebas a realizar. Debido a que es un factor que influye directamente en dos de los tres experimentos siguientes y se espera encontrar eficientemente qué *Dispositivo de protección* es el más conveniente, se realizarán 3 replicados para determinar que diseño es el más adecuado para emplear en el procedimiento posterior.

Cabe destacar que se deben realizar las pruebas de forma aleatoria, para así eliminar el posible efecto de la covariable, que es la curva de aprendizaje del operador de la máquina. En la Sección 10.2 “Plan de pruebas: selección de *Dispositivo de protección*” se muestra la tabla con el plan de pruebas y el orden de aplicación de estas de acuerdo a un algoritmo *random* de *Python*.

Finalmente, con lo anterior es posible fijar el factor de *Dispositivo de protección* y por consiguiente eliminarlo de los experimentos siguientes y usar el óptimo para el proceso de extracción y que además presente las mejores capacidades de remoción desde el buzón mediante el puente grúa.

Capítulo 7

Experimentos preliminares

7.1. Experimento preliminar: Selección de ubicación

7.1.1. Resultados

Para determinar una ubicación estándar de los inchancables se estableció un plan de ejecución de treinta y cinco tests donde se eligieron cinco tipos de inchancables distintos, una barra, malla, plancha, viga y un par de planchas soldadas de forma perpendicular.

Estos inchancables fueron lanzados siete veces cada uno para cumplir con las pruebas estipuladas. Con esto se espera fijar una ubicación para los experimentos de selección de *Dispositivo de protección* y para el de extracción mediante *Dispositivo 1* desde el buzón de alimentación y analizar los tiempos de traslado y captura de acuerdo con estas variables fijas.

Distribución de caída de material inchancable en el buzón de alimentación

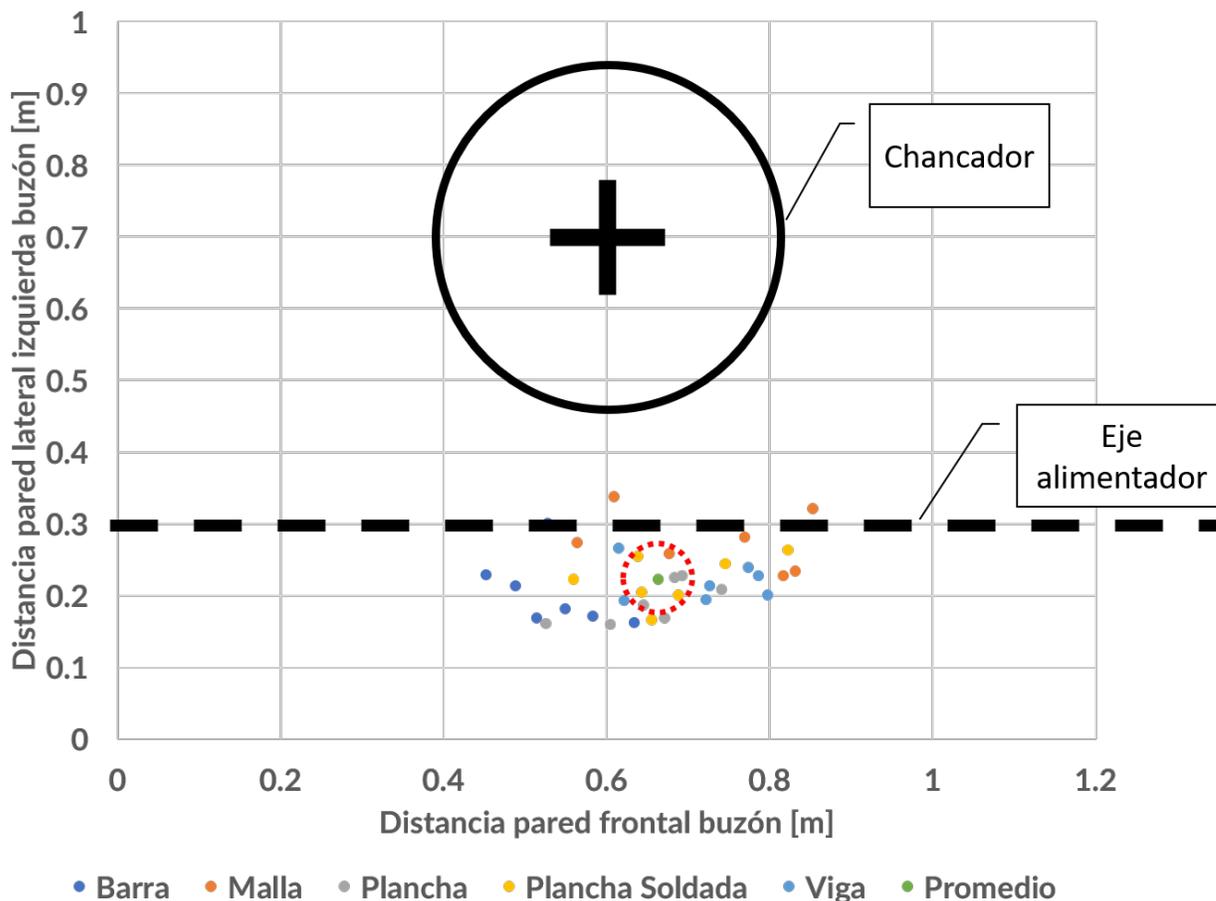


Figura 7.1: Gráfico de distribución de la caída de inchancables dentro del buzón de alimentación

En la Figura 7.1 se muestra una nube de puntos representando todas ubicaciones obtenidas a partir de las pruebas para cada uno de los inchancables. A partir de estos datos se obtuvo el promedio de posición entre todas las pruebas y se graficó en verde. Esta última posición promedio es la elegida para continuar las pruebas experimentales.

7.2. Experimento preliminar: Selección de *Dispositivo de protección*

7.2.1. Resultados

Para el experimento de selección de *Dispositivo de protección* se estipularon tres replicados para los tres *Dispositivos de protección*. Se determinó que el *Dispositivo de protección* no

interactuaba con el tipo de inchancable ni con la ubicación de este, sino que solamente existía interacción con el *Dispositivo 1*. Para reducir un factor en las siguientes pruebas se decidió fijar la variable de “*Dispositivo 1*” para analizar individualmente el desempeño de cada diseño de los *Dispositivos de protección*.

Se utilizó el primer diseño de *Dispositivo 1* para tomar los tiempos de traslado del dispositivo desde un punto inicial hasta la ubicación del inchancable y volver a su punto de partida. Se eligió el primer diseño debido a que volumétricamente representa el caso promedio entre los tres diseños de *Dispositivo 1*. Con esto se espera entender cómo afecta el *Dispositivo de protección* en las operaciones de movimientos y maniobras de los *Dispositivos 1* dentro del buzón de extracción.

A continuación, se muestran los datos obtenidos del tiempo total de traslado del *Dispositivo 1* hacia el inchancable y su posterior retorno para los tres replicados y el promedio de estos.

Tabla 7.1: Datos obtenidos para los tiempos de maniobra del *Dispositivo 1* frente a los distintos *Dispositivos de protección*

Diseño	Replicado 1	Replicado 2	Replicado 3	Total	Promedio
Diseño 1	65	50	39	154	51,3
Diseño 2	93	88	72	253	84,3
Diseño 3	138	103	83	324	108,0

A partir de estos datos se construye un gráfico que representa de mejor forma el comportamiento de cada diseño de *Dispositivo de protección*. Se aprecia que el diseño 1 del *Dispositivo de protección* es el que entrega un menor tiempo de operación al brazo-*Dispositivo 1* independiente del replicado y en el promedio total de las pruebas.

Tiempo de maniobra para los distintos diseños de Dispositivos de protección

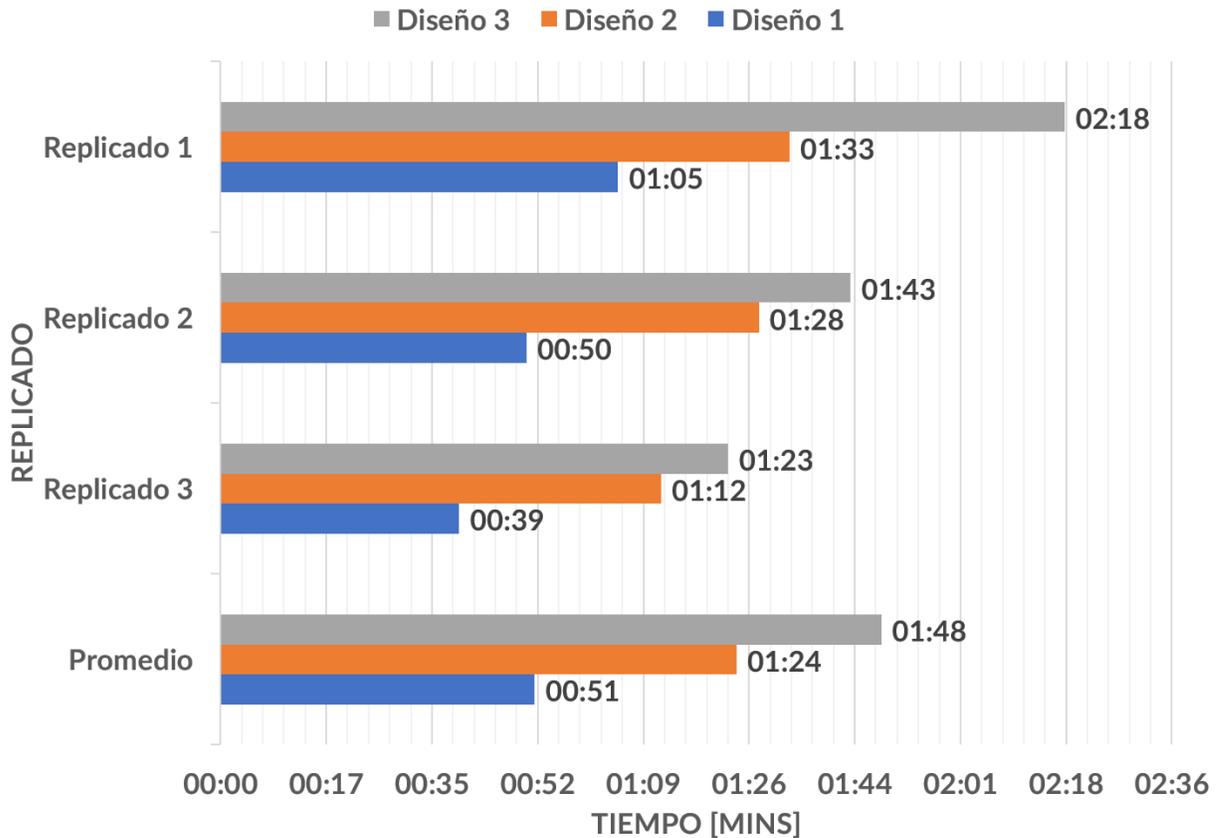


Figura 7.2: Gráfico de tiempos de maniobra del *Dispositivo 1* con respecto a cada *Dispositivo de protección*

7.2.2. Análisis

Para llevar a cabo un análisis acabado de las pruebas se propone un análisis de varianza de los datos obtenidos para verificar la validez de recomendación un diseño por sobre otro. Para esto se plantean dos hipótesis:

$$H_0 = \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 \quad (7.1)$$

$$H_1 = \text{Los promedios son diferentes} \quad (7.2)$$

La dos hipótesis presentadas anteriormente son simples, pero representan los fundamentos [20] para verificar que efectivamente los diseños de los *Dispositivos de protección* afectan a los tiempos de maniobra de los *Dispositivos 1*. La hipótesis nula (Ecuación 7.1) estipula que los promedios son iguales, es decir, que experimentalmente el error fue tan grande que aún

no se puede discernir si el promedio del tiempo varía en función del diseño del *Dispositivo de protección* o que el desempeño de los *Dispositivos 1* son aleatorios e independientes. Por otra parte, la segunda hipótesis (Ecuación 7.2) dice que efectivamente los promedios son distintos a través de las pruebas experimentales.

A continuación, se muestra la Tabla 7.2 de datos del análisis de varianza para el experimento. Para el experimento de selección de *Dispositivo de protección* se considera que existe un total de ocho grados de libertad considerando que estos se calculan de la forma $N - 1$, donde N corresponde al total de pruebas realizadas. Los grados de libertad de la variable diseño se calcula como $a - 1$, donde a es la cantidad de tratamiento, en este caso tres tratamientos (Diseño 1, Diseño 2 y Diseño 3) y el error es la diferencia entre los anteriores mencionados, en este caso seis grados de libertad.

Tabla 7.2: Análisis de varianza para el experimento preliminar de selección de *Dispositivo de protección*

Var.	Suma de cuad.	Gr. de libertad	Promedio cuadrado	F_0
Diseño	4860,22	2	2430,11	6,84110103
Error	2131,33	6	355,22	
Total	6991,56	8		

A partir de la Tabla 7.2 se obtuvo el cociente F_0 entre la variable de interés y el error experimental, el valor de F_0 es 6,8411 de acuerdo a la tabla de distribución F , para el caso de este experimento, que se tienen dos y seis grados de libertad para la variable y el error respectivamente, se tiene un valor de $F = 5,14$ considerando un nivel de significancia del 95 % de acuerdo a la tabla de distribución F . [22]

A partir de los dos valores de F y F_0 se nota que $F_0 > F$, es decir, $6,8411 > 5,14$ lo que implica que la hipótesis nula se rechaza efectivamente con un 95 % de significancia, con esto se puede indicar que entonces el tiempo de maniobra se ve afectado por el diseño del *Dispositivo de protección*. Tomando esto en cuenta se decide proseguir con las pruebas experimentales utilizando el primer diseño de *Dispositivo de protección* para lograr reducir el tiempo de maniobra del brazo-*Dispositivo 1* dentro del espacio de trabajo de la maqueta de chancado.

Capítulo 8

Resultados

8.1. Experimento 1: Extracción mediante *Dispositivo 1* desde frente del alimentador

Al haber realizado la reducción de niveles (Sección 6.1) y factores (Sección 6.2) en conjunto con haber disminuido el número de pruebas, se presenta la ficha de descripción del experimento 1.

Tabla 8.1: Ficha descriptiva para experimento 1 para la extracción mediante *Dispositivo 1* desde frente del alimentador

Experimento	Selección del <i>Dispositivo 1</i> para extracción desde frente del alimentador
Objetivo	Dar una recomendación sobre que configuración es la óptima a utilizar en el proceso de captura de material inchancable desde frente del alimentador en maqueta 1:10 de chancador primario usando el <i>Dispositivo 1</i>
Factores	Diseño de <i>Dispositivo 1</i> : {Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
	Ubicación del inchancable: {Sobre mineral, Bajo mineral, Un costado del apron}
	Inchancable: {Viga, Malla, Plancha}
Respuesta	Tiempo de captura: X [segundos]
	Calidad de captura: {Buena / Regular / Mala}
	Estabilidad del dispositivo: {Buena / Regular / Mala}
	Porcentaje de captura: X [%]

Al haber determinado los factores y ecuaciones de solapamiento, se considera la siguiente notación para los factores:

- A: Diseño del *Dispositivo 1*
- B: Tipo de inchancable

- Ubicación del inchancable

Tomando en cuenta lo anterior, se puede establecer que entre el factor A y el factor C no existe interacción debido a que intuitivamente, el cambio en el diseño de *Dispositivo 1* no afecta en donde se encuentra el elemento metálico. Por otra parte, los factores B y C de igual manera se asume que no interactúan debido a que el tipo de inchancable no afecta en la ubicación dentro del alimentador.

Finalmente, donde existe una interacción es en el caso del factor A y B, donde el diseño del *Dispositivo 1* afecta directamente en la respuesta cuando interactúa con el tipo de inchancable, debido a que el tiempo de captura va a cambiar de acuerdo con ambos factores. Otros aspectos por considerar son las interacciones de mayor nivel, en este caso, de tercer grado, donde se puede asumir que son despreciables, debido a que anteriormente se ha comentado que a pesar de que existe interacción entre A y B, este conjunto no afecta directamente en la determinación de la ubicación del inchancable, que corresponde al factor C, por lo tanto, no existe interacción de tercer nivel.

Realizando las simplificaciones anteriormente mencionadas se puede concluir que las ecuaciones de solapamiento se ven definidas como:

$$A = A + BC + ABC \rightarrow A = A \quad (8.1)$$

$$B = B + AC^2 + ABC^2 \rightarrow B = B \quad (8.2)$$

$$C = C + AB^2 + AB^2C \rightarrow C = C + AB \quad (8.3)$$

$$AB = AB + AC + BC^2 \rightarrow AB = AB \quad (8.4)$$

Luego, se puede apreciar que la única estructura que queda solapada de forma ambigua es el caso del factor C, que también está confundido con la interacción de factores AB. Por lo tanto, para este caso, se analizará de acuerdo con cada caso con respecto a la respuesta a medir, debido a que el factor C, influye en el tiempo de traslado, pero no en el tiempo de captura, mientras que la interacción AB no afecta en el tiempo de traslado, pero sí afecta directamente en el tiempo de captura del inchancable.

Por lo tanto, con los factores definidos anteriormente se puede producir la simplificación óptima de factores para el posterior análisis de datos.

Debido a la antes mencionada covariable, se ha decidido realizar 3 replicados de las 9 pruebas posibles y al igual que con la prueba de los *Dispositivos de protección*.

En la Sección 10.3 “Plan de pruebas: Extracción mediante *Dispositivo 1* desde frente del alimentador” se muestra la tabla de pruebas a realizar y el respectivo orden de aplicación.

8.1.1. Tiempo de captura y tiempo de traslado

Con respecto al tiempo de captura, este contempla la operación del movimiento del brazo desde la posición inicial hasta llegar frente del alimentador, luego de haber hecho funcionar el alimentador lentamente para que el inchancable previamente detectado avance hasta la cabeza de la correa. Luego de esto, el *Dispositivo 1* ingresa al alimentador para realizar la captura del inchancable que se encuentra al alcance del dispositivo para posteriormente retirarlo y trasladarlo a una zona auxiliar de descarga.

El tiempo de captura calculado también considera las capturas fallidas, es decir, cuando la manipulación del *Dispositivo 1* dentro del alimentador produce que el inchancable en cuestión deslice y caiga dentro del buzón de alimentación del chancador primario y su captura no pudo ser realizada directamente desde el alimentador.

A partir del gráfico a continuación se puede apreciar que el tiempo de captura está entre los trescientos y quinientos cincuenta segundos aproximadamente, donde el segundo diseño tiene un tiempo promedio de captura de doscientos noventa y seis segundos. Por otra parte, como se menciona anteriormente dentro del tiempo de captura se consideran las capturas fallidas y exitosas, considerando sólo las capturas correctas, el diseño dos tiene un promedio de captura de ciento cuarenta y siete segundos, mientras que el primer diseño tiene un tiempo promedio de operación de doscientos cincuenta y seis segundos. Por lo tanto, en cualquier caso el segundo dispositivo es el que tiene mejor desempeño con respecto al tiempo de captura de los inchancables.

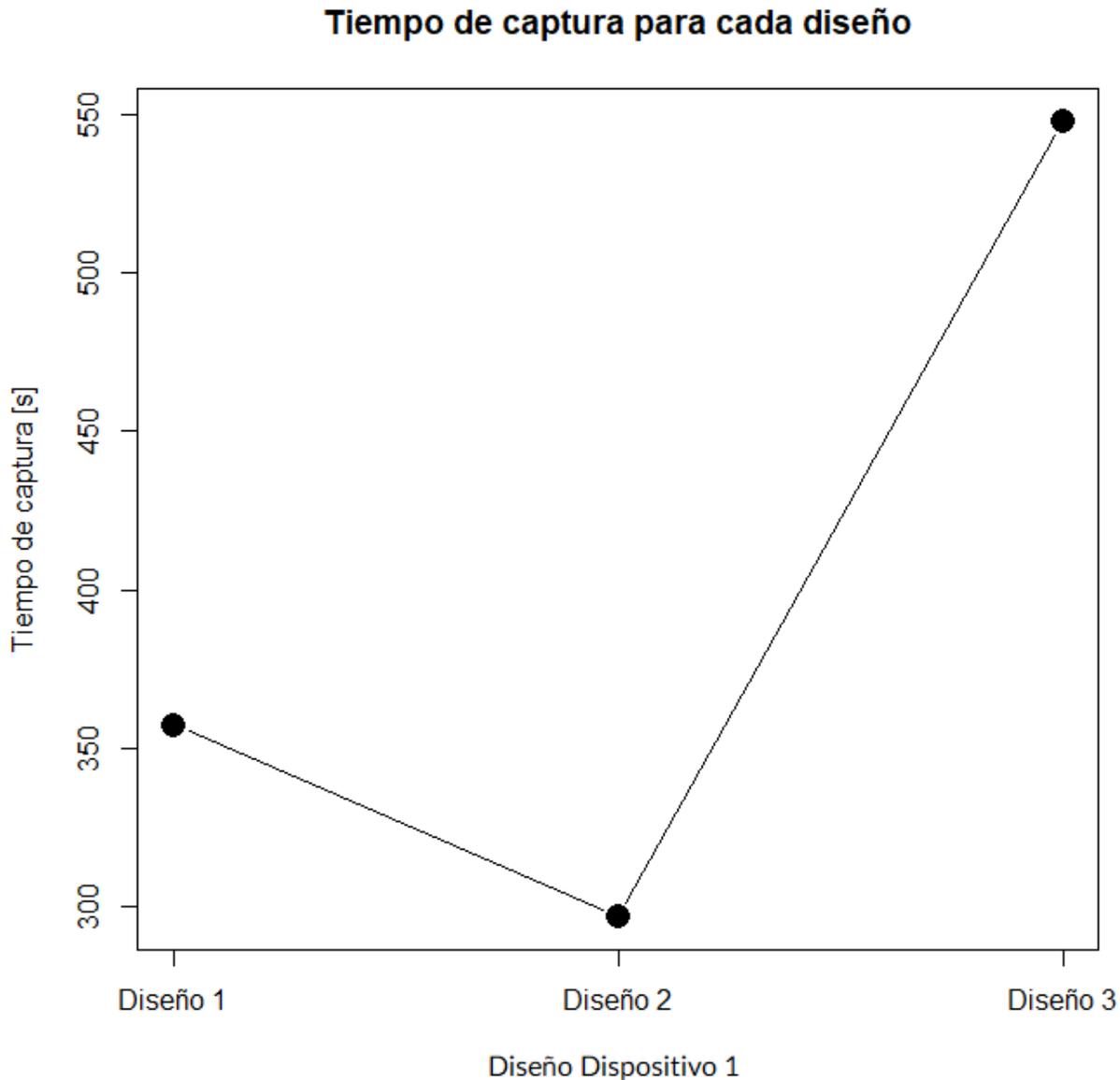


Figura 8.1: Tiempo de captura promedio para cada diseño del *Dispositivo 1*

En el siguiente gráfico se muestra además la interacción del diseño de *Dispositivo 1* en conjunto con el tipo de inchantable extraído. En esta imagen se puede ver que a pesar de que el tiempo de captura del primer diseño es mayor al del segundo diseño, se produce una variación mucho menor en los datos lo que representa un mecanismo más robusto, por otra parte, para el segundo diseño se produce capturas rápidas para el caso de la malla, llegando a incluso tiempos cercanos a los cien segundos de operación.

Tiempo de captura para cada diseño e inchancable

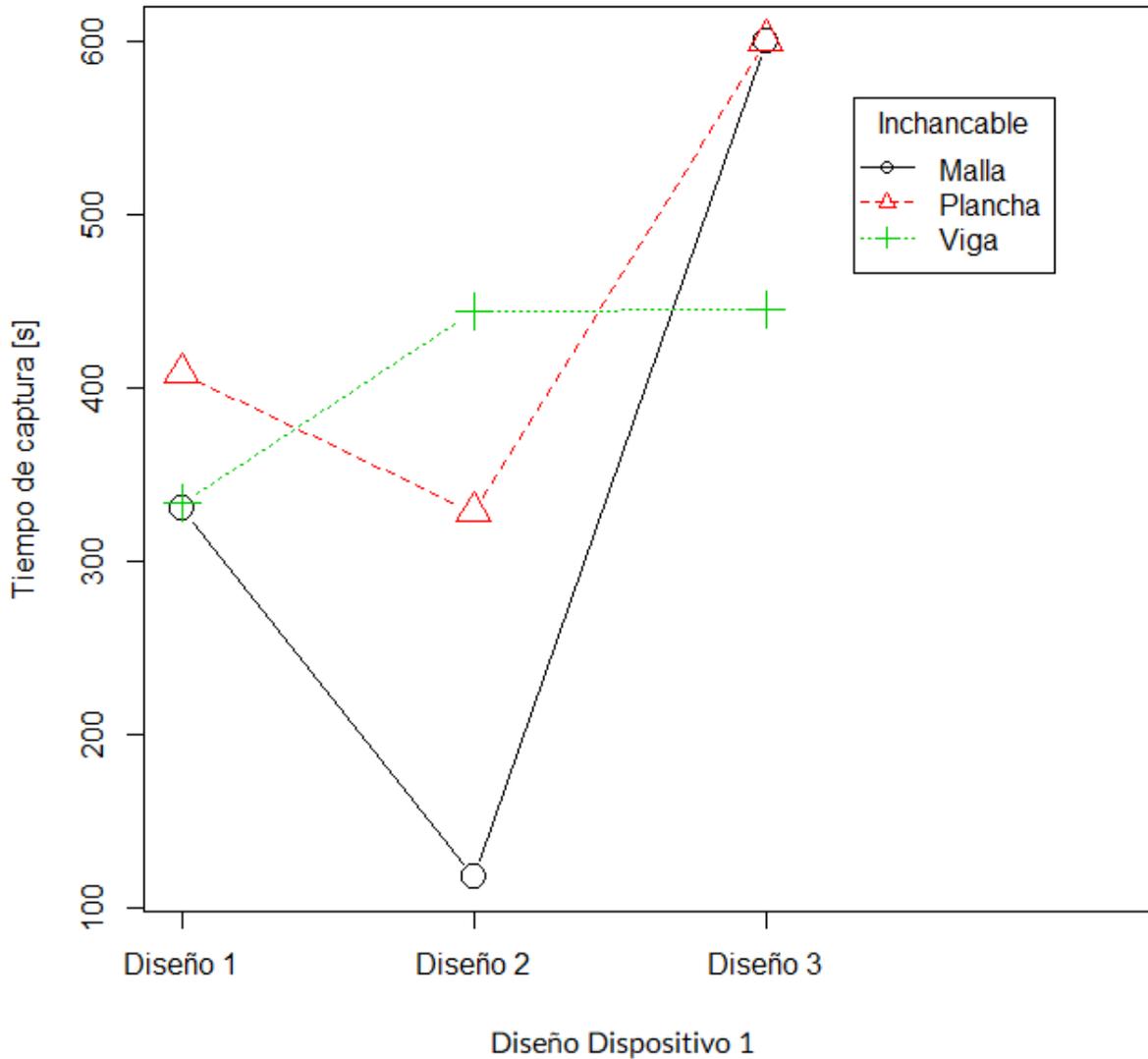


Figura 8.2: Tiempo de captura promedio para cada diseño del *Dispositivo 1* considerando la interacción con el tipo de inchantable

Con respecto a la interacción del tiempo de captura y diseño con la ubicación del inchantable en cuestión, se produce un efecto similar al anterior, es decir, el primer diseño tiene una variación menor de los datos lo que implica que se desempeña de buena forma independiente de donde esté ubicado en inchantable capturado.

Tiempo de captura para cada diseño y ubicación

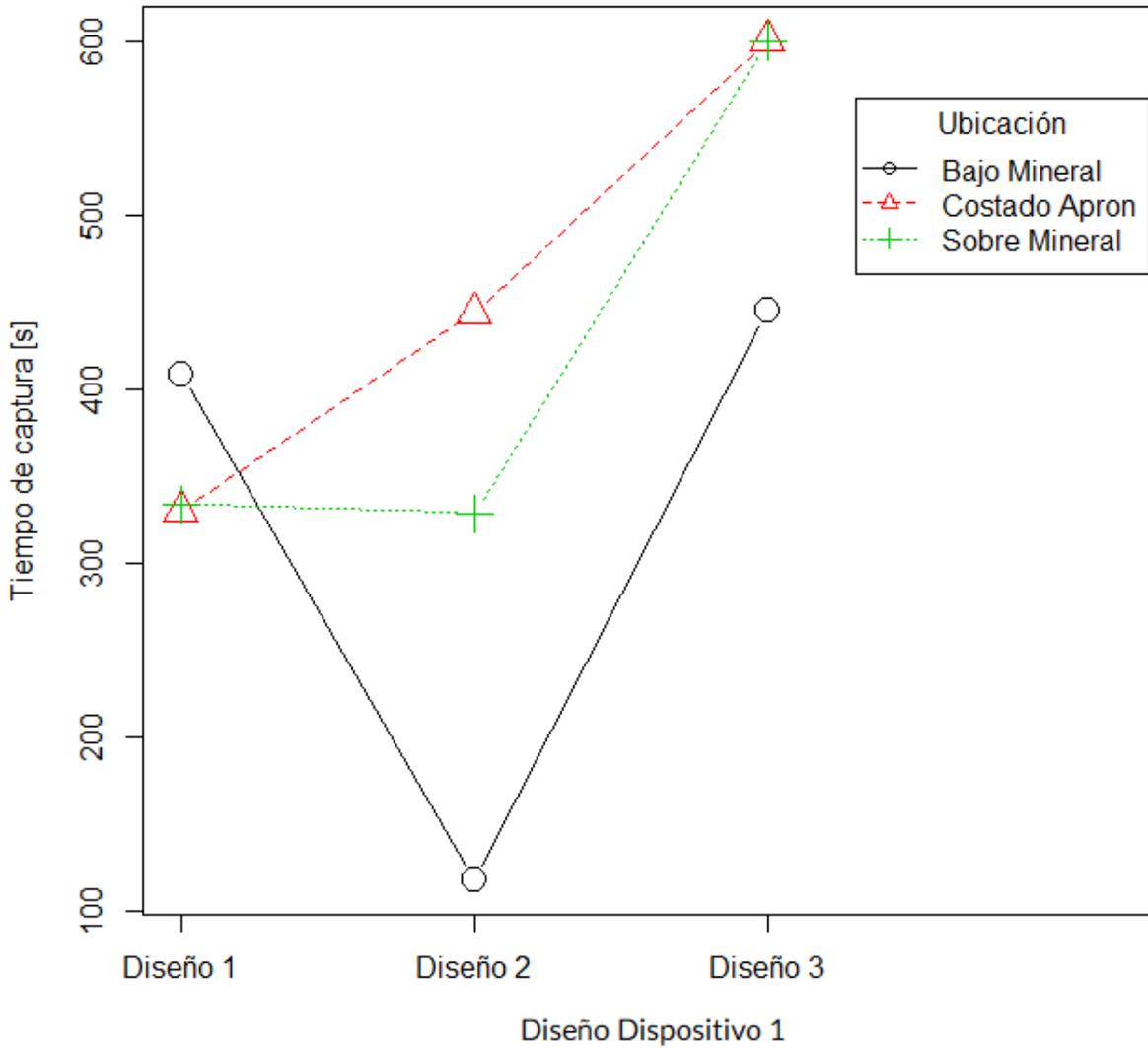


Figura 8.3: Tiempo de captura promedio para cada diseño del *Dispositivo 1* considerando la interacción con la ubicación del inchancable dentro del alimentador

8.1.2. Calidad de captura, estabilidad del dispositivo y funcionalidad adicional

La calidad de captura promedio de los dispositivos se puede ver a continuación donde se destaca que en los casos del primer y segundo diseño se obtienen dos puntos en la escala impuesta, mientras que el tercer diseño es el que tiene un menor puntaje promediando cercano a un punto.

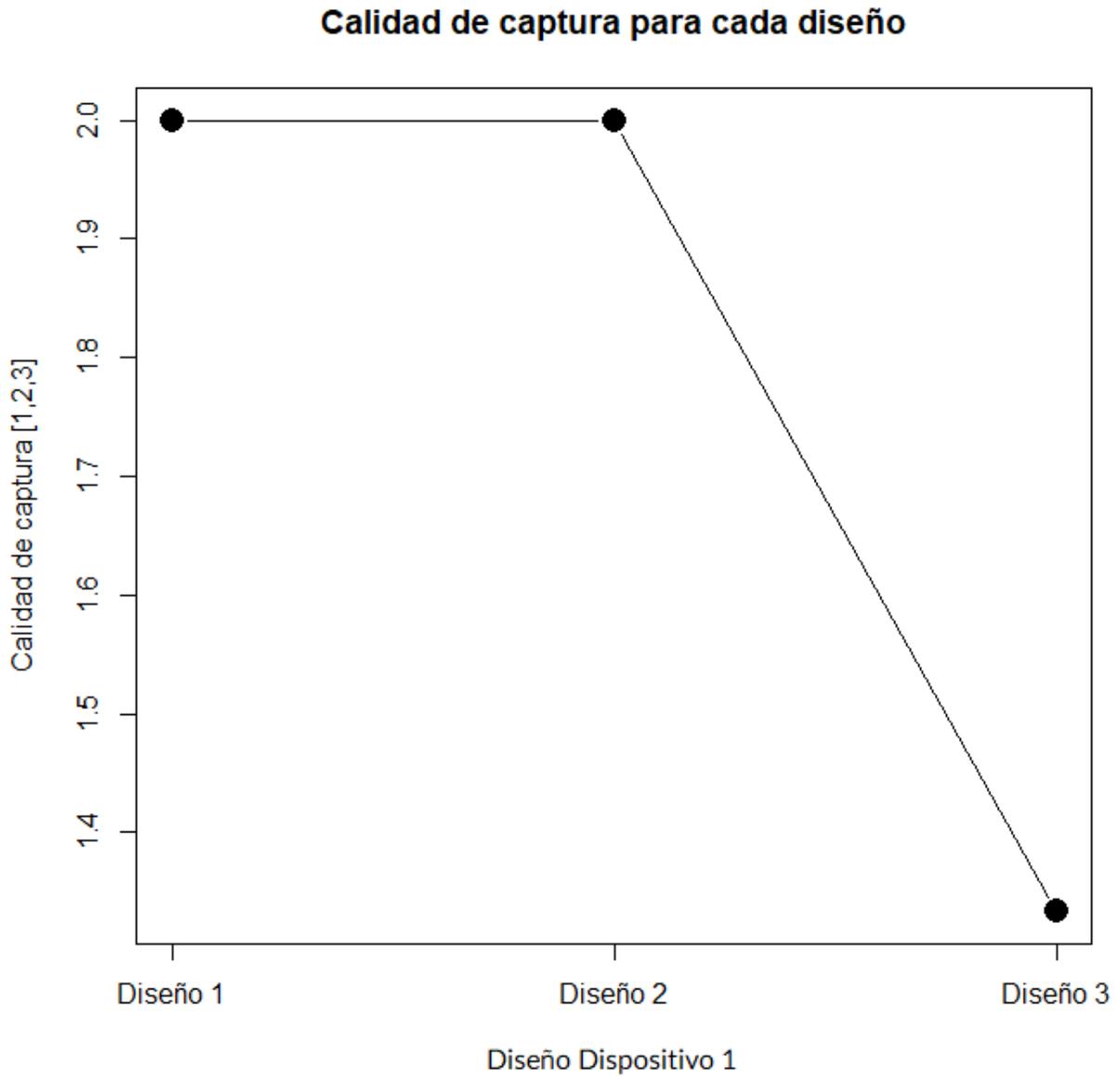


Figura 8.4: Calidad de captura promedio para cada diseño del *Dispositivo 1*

Por otra parte, en la estabilidad del dispositivo se ven algunas diferencias sutiles donde el primer diseño tiene un desempeño levemente mejor que el segundo diseño, pero en ambos casos sobre la tercera opción.

Estabilidad del dispositivo para cada diseño

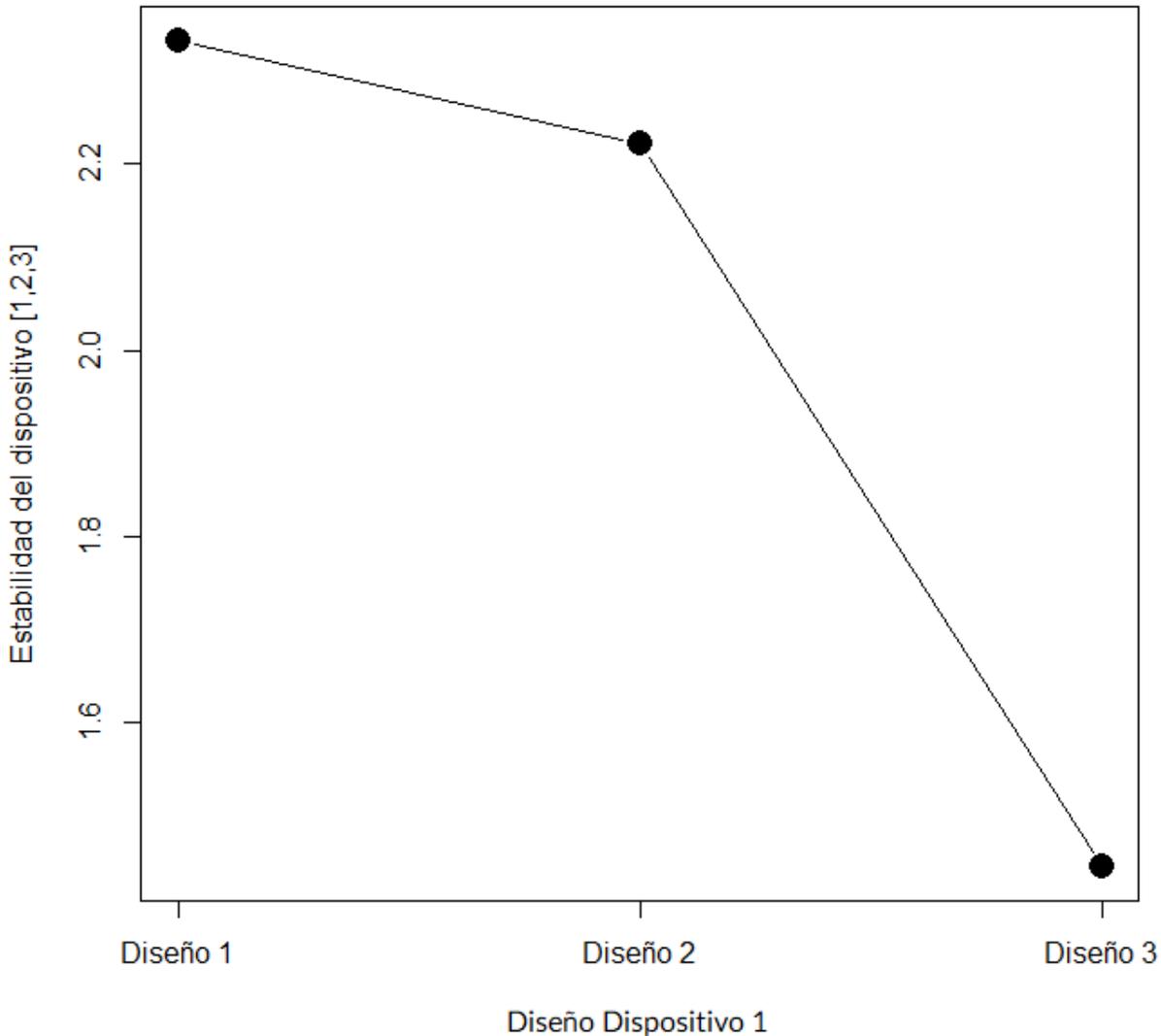


Figura 8.5: Estabilidad promedio del dispositivo para cada diseño del *Dispositivo 1*

Al realizar la operación de captura directamente desde el alimentador existe la posibilidad de que durante el proceso el inchancable caiga dentro del buzón de alimentación del chancador primario por lo que la captura no siempre es exitosa. A partir de esto se presenta el porcentaje de efectividad de cada diseño de garra hidráulica disponible, donde se destaca que ambos diseños, el primero y el segundo, tienen una efectividad por sobre el sesenta y cinco por ciento, mientras que el tercer diseño tiene una efectividad que ronda el diez por ciento.

Porcentaje de captura para cada diseño

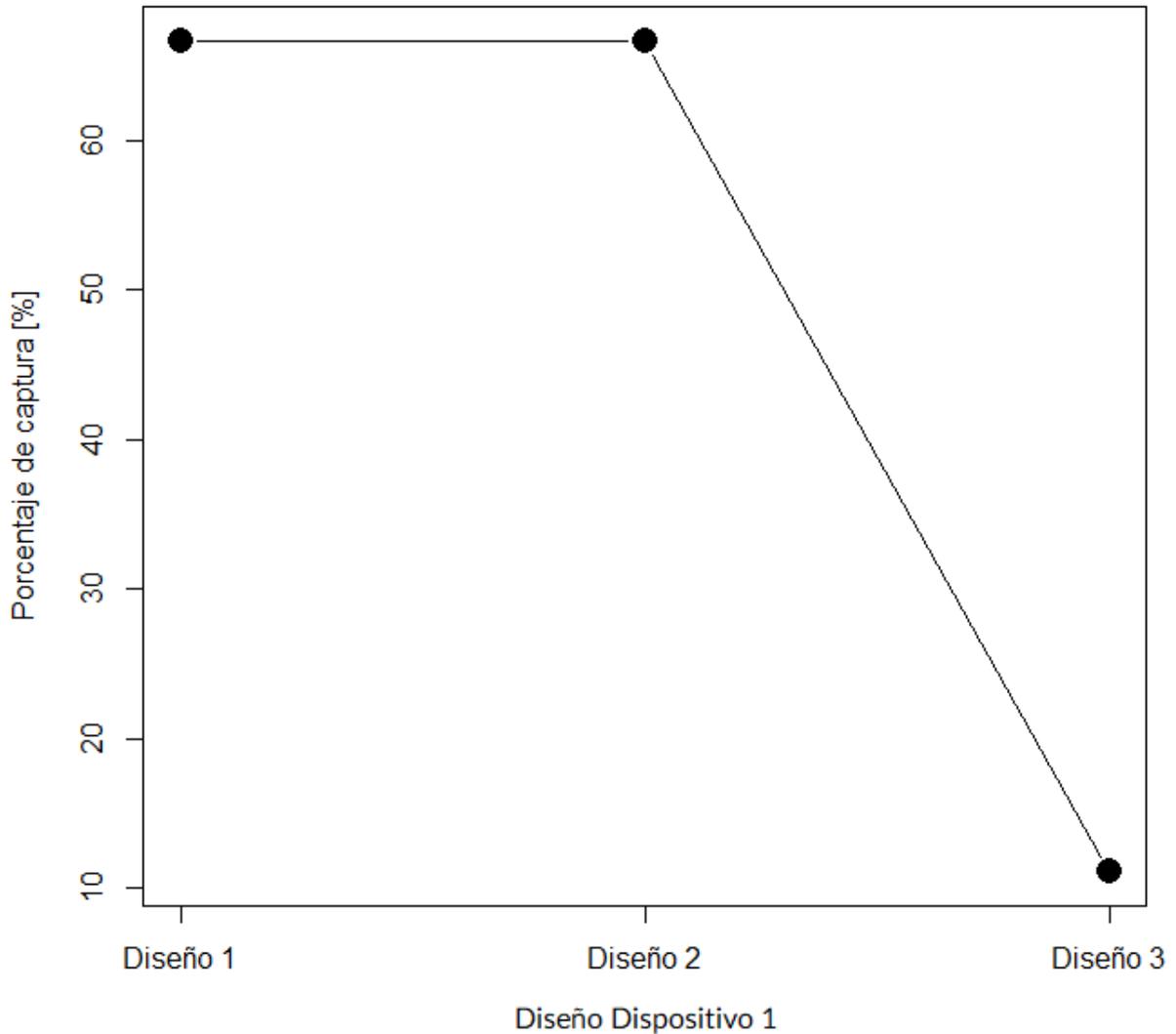


Figura 8.6: Porcentaje de captura promedio para cada diseño del *dispositivo 1*

8.1.3. Análisis

Para verificar los datos obtenidos a partir de las pruebas y determinar el nivel de influencia que los factores tienen en las respuestas se realiza un análisis de varianza. Este análisis puede ser revisado en la Sección 10.6 donde se realiza el mismo proceso para todas las respuestas. A partir de este análisis se pudo determinar que la única respuesta que se ve influenciada por los factores estudiados es el porcentaje de captura, específicamente por el diseño de las garras.

Para lograr discernir de mejor forma la efectividad de captura, en el siguiente gráfico se

muestra la interacción con el tipo de inchancable capturado, donde se puede ver que en el caso del primer diseño se logra la misma efectividad para todos los casos independiente del tipo de inchancable involucrado. Por otra parte, en el caso del segundo diseño se tiene una variación considerable entre las pruebas de captura por lo que no se presenta como un caso tan robusto para realizar la captura de inchancables. A pesar de eso, el segundo diseño es el que tiene el proceso de captura más rápido de las tres opciones por lo que no se debe descartar su uso.

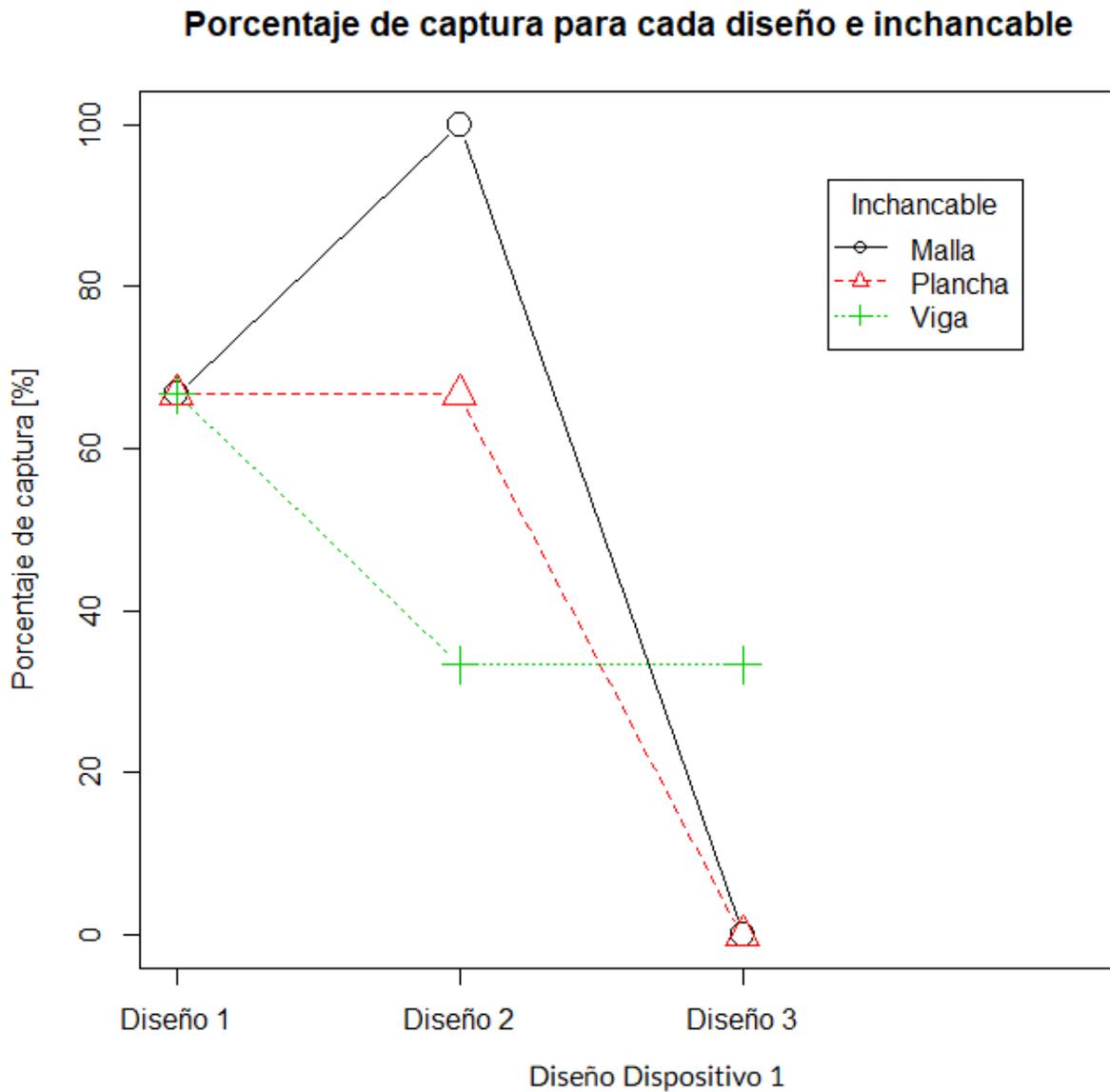


Figura 8.7: Porcentaje de captura para cada diseño del *Dispositivo 1* considerando la interacción con el tipo de inchancable capturado

Analizando el caso del porcentaje de captura interactuando con la ubicación del inchancable, se puede ver en el siguiente gráfico que el primer diseño es capaz de capturar con la

misma efectividad en todas las ubicaciones del inchantable, por otra parte, el segundo diseño es capaz de capturar la totalidad de inchantables cuando están en la ubicación de “Bajo mineral” mientras que el tercer diseño que es el que tiene peor rendimiento debido a que sólo pudo capturar cuando los inchantables estaban ubicados “Bajo mineral” y aún así con una tasa de captura menor al cuarenta por ciento.

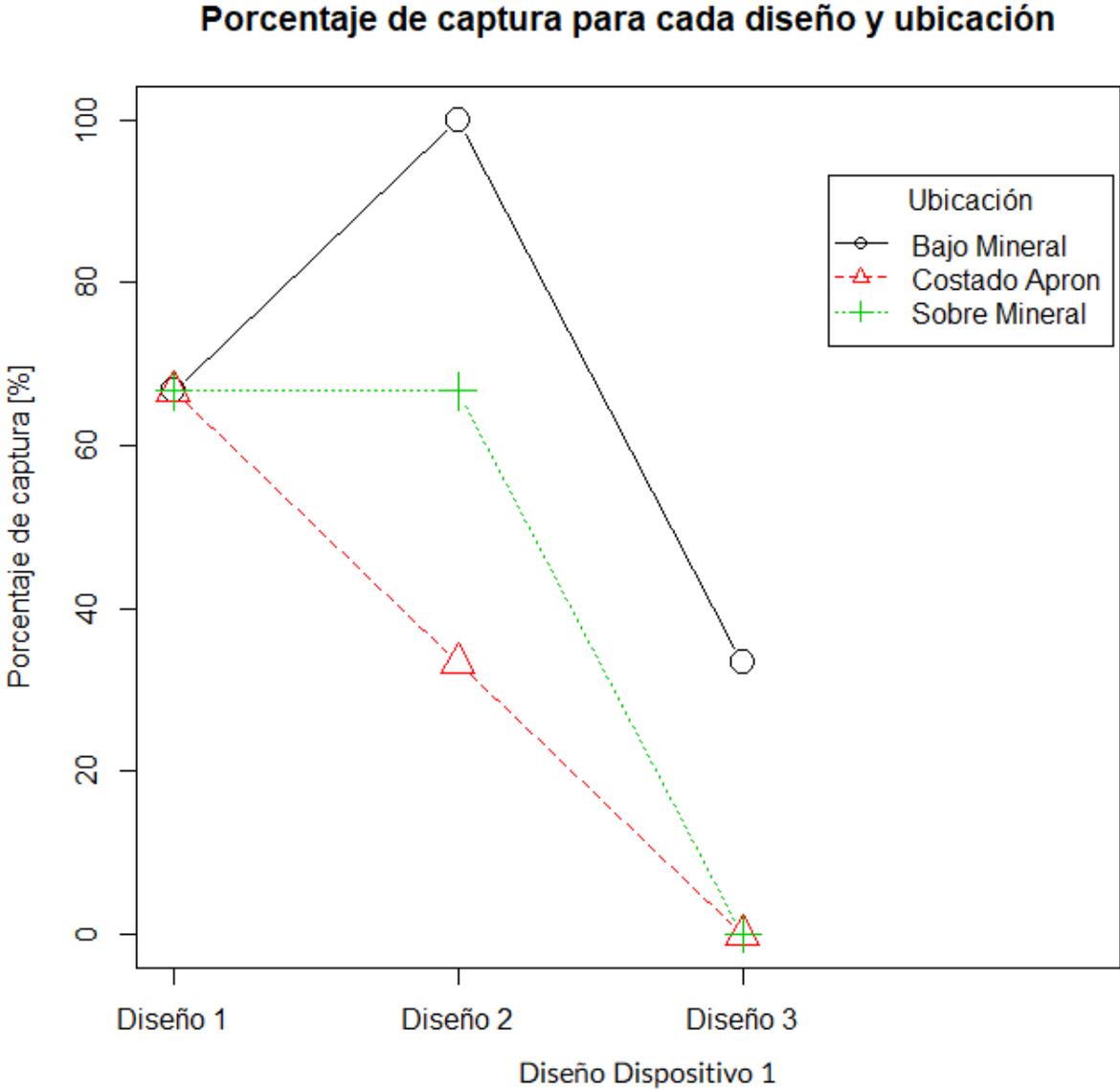


Figura 8.8: Porcentaje de captura para cada diseño del *Dispositivo 1* considerando la interacción con la ubicación del inchantable capturado

8.1.4. Selección de candidato

Para realizar la selección de candidato se hace una conversión del tiempo y porcentaje de captura para compatibilizar la escala con el resto de las respuestas de calidad de captura y estabilidad del dispositivo. Para el caso del tiempo de captura se estipula que seis cientos segundos corresponden a un punto y doscientos segundos equivalen a tres puntos. A partir de esto se utiliza una escala lineal para otorgar el puntaje. Para el caso del porcentaje de captura se estipula que un cien por ciento de índice de captura equivalen a tres puntos mientras que cero por ciento de captura equivale a un punto e igualmente se utiliza una escala lineal para los porcentajes entre medio.

A partir de lo anterior se construye una ecuación de desempeño ponderando los puntajes de las cuatro respuestas de “Tiempo de captura”, “Porcentaje de captura”, “Calidad de captura” y “Estabilidad del dispositivo” según la siguiente ecuación.

$$\text{Desempeño} = 0,4 * \alpha + 0,4 * \beta + 0,1 * \gamma + 0,1 * \delta \quad (8.5)$$

Donde:

- α : Porcentaje de captura
- β : Tiempo de captura
- γ : Calidad de captura
- δ : Estabilidad del dispositivo

Cabe destacar, que la evaluación de desempeño y ponderadores asignados fue determinado en común acuerdo con personas tanto de Codelco como de CodelcoTech. Con esto se espera lograr representar de mejor forma los intereses acerca del rendimiento de los dispositivos.

Con la conversión antes mencionada se obtienen los siguientes resultados donde tres puntos es el mayor puntaje posible y un punto es el menor puntaje posible.

Tabla 8.2: Desempeño para cada diseño del *Dispositivo 1*

Diseño	Desempeño
Diseño 1	2,25
Diseño 2	2,37
Diseño 3	1,28

Por lo tanto, a partir de la Tabla 8.2 se puede apreciar que el segundo diseño es que el tiene mejor rendimiento frente a la situación de extracción directamente desde el alimentador. El primer diseño sigue muy de cerca en el ranking de desempeño por lo que tampoco se descarta como una opción viable para remover los inchancables del alimentador. Finalmente se muestra que el diseño tres es el que tiene peor desempeño muy lejos del resto de los modelos disponibles así que se recomienda descartar esta opción para continuar el desarrollo con los otros dos modelos.

8.2. Experimento 2: Extracción mediante *Dispositivo 1* desde el buzón de alimentación

Se considera que en este experimento se han reducido igualmente los niveles dentro del factor “Inchancable” y también se han reducido la cantidad de ubicaciones posibles de acuerdo a los experimentos preliminares. De forma análoga se muestra la ficha descriptiva para el segundo experimento.

Tabla 8.3: Ficha descriptiva para experimento 2 para la extracción mediante *Dispositivo 1* desde el buzón de alimentación

Experimento	Selección de <i>Dispositivo 1</i> para extracción desde buzón de extracción
Objetivo	Dar una recomendación sobre qué configuración es la óptima para el proceso de captura de material inchancable desde buzón de alimentación en maqueta 1:10 de chancador primario usando el <i>Dispositivo 1</i>
Factores	Diseño del <i>Dispositivo 1</i> : {Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
	Ubicación del inchancable: {Sobre mineral, Bajo mineral, Por definir}
	Inchancable: {Viga, Malla, Plancha}
Respuesta	Porcentaje de captura: X [%]
	Tiempo de captura: X [segundos]
	Tiempo de traslado: X [segundos]
	Calidad de captura: {Buena / Regular / Mala}
	Estabilidad del dispositivo: {Buena / Regular / Mala}
	Funcionalidad adicional 1: {Buena / Regular / Mala}

Para definir la estructura de solapamiento se considera la siguiente notación:

- Diseño del *Dispositivo 1*
- Tipo de inchancable
- Ubicación del inchancable

Al haber definido esta notación se puede realizar el mismo proceso usado para el primer experimento, por lo que nuevamente se pueden obtener las siguientes ecuaciones de solapamiento:

$$A = A + BC + ABC \rightarrow A = A \quad (8.6)$$

$$B = B + AC^2 + ABC^2 \rightarrow B = B \quad (8.7)$$

$$C = C + AB^2 + AB^2C \rightarrow C = C + AB \quad (8.8)$$

$$AB = AB + AC + BC^2 \rightarrow AB = AB \quad (8.9)$$

Notar que los experimentos 1 y 2 son análogos, pero solamente cambia el lugar de extracción y las ubicaciones, por lo tanto, la justificación de la reducción previamente realizada es igualmente análoga. Por lo tanto se mantiene que los inchancables seleccionados son Viga, Malla y Plancha y las ubicaciones son Bajo mineral, Sobre mineral y Costado izquierdo del *apron* considerando el experimento preliminar visto en la Sección 7.1.

Al haber definido los factores como se mostró, y tomando en cuenta la covariable de curva de aprendizaje del operador se puede definir el siguiente plan de pruebas. En la Sección 10.4 “Plan de pruebas: Extracción mediante *Dispositivo 1* desde buzón de alimentación” se muestra la tabla de pruebas a realizar y el respectivo orden de aplicación.

8.2.1. Tiempo de captura y tiempo de traslado

El tiempo de captura promedio para cada diseño de *Dispositivo 1* se muestra en la Figura 8.9. De esta se puede extraer preliminarmente que el primer diseño de *Dispositivo 1* es el que mejor desempeño tiene al capturar un inchancable con un tiempo aproximado de sesenta segundos para la operación. En el caso del segundo diseño, este promedió es cercano a los ochenta segundos, mientras que el tercer diseño tiene un tiempo estimado de captura de cien segundos.

Tiempo de captura para cada diseño

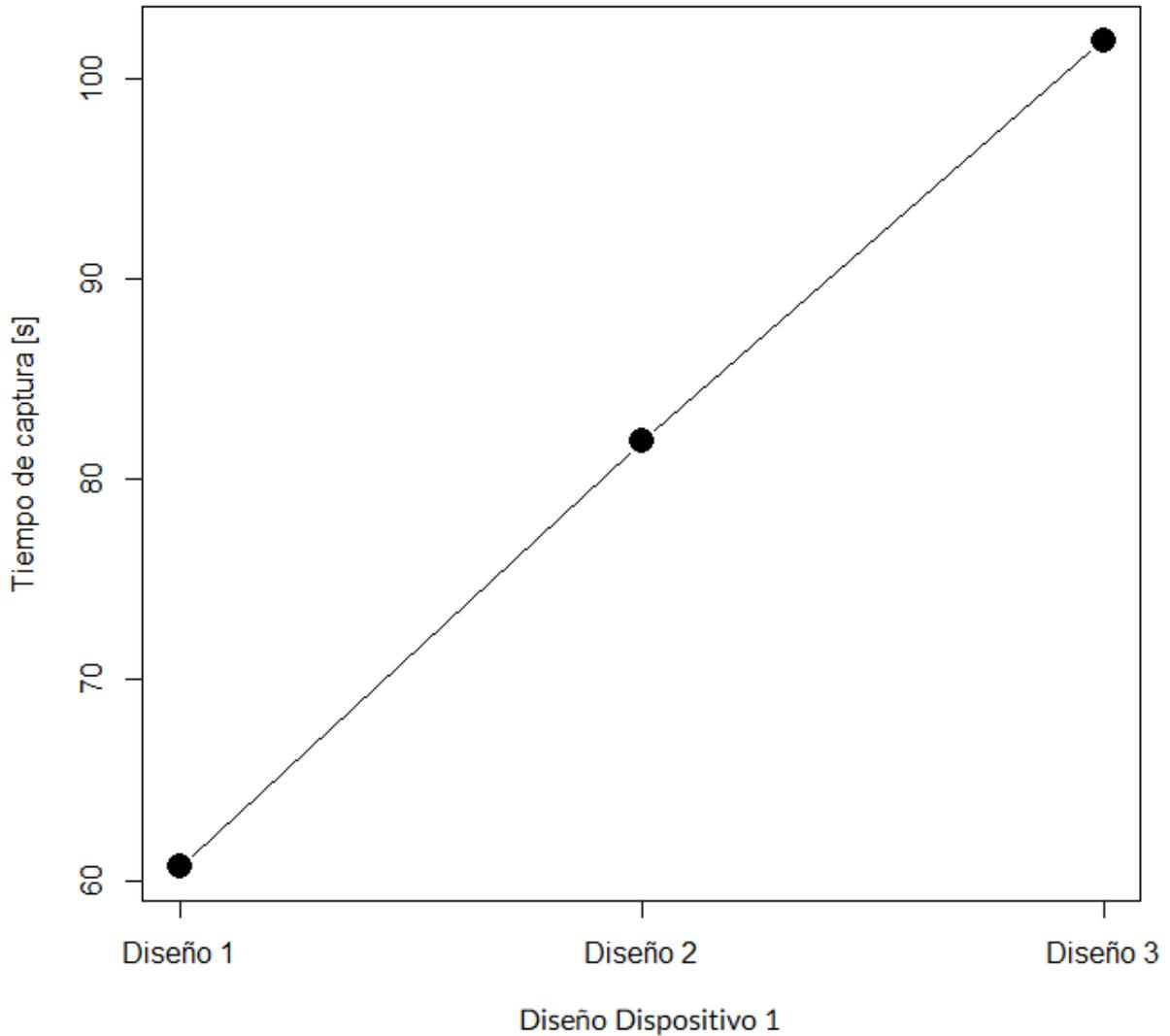


Figura 8.9: Promedio de tiempo de captura para cada diseño del *Dispositivo 1*

Tabla 8.4: Promedios de tiempo de captura para cada diseño de *Dispositivo 1*

	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Tiempo de captura [s]	60,67	81,89	101,89

Los promedios considerados anteriormente sólo toman en cuenta el efecto del diseño del *Dispositivo 1* en la captura del inchancable promedio, es decir, considerando la viga, malla y plancha como un elemento. Para tener un análisis acabado del tiempo de captura de los inchancables, a continuación, se muestra un gráfico de interacción entre los *Dispositivos 1* y los inchancables frente al tiempo de captura.

Tiempo de captura para cada diseño e inchancable

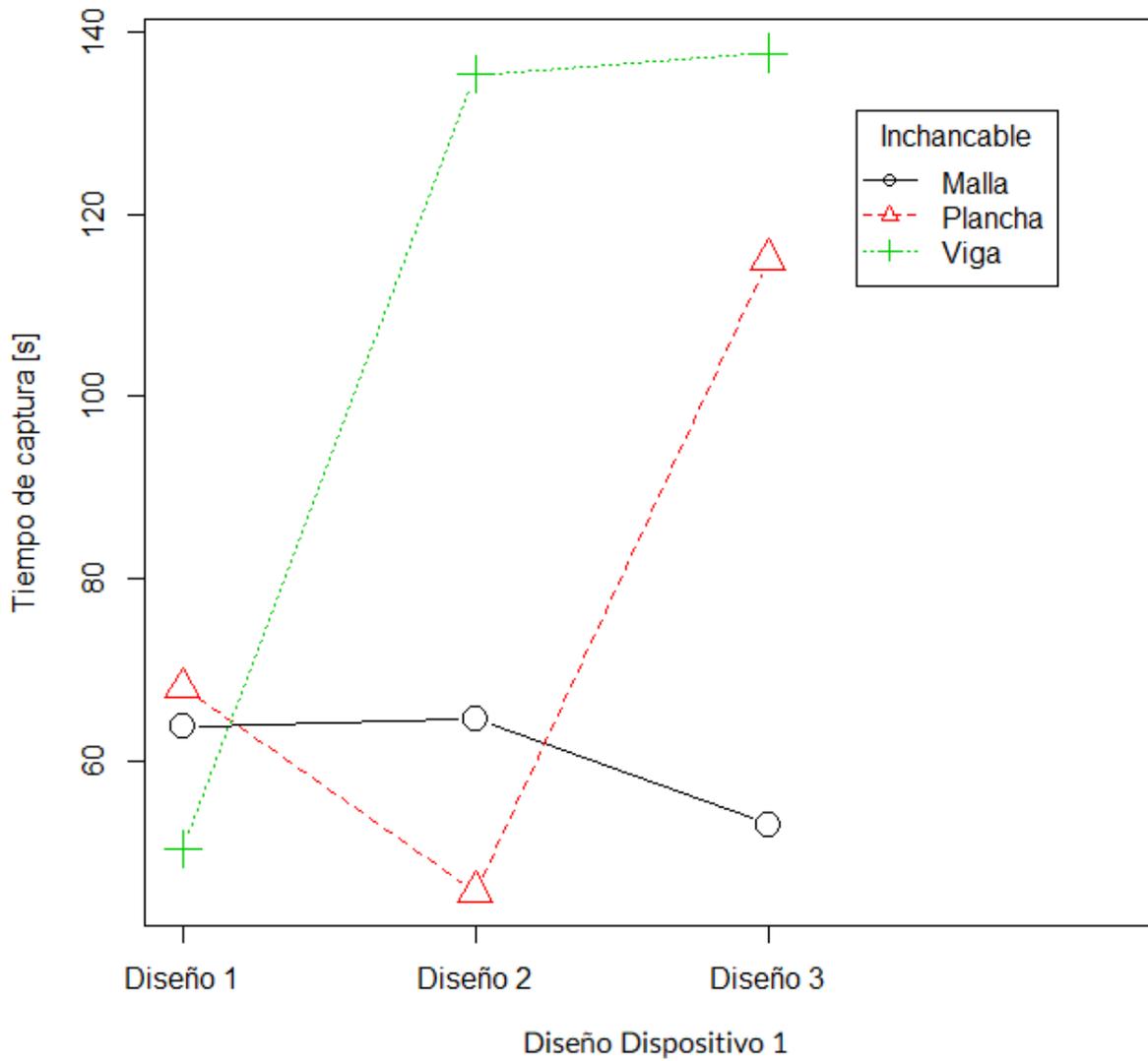


Figura 8.10: Tiempo de captura para cada diseño de *Dispositivo 1* considerando su interacción con cada tipo de inchancable

En este gráfico se puede apreciar qué en el caso del primer diseño, este entrega un tiempo de captura estable frente al tipo de inchancable que está recogiendo, donde los tres elementos analizados están cercanos a un tiempo de captura de sesenta segundos. En el caso del segundo diseño, este es capaz de entregar tiempos estables para la malla y la plancha, al contrario, al capturar la viga el tiempo aumenta considerablemente.

Finalmente, para el tercer diseño, este tiene altos tiempos de captura tanto para la plancha como para la viga. A partir de esto, se ve que el primer diseño es el que otorga un menor tiempo de captura y además es un sistema más robusto debido a la poca variabilidad de resultados frente al tipo de inchancable capturado.

Como se muestra en la Tabla 8.5, el tiempo de traslado promedio del primer diseño es el menor, seguido por el tercer diseño y siendo el segundo diseño el más lento para volver al punto inicial.

Tabla 8.5: Promedios de tiempo de traslado para cada diseño de *Dispositivo 1*

	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Tiempo de traslado [s]	47,78	68	60

A partir de lo anterior, se puede desglosar los resultados de acuerdo al tipo de inchancable utilizado, donde en la Figura 8.11 se puede ver que el primer diseño de *Dispositivo 1* es el que tiene mejor desempeño frente a todos los tipos de inchancables utilizados para los experimentos. Por otra parte, el segundo diseño presenta bajos tiempos de traslado para la malla y la plancha, pero el tiempo se eleva cuando se captura una viga. Para el caso del tercer diseño se tienen tiempos estables, pero más altos que el primer diseño y más bajos que el segundo diseño.

Tiempo de traslado para cada diseño e inchancable

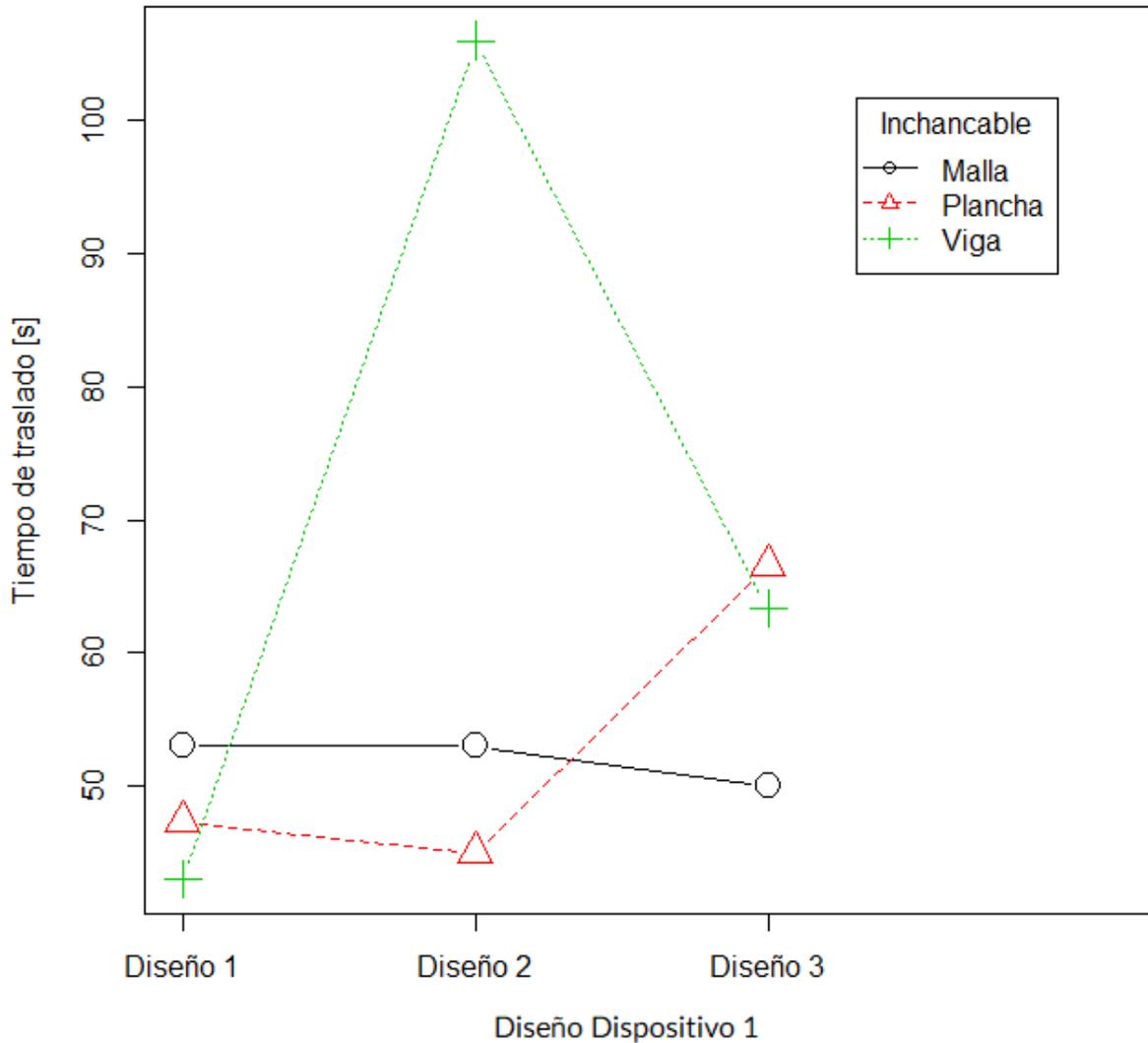


Figura 8.11: Tiempo de traslado a la posición inicial para cada diseño de *Dispositivo 1* considerando la interacción con los inchantables

8.2.2. Calidad de captura, estabilidad del dispositivo y funcionalidad adicional

Para el caso de la calidad de captura, la respuesta está evaluada en una escala desde uno hasta tres, donde uno indica el peor desempeño y tres significa el mejor rendimiento del diseño del *Dispositivo 1* evaluado. La calidad de captura implica la facilidad con la que el *Dispositivo 1* toma el inchantable, es decir, cuando se realizan reiterados intentos de captura, se descuenta puntaje al diseño analizado.

En la Figura 8.12 a continuación se muestra el promedio de la calidad de captura para los tres *Dispositivos 1*. De estas, el primer y segundo diseño son las que obtienen la mejor puntuación, mientras que el tercer diseño es el más deficiente.

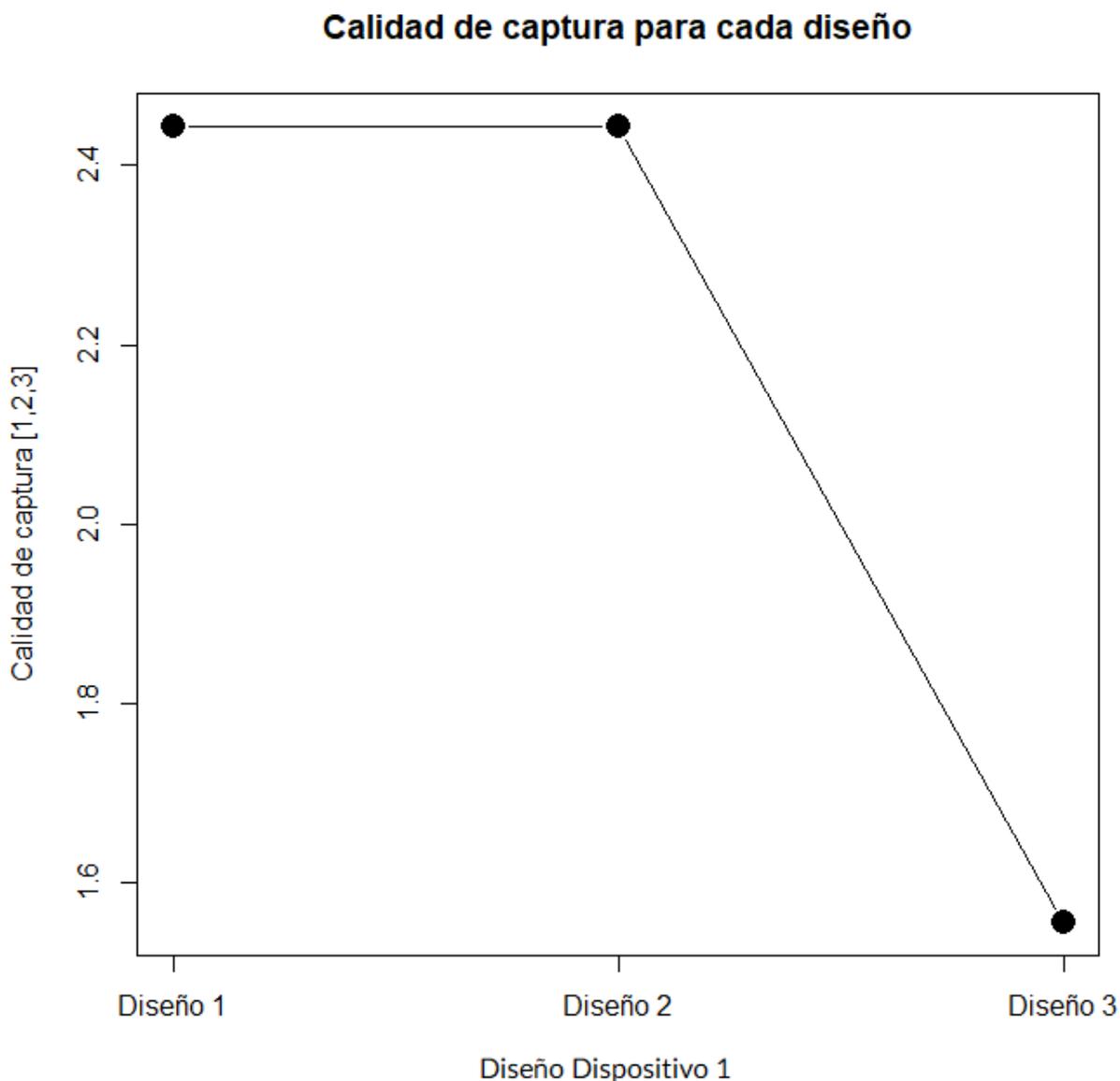


Figura 8.12: Calidad de captura para cada diseño de *Dispositivo 1*

En el caso de la Estabilidad del dispositivo, se analiza el traslado del *Dispositivo 1* con el inchantable trasladándose a un punto inicial, y se toma en cuenta si el inchantable cae durante el traslado. Para esto se utiliza nuevamente una escala de uno a tres, donde tres implica que el inchantable no se ha caído durante el traslado, por lo tanto, es la condición más deseable. Mientras que cuando el inchantable cae dos o más veces el puntaje es uno.

En el gráfico siguiente, se muestra que el primer diseño de *Dispositivo 1* puntúa de la

forma más alta con un promedio de tres, seguido por el segundo y tercer diseño. En este caso, se ve que el promedio más bajo está igualmente cercano a tres, lo que implica es que los tres diseños son estables generalmente.

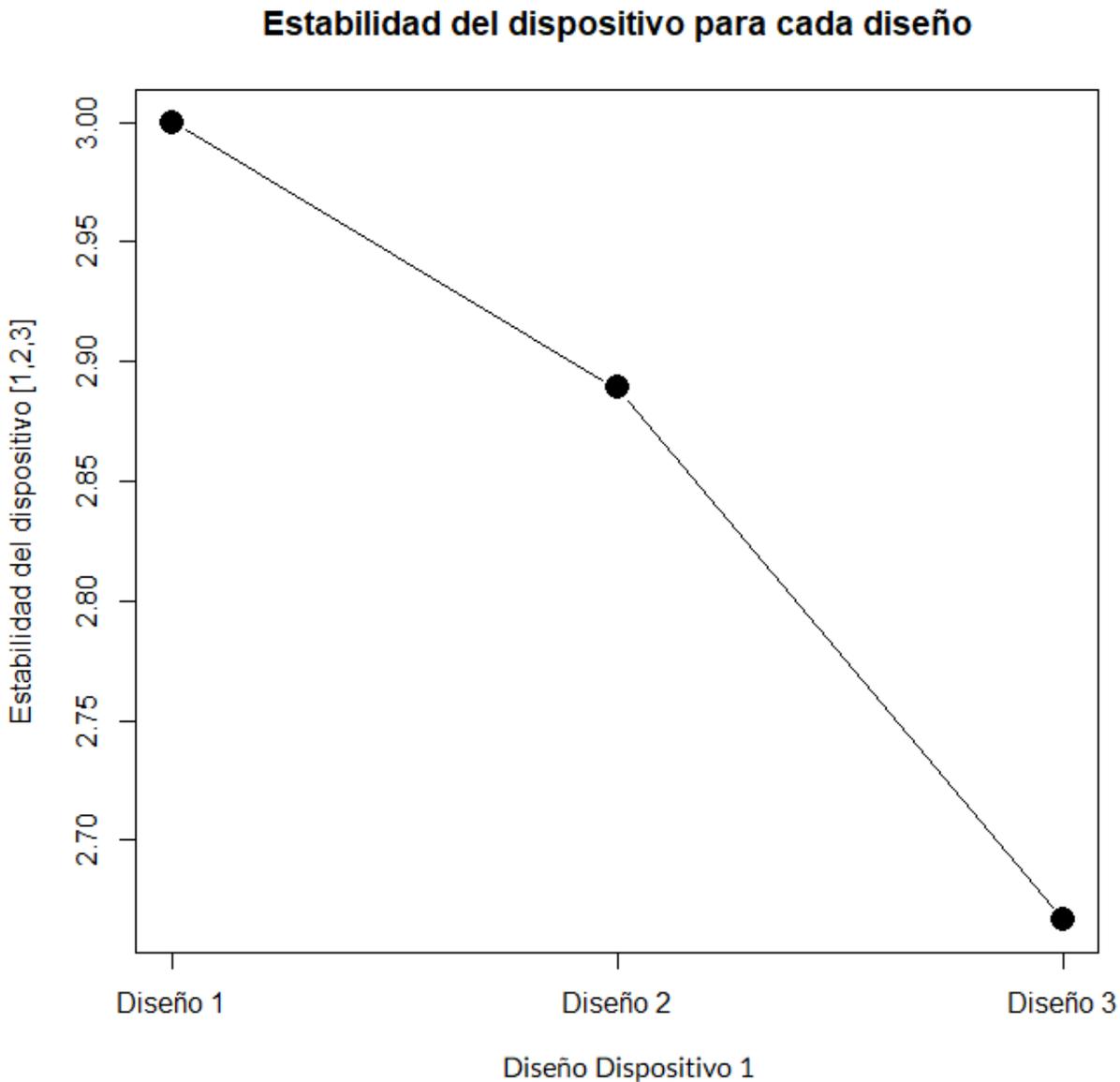


Figura 8.13: Estabilidad de cada diseño de *Dispositivo 1* en el proceso de extracción

Con respecto a la Funcionalidad adicional 1, que busca evaluar el *Dispositivo 1* como una pala, al igual que las respuestas anteriores se mide en una escala de uno a tres, donde tres indica el mejor desempeño y uno el peor, el mejor desempeño indica que el material en el buzón puede ser movido con facilidad, mientras que el peor caso es cuando el dispositivo no puede mover grandes cantidades de material. Para este caso se analizó como funcionalidad adicional la capacidad de actuar como pala para mover el mineral dentro del buzón. Cabe destacar que la funcionalidad adicional es independiente del inchantable que se extrae y de la

ubicación de este debido a que evalúa como afecta el diseño al mineral presente en el buzón, considerando que el movimiento de mineral es una actividad que se realiza en la operación de la planta sin presencia de inchantable.

A partir del gráfico a continuación, se puede deducir que el mejor rendimiento es el del segundo diseño, que en promedio tiene un puntaje de tres puntos, seguido por el primer diseño con dos puntos y finalmente, el tercer diseño que es el de menor rendimiento.

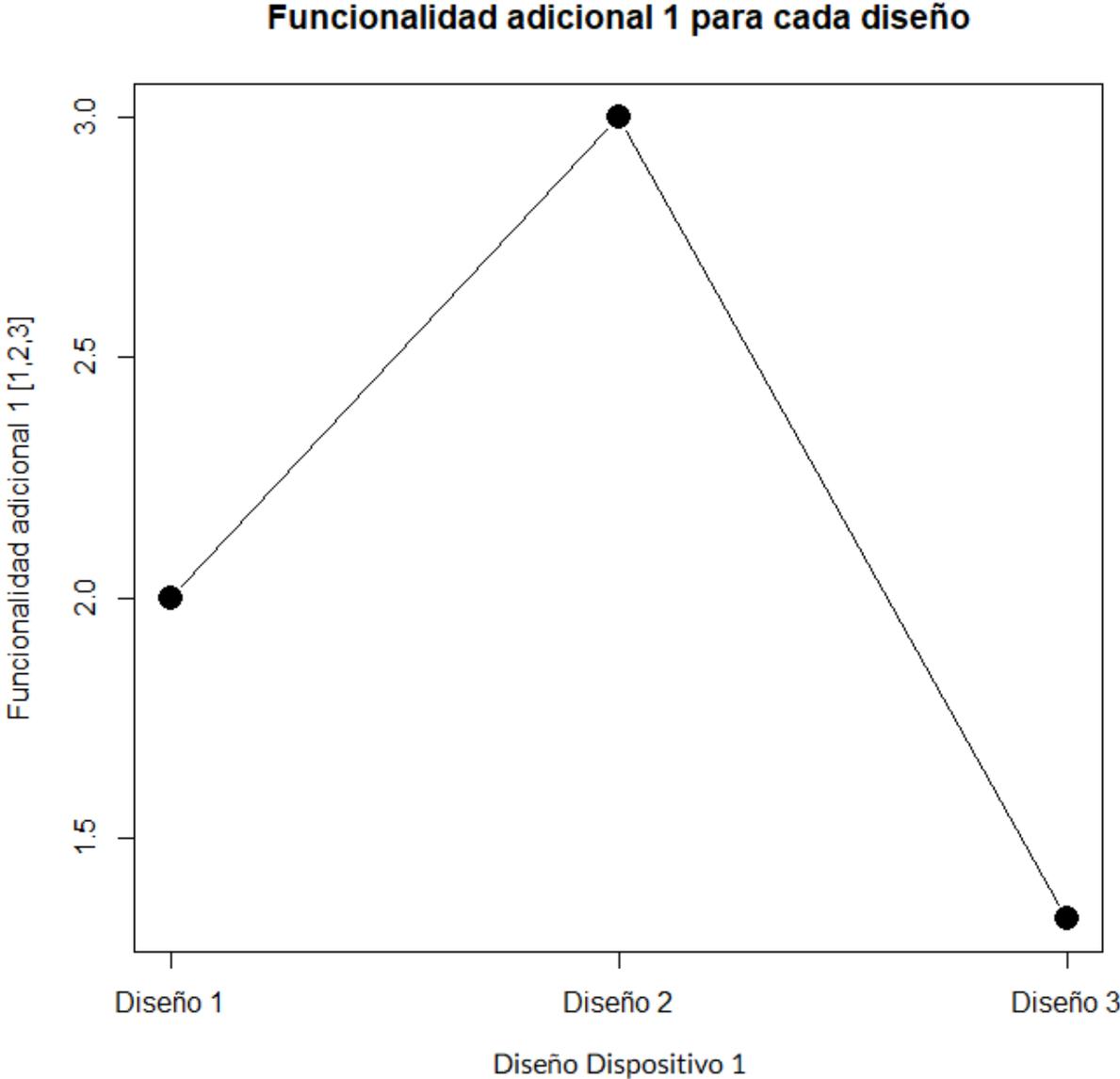


Figura 8.14: Funcionalidad adicional de cada diseño de *Dispositivo 1*

8.2.3. Análisis

Para realizar el análisis de datos de los experimentos se utilizó un análisis de varianza para tres variables, en este caso, es el diseño, inchancable y la ubicación de estos. Al realizar un estudio de la varianza al igual que en los experimentos anteriores, se puede observar que tan influyentes son los efectos de los factores en una respuesta determinada a analizar. Las tablas de varianza para este experimento pueden ser encontradas en la Sección 10.7 “Análisis de varianza para las respuestas del experimento 2”

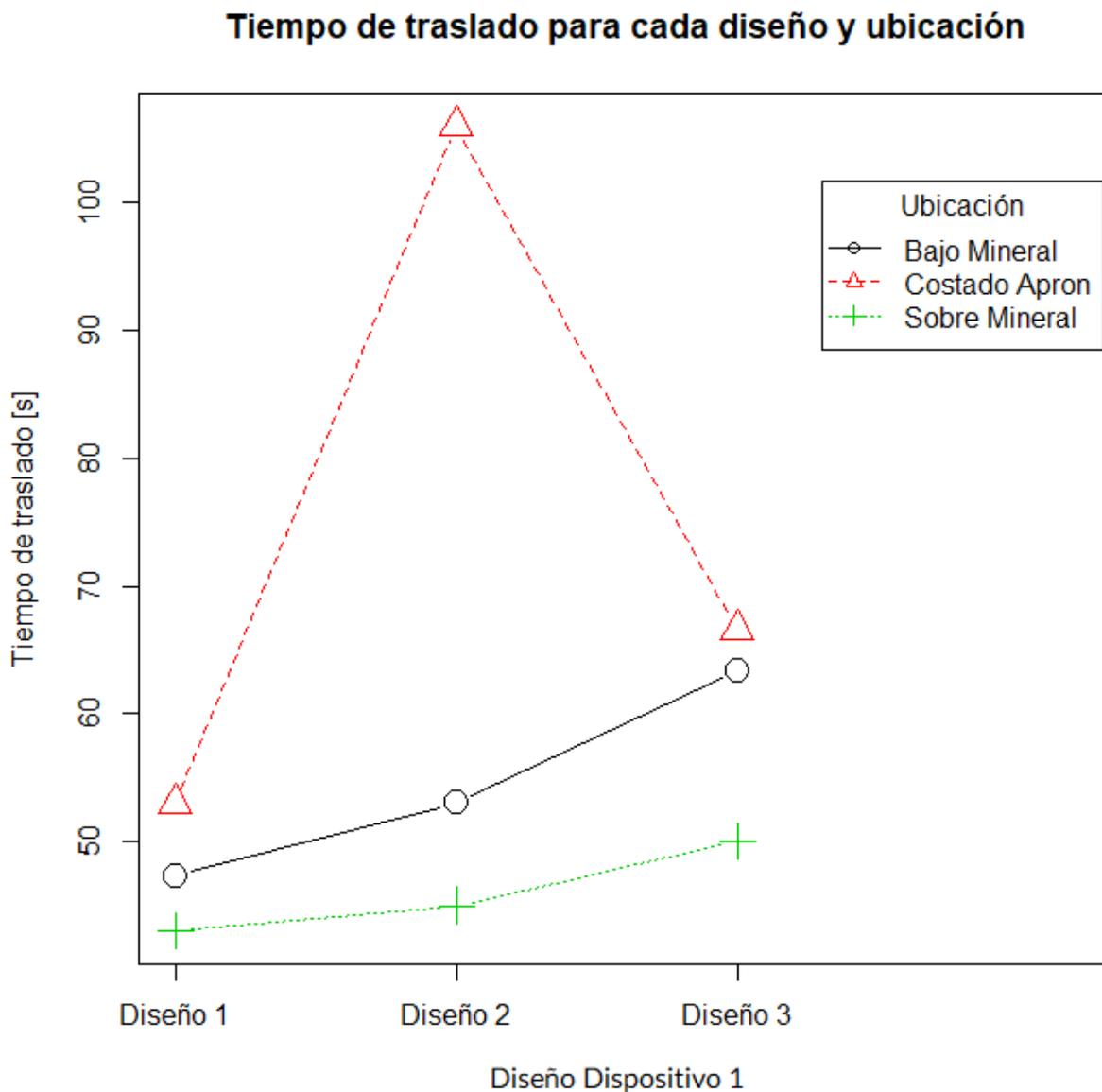


Figura 8.15: Tiempo de traslado considerando la interacción entre la ubicación del inchancable y el diseño del *Dispositivo 1*

Al realizar el estudio de varianza tanto para el tiempo de captura como para el tiempo de

traslado, se obtiene que el factor “Ubicación” es influyente en la determinación de la respuesta, en ambos casos considerando un nivel de significancia del 90 %. Por lo tanto, a partir de esto, se puede inferir que el tiempo de captura y de traslado están mayormente influenciados por la ubicación de los inchantables que por el tipo de estos y el diseño del *Dispositivo 1*.

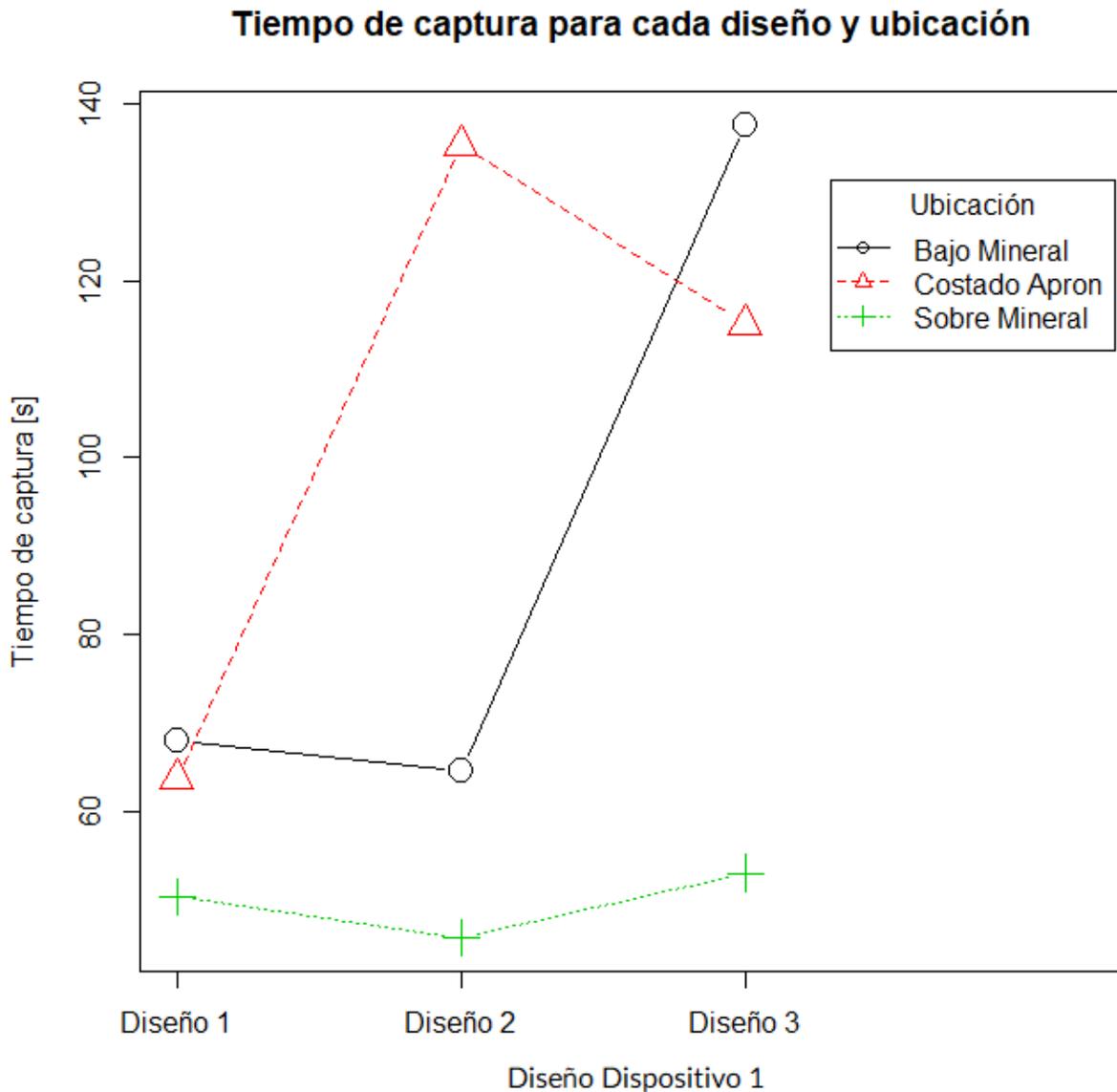


Figura 8.16: Tiempo de captura considerando la interacción entre la ubicación del inchantable y el diseño del *Dispositivo 1*

Se puede ver en la Figura 8.16 que a pesar de que el diseño no es estadísticamente influyente en los tiempos de traslado y captura, se aprecia que el primer diseño es el que tiene mejor rendimiento en tiempo promedio y presenta un comportamiento más robusto frente a el resto de los diseños del *Dispositivo 1* disponibles.

Con respecto a la respuesta de calidad de captura, se determinó que el diseño del *Dispositivo 1* es el factor más importante al puntuar la eficacia de captura de los inchancables, este resultado se logró obtener con un intervalo de significancia del 90 % por lo tanto, con esto se puede deducir que efectivamente el primer y segundo diseño se desempeñan mejor que el tercer diseño en este ámbito.

Por otra parte, en la estabilidad del dispositivo no se obtuvieron resultados significativos con las pruebas realizadas, por lo que no se puede discriminar cual dispositivo es más efectivo con respecto a otro. A partir de las puntuaciones promedio de los tres diseños, se puede inferir que los tres dispositivos tienen una buena estabilidad y que los factores estudiados no afectan a esta variable.

Analizando la funcionalidad adicional del *Dispositivo 1*, se obtuvo que el factor más determinante en el resultado de esta respuesta es el diseño del *Dispositivo 1* con un intervalo de significancia del 99 %, con esto se puede concluir que los otros dos factores (Ubicación e Inchancable) tomados en cuenta no son influyentes para el resultado de la respuesta y que el segundo diseño del *Dispositivo 1* es el que mejor puntúa en esta variable.

Además, cabe destacar, que en este segundo experimento se logró un 100 % de efectividad de captura con todas las garras, es decir, que el independiente del tiempo de captura, siempre se logró tomar en inchancable directamente desde el buzón de alimentación. A partir de esto, se puede ver que el método de extracción mediante garra es bastante efectivo.

8.2.4. Selección de candidato

Para realizar la selección del candidato se plantea un modelo lineal ponderado, donde el cincuenta por ciento está determinado el porcentaje de captura y el otro cincuenta por ciento está definido por los tiempos de captura y de traslado, las respuestas de calidad de captura, estabilidad del dispositivo y funcionalidad adicional,

Para esto, se crea una nueva escala lineal codificada para los tiempos de captura y traslado que se muestra en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6: Escala de tiempo y puntuación para los tiempos de captura y traslado

Tiempo [s]	Puntaje
0	3
100	2
200	1

A partir de esta escala de puntuación se plantea la siguiente función lineal de desempeño para realizar la comparación entre diseños del *Dispositivo 1*.

$$\text{Desempeño} = 0,4 * \alpha + 0,2 * \beta + 0,2 * \gamma + 0,05 * \delta + 0,05 * \varepsilon + 0,1 * \varphi \quad (8.10)$$

Donde:

- α : Porcentaje de captura
- β : Tiempo de captura
- γ : Tiempo de traslado
- δ : Calidad de captura
- ε : Estabilidad del dispositivo
- φ : Funcionalidad adicional

Con la función antes mencionada se obtuvieron los siguientes datos para evaluar el rendimiento de los diseños, estos se muestran en la Tabla 8.7.

Tabla 8.7: Desempeño para cada diseño del *Dispositivo 1*

Diseño	Desempeño
Diseño 1	2,66
Diseño 2	2,67
Diseño 3	2,29

Con esto, se puede ver que el diseño 2 tiene un mejor desempeño puntual a partir de la evaluación anterior, por lo que se posiciona como el mejor candidato para seguir desarrollando. Se debe notar que el diseño 1 tiene una puntuación similar por lo que también se considera un candidato para continuar el desarrollo. Por último, el tercer diseño es el que peor rendimiento tiene frente a todas las situaciones antes nombradas, principalmente debido a la poca estabilidad y variabilidad de respuestas con respecto a los tipos de inchancables que se están recogiendo.

8.3. Experimento 3: Extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

En este caso, en el experimento 3 de extracción mediante *Dispositivo 2*, solamente se buscaba reducir los niveles de la variable inchancable, con lo que se obtuvieron los siguientes factores y niveles finales para realizar el experimento:

Tabla 8.8: Ficha descriptiva para experimento 3 para la extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

Experimento	Selección de <i>Dispositivo 2</i> para extracción en la descarga del alimentador
Objetivo	Dar una recomendación sobre que configuración es la óptima a utilizar en el proceso de captura de material inchancable desde la caída del alimentador en maqueta 1:10 de chancador primario usando el <i>Dispositivo 2</i>
Factores	Diseño del <i>Dispositivo 2</i> : {Diseño 1, Diseño 2, Diseño 3}
	Ubicación del inchancable: {Sobre mineral, Bajo mineral, Por definir}
	Inchancable: {Viga, Malla, Plancha}
Respuesta	Porcentaje de captura: X [%]
	Tiempo de instalación: X [Segundos]
	Tiempo de captura: X [Segundos]
	Tiempo de retorno: X [Segundos]
	Calidad de captura: {Buena / Regular / Mala}
	Estabilidad del dispositivo: {Buena / Regular / Mala}
	Funcionalidad adicional 2: X [%]
	Funcionalidad adicional 3: X [%]

Por otra parte, para definir la estructura de solapamiento se considera la siguiente notación:

- A: Diseño del *Dispositivo 2*
- B: Tipo de inchancable
- C: Ubicación del inchancable

Luego de haber definido esta notación se puede realizar el mismo proceso que para el primer y segundo experimento, por lo que nuevamente se pueden obtener las siguientes ecuaciones de solapamiento:

$$A = A + BC + ABC \rightarrow A = A \quad (8.11)$$

$$B = B + AC^2 + ABC^2 \rightarrow B = B \quad (8.12)$$

$$C = C + AB^2 + AB^2C \rightarrow C = C + AB \quad (8.13)$$

$$AB = AB + AC + BC^2 \rightarrow AB = AB \quad (8.14)$$

En la Sección 10.5 “Plan de pruebas: Extracción mediante *Dispositivo 2* en la descarga del alimentador” se muestra la tabla de pruebas a realizar y el respectivo orden de aplicación.

8.3.1. Tiempo de instalación, captura y retorno

En la Tabla 8.9 se muestran los tiempos de instalación del dispositivo, tiempo de captura y tiempo de retorno al punto inicial. Como se puede ver en la Tabla 8.9, en el caso de los tiempos de instalación y captura, las diferencias no son apreciables y esto se puede corroborar a partir del análisis de varianza de estas respuestas. Por otra parte, en el caso del tiempo de retorno, se puede ver una variación de unos treinta segundos entre el diseño que menos tiempo demora en retornar (Diseño 1) y el que más se demora en volver a la posición inicial (Diseño 2) Además, a partir del análisis de varianza, se determinó que efectivamente el diseño influye en el tiempo de retorno del dispositivo al área de estacionamiento.

Tabla 8.9: Tiempo de instalación, captura y retorno para el *Dispositivo 2*

	Diseño 1	Diseño 2	Diseño 3
Tiempo de instalación [s]	171,67	181,34	181,11
Tiempo de captura [s]	32,00	35,33	35,66
Tiempo de retorno [s]	129,56	165,89	143,11

8.3.2. Calidad de captura y estabilidad del dispositivo

Con respecto a la calidad de captura, en el siguiente gráfico se puede ver que la puntuación promedio de todos los diseños es igual (tres puntos) lo que indica que no existen diferencias en la captura que dependan del diseño de los *Dispositivos 2*. Durante las pruebas realizadas se debe destacar que ninguna de estas fue considerada fallida, es decir, que en todos los casos los diseños del *Dispositivo 2* fueron capaces de capturar efectivamente los inchancables.

Calidad de captura promedio para cada diseño

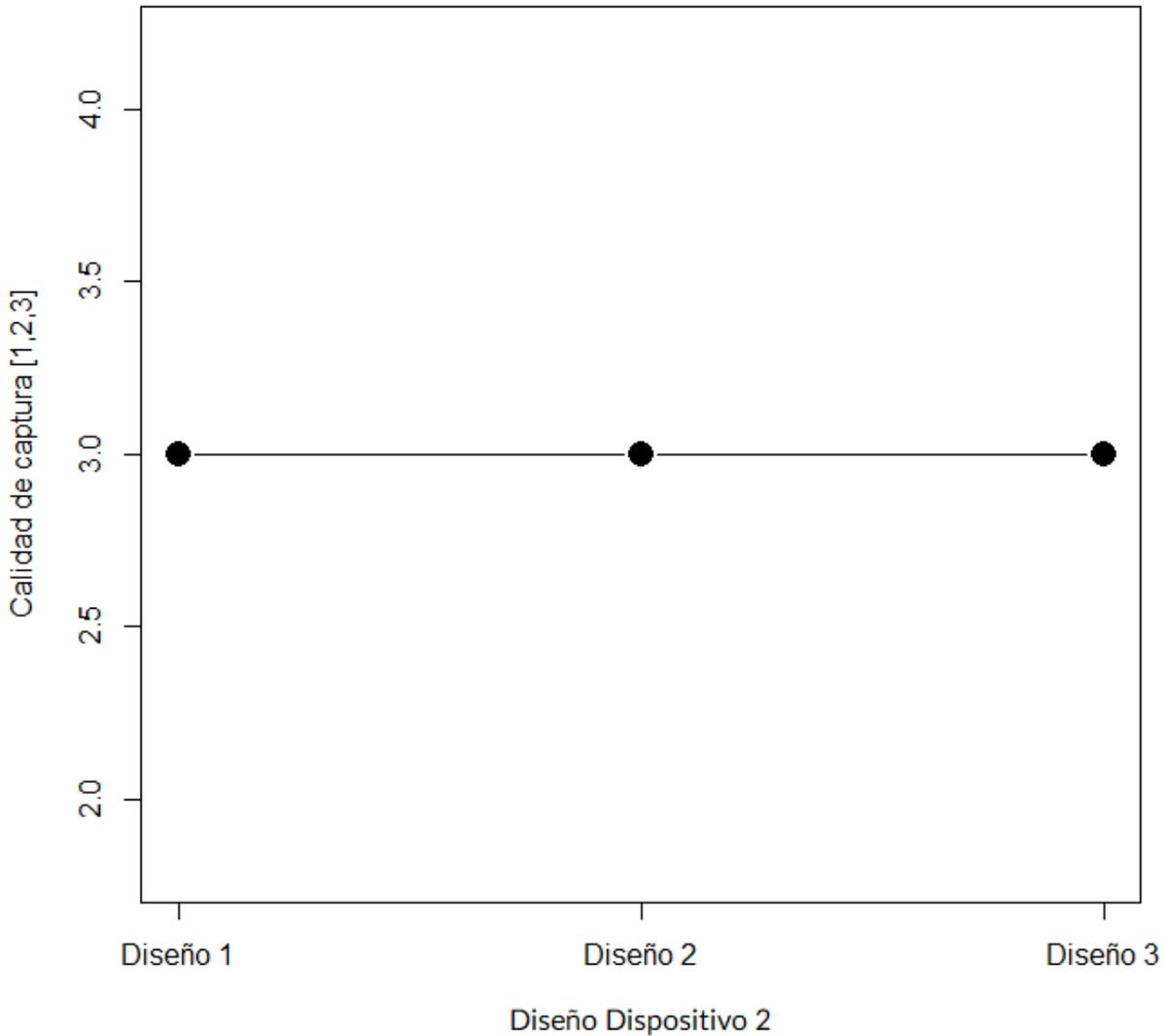


Figura 8.17: Calidad de captura promedio para cada diseño del *Dispositivo 2*

Por otra parte, con respecto a la estabilidad del dispositivo promedio, se puede ver una pequeña variación en la respuesta obtenida. Se debe mencionar que la variación es cercana al diez por ciento y a partir del análisis de varianza se determinó que esta respuesta no se veía influida en gran manera por ninguno de los factores tomados en cuenta (Diseño del *Dispositivo 2*, tipo de inchancable y ubicación del inchancable)

Estabilidad del dispositivo promedio para cada diseño

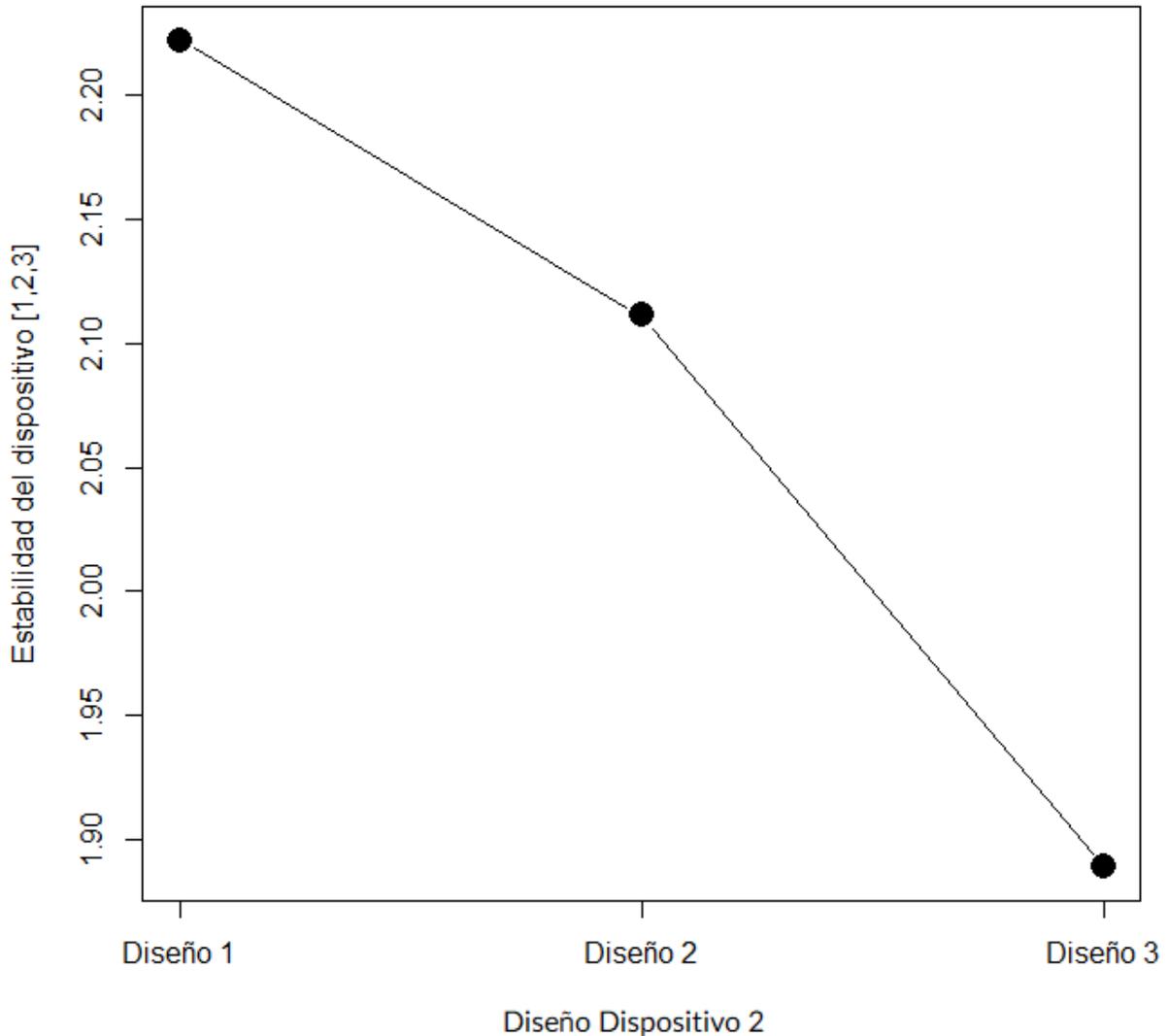


Figura 8.18: Estabilidad del dispositivo para cada diseño del *Dispositivo 2*

8.3.3. *Funcionalidad adicional 2 y Funcionalidad adicional 3*

La respuesta de "Funcionalidad adicional 2" tiene relación con la cantidad de material pasantes a través del dispositivo y la "Funcionalidad adicional 3" tiene relación con la eficiencia de evacuación de material del mismo dispositivo.

Como se puede ver en el siguiente gráfico, la Funcionalidad adicional 2 varía con respecto al diseño utilizado, donde el primer diseño tiene una Funcionalidad adicional 2 cercana al 49%, es decir, que del volumen de control que pasa a través del dispositivo, este retiene más de la mitad del material. Por otra parte, el segundo diseño tiene una Funcionalidad adicional

2 cercana al 55 %.

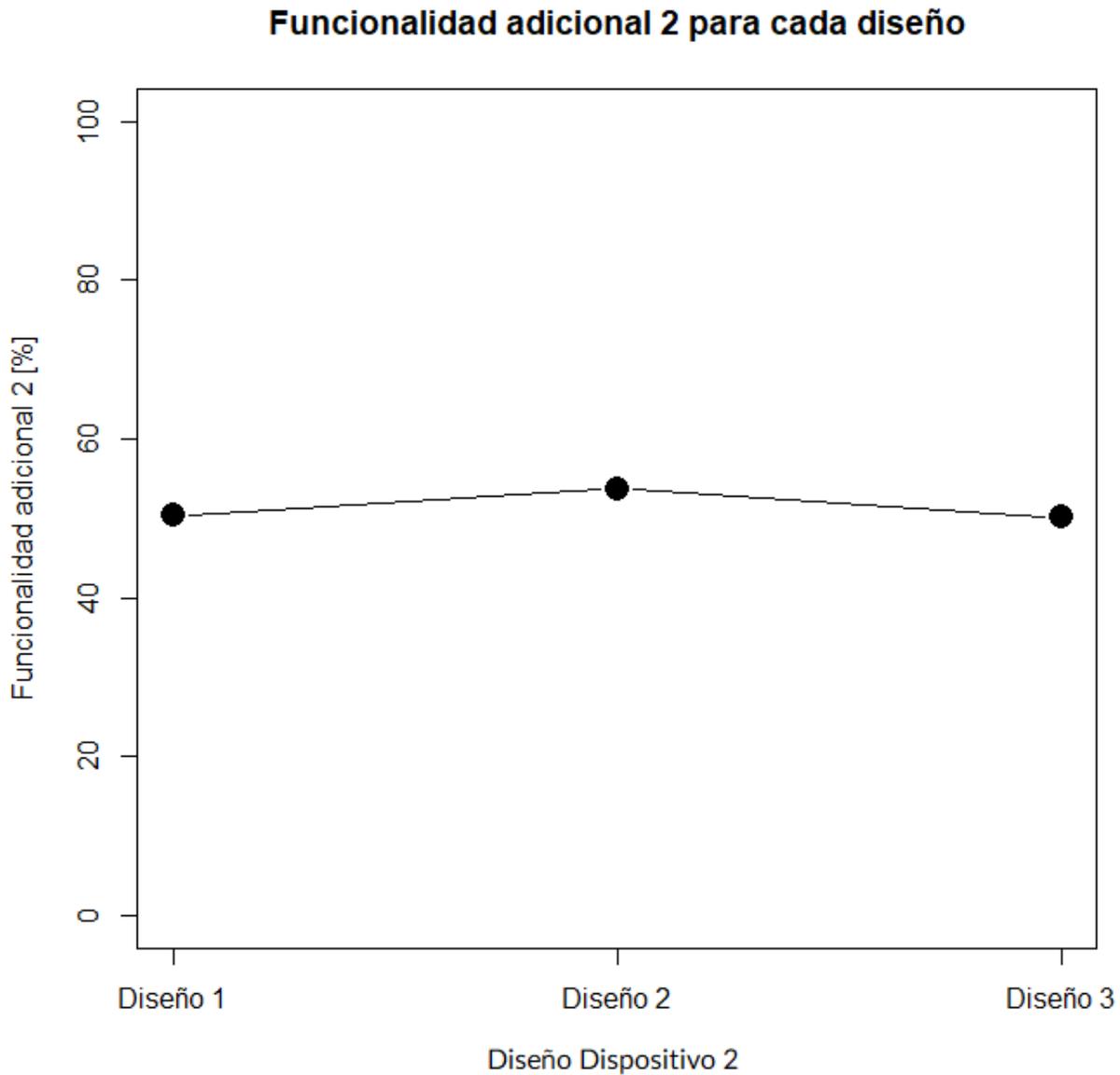


Figura 8.19: Funcionalidad adicional 2 promedio para cada diseño del *Dispositivo 2*

La respuesta de Funcionalidad adicional 3 contempla el porcentaje de material evacuado por el *Dispositivo 2*, por lo tanto se espera que esta respuesta sea alta para lograr liberar la mayor cantidad de material posible.

En el caso del primer diseño, el material retenido es menor al 5 %, mientras que el segundo diseño tiene retención superior al 15 %. por lo que el primer diseño de *Dispositivo 2* se presenta como una mejor opción de desarrollo.

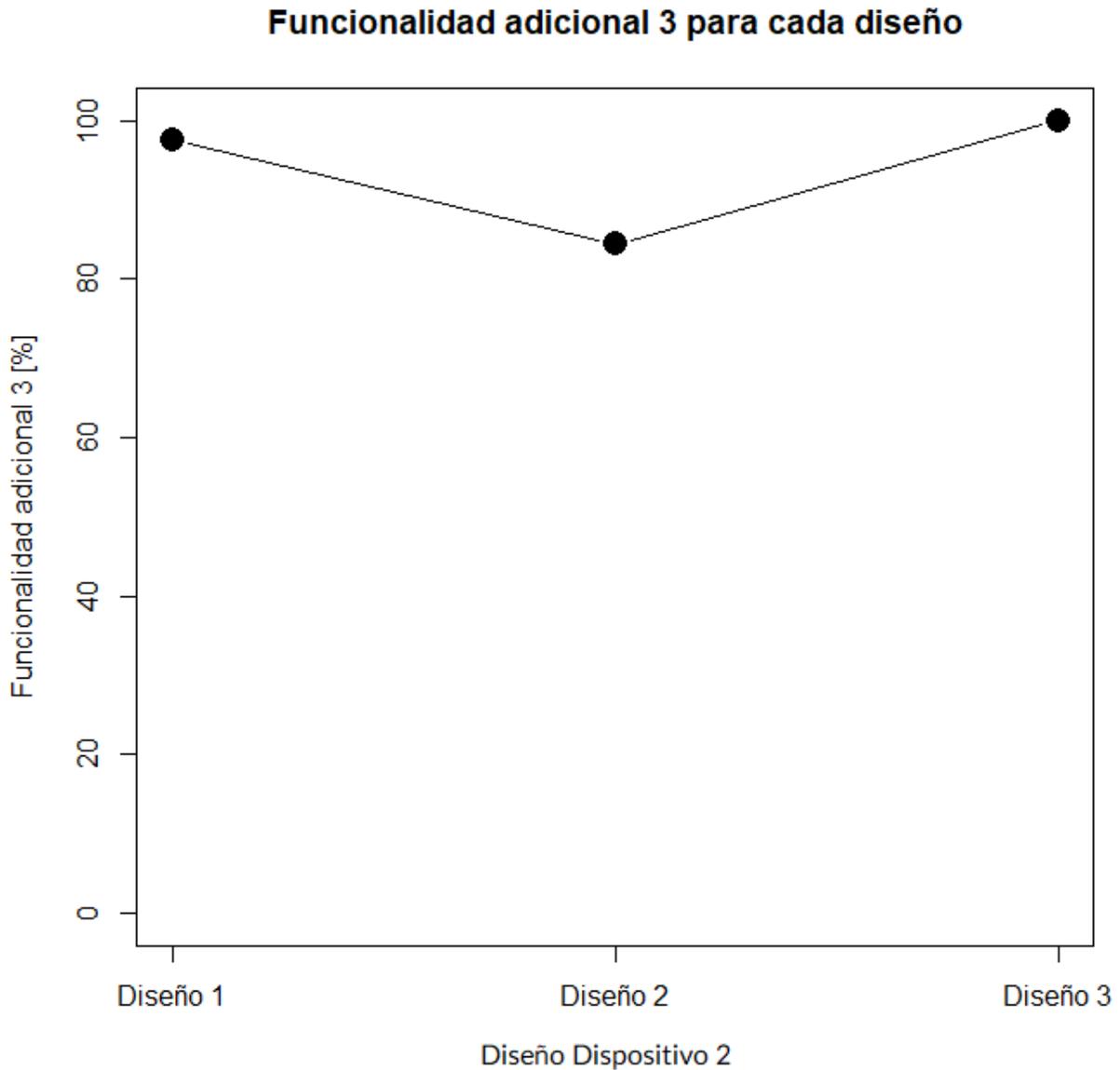


Figura 8.20: Funcionalidad adicional 3 promedio para cada diseño del *Dispositivo 2*

8.3.4. Análisis

Para el caso del tercer experimento, se realizó al igual que en los experimentos anterior un análisis de varianza para todas las respuestas y ver la significancia de cada factor en el resultado de las respuestas. Se determinó que ningún factor afecta directamente a las respuestas del experimento excepto en tiempo de retorno y la Funcionalidad adicional 3, donde el diseño es influyente con un 95 % y 99 % de significancia respectivamente. A partir de esto no se puede determinar estadísticamente cual diseño es superior a otro a partir de las pruebas realizadas en primera instancia, considerando que ambos tienen la misma eficacia de captura, por lo que se tomarán en cuenta algunas observaciones experimentales mostradas a

continuación.

8.3.5. Selección de candidato

En el caso del tercer experimento no se tienen factores que influyeran distintivamente la selección de un diseño por otro, ya que estadísticamente ningún modelo de Dispositivo 2 es superior al otro a partir de las pruebas realizadas.

A pesar de lo anterior, se realizaron algunas observaciones experimentales (información confidencial) que mostraron el comportamiento completo de la operación y a partir de esto se pudo realizar una selección cualitativa.

A partir de las pruebas anteriores se puede ver que el primer diseño es el que tiene un mejor desempeño en la respuesta de Funcionalidad adicional 2, la que se relacionaba con la cantidad de material pasante a través del *Dispositivo 2*, pero en la que no había diferencia estadística. Por otra parte, con respecto a la Funcionalidad adicional 3, si se encontró que el primer diseño es el que tiene mejor desempeño en esta respuesta.

Se hicieron pruebas no documentadas del comportamiento de este dispositivo frente a colpas o rocas de sobre tamaño. En el caso extremo de la aparición de una colpa cerca de un inchancable, el diseño 1 también se desempeñó de buena manera permitiendo la captura de los inchancables. En el caso donde existe una colpa para el segundo diseño, en ninguna ocasión se pudo capturar efectivamente el inchancable. Por lo tanto, de acuerdo con lo comentado anteriormente y tomando en cuenta la respuesta de Funcionalidad adicional 3 y las pruebas extremas de colpa se recomienda el desarrollo de un sistema similar al del primer diseño del *Dispositivo 2*.

Capítulo 9

Recomendación

En esta sección se muestran las recomendaciones finales de dispositivos a partir de las pruebas experimentales realizadas en la maqueta 1:10 de chancador primario.

9.1. *Dispositivo 1*

El *Dispositivo 1* debe desempeñarse tanto en el Experimento 1 de extracción directamente desde el alimentador como en el Experimento 2 de extracción desde el buzón de extracción, por lo tanto es deseable que el diseño elegido sea el que mejor desempeño tenga en ambas situaciones considerando que estas son operaciones ligadas.

Tabla 9.1: Resumen del desempeño para los *Dispositivos 1*

	Experimento 1	Experimento 2	Promedio
Diseño 1	2,25	2,66	2,46
Diseño 2	2,37	2,67	2,52
Diseño 3	1,28	2,29	1,79

En la Tabla 9.1 se muestra un resumen del puntaje para cada diseño en los dos experimentos nombrados anteriormente. A partir de esto, se puede ver que en ambos casos, el diseño 2 es el que tiene mejor puntuación llegando a un promedio de 2,52 punto de un máximo de 3.

Como se menciona anteriormente, estos dos experimentos están relacionados, debido a que la situación ideal se produce cuando el *Dispositivo 1* es capaz de capturar directamente desde el alimentador los inchancables, cuando estos no se pueden capturar y caen dentro del buzón de extracción entonces se produce la situación del segundo experimento de extracción. Considerando lo anterior se puede estimar el tiempo de operación en la maqueta. Para esto se considera un sesenta por ciento de casos de extracción del alimentador y un cuarenta por ciento de casos donde se deben retirar los inchancables desde el buzón. A partir de las consideraciones antes mencionadas, el tiempo se puede estimar en unos trescientos cincuenta

y seis segundos, es decir, aproximadamente unos seis minutos.

Cabe destacar, que a pesar de que los inchancables caigan dentro del buzón de extracción, el método de remoción de inchancables utilizando un *Dispositivo 1* tiene una efectividad del cien por ciento por lo que son una forma viable de implementar en la planta real de chancado considerando que en la actualidad no existen métodos que puedan cumplir esta función ni mucho menos en un periodo tan corto de tiempo.

Como se menciona anteriormente, el diseño 1 del *Dispositivo 1* corresponde al segundo lugar con una buena puntuación. Considerando que entonces ambos diseños, el primero y el segundo son recomendables se puede analizar el ganador de acuerdo a dos condiciones. En primer lugar se puede ahondar en la ayuda de expertos y operarios por parte de la planta (El Teniente) o considerar que ventajas y desventajas pueden influir en la puntuación y con esto lograr mejorar los puntos débiles de ambos y probar ambos diseños en una nueva versión.

9.2. *Dispositivo 2*

Por otra parte, el *Dispositivo 2* correspondía a concepto totalmente distinto de captura de inchancables, el que también tuvo una efectividad del cien por ciento de captura como concepto independiente del modelo utilizado. A partir del análisis cualitativo de la operación se recomendó continuar con el desarrollo del primer diseño de extracción de inchancables debido a que provee mayores ventajas con respecto al ámbito operacional considerando que el rendimiento de los tres diseños es similar.

Con respecto a los tiempo de operación, para este caso se consideró el tiempo de captura, de instalación y de retorno del dispositivo. Todos estos en conjunto corresponden a la operación que eventualmente se debería realizar en la planta y a partir de los tiempos obtenidos se estimó que el tiempo de operación es cercana a los trescientos treinta segundos.

9.3. *Dispositivo de protección*

El *dispositivo de protección* fue seleccionado simplemente en función de darle mayor libertad y movilidad al *Dispositivo 1* dentro del buzón de extracción. Dichas pruebas fueron analizadas en un experimento preliminar donde se determinó que el primer diseño era el que minimizaba el tiempo de maniobra del *Dispositivo 1*

Conclusión

A lo largo del trabajo de memoria de título se han revisado los fundamentos y principios del uso de Diseño de Experimentos, el cual consiste en definir una serie de etapas que permiten la realización de pruebas en un sistema experimental de forma óptima. A pesar de que uno de los métodos más utilizados es el diseño factorial (todas las combinaciones posibles en un sistema experimental), este puede consumir gran cantidad de recursos cuando el número de factores es elevado. Para solucionar este problema fue posible realizar un diseño de experimentos factorial fraccional mediante una selección de experimentos, lo que permite elegir un set inicial de pruebas que es representativo de la población de pruebas posibles y que es capaz de entregar información relevante y concisa, la que pudo ser utilizada para discriminar entre los efectos que son relevantes para el cambio en la respuesta del sistema.

Además, con el método de diseño fraccional, se pudo llegar a buenas conclusiones considerando el concepto de solapamiento de efectos, debido a que al realizar una selección indebida del generador de factores se podría producir una respuesta indeseada en las conclusiones y análisis de las variables involucradas. Una alternativa para suplir la falta de experticia en el proceso experimental fue la consulta con expertos, los que fueron capaces de guiar el procedimiento experimental aplicado para el proyecto.

El proyecto 18-17 involucró un análisis del proceso de extracción de elementos inchancables metálicos en la maqueta de chancador primario. Este sistema tiene una gran cantidad de niveles y factores que inicialmente no eran homogéneos y son de carácter categórico, los que requirieron una reducción y procesamiento para posteriormente definir las pruebas finales.

Posteriormente se aplicó la metodología de Diseño de Experimentos en las pruebas planteadas por Codelcotech en la fase inicial del proyecto 18-17 correspondiente al desarrollo de un sistema integrado para la detección y extracción de material inchancable en chancador primario. Dicho protocolo de pruebas estableció tres experimentos, extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde el buzón de alimentación, extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde el alimentador y extracción mediante *Dispositivo 2* en la descarga del alimentador.

A partir de lo investigado se llegó a la conclusión que una manera de realizar los experimentos es homogeneizar los niveles y factores, por lo tanto, se redujeron el número de inchancables a utilizar gracias a la distribución estadística de los elementos más probables y que tienen un tiempo teórico de detención mayor en el chancador primario, además se disminuyeron los niveles en el factor de la ubicación del inchancable mediante un experimento preliminar para determinar la distribución de caída de los elementos metálicos dentro del

buzón de alimentación.

Luego de esto, se notó que uno de los factores que menos interactúa con el resto es el diseño del *Dispositivo de protección*, por lo que se planteó un experimento preliminar para fijar esta variable para futuras pruebas.

Al tener tres factores y tres niveles en cada experimento se mostró la técnica de división en bloques, con lo que se seleccionó el bloque principal de forma genérica para los tres experimentos. Por lo tanto, se definieron nueve pruebas para cada experimento con tres replicados, por lo que se obtuvieron un total de veintisiete pruebas por cada tipo de método de extracción. Ya con el plan general creado, este se aplicó a cada uno de los experimentos y se procede a realizar un algoritmo aleatorio de ejecución de las pruebas y se presentan las tablas finales con los parámetros de realización de estas.

Se concluye por lo tanto que utilizando la metodología de Diseño de Experimentos se pudo reducir el tiempo de realización de pruebas a un veinte por ciento con respecto al tiempo inicial presupuestado utilizando una matriz de muestra representativa de los experimentos iniciales ya que se cuenta con un plan de pruebas definido y acotado.

En el caso del primer y segundo experimentos se utiliza un *Dispositivo de protección* de forma auxiliar para evitar la caída de los elementos inchancable al chancador durante la operación. Se concluyó a partir de las pruebas preliminar que el primer diseño es el que permite una mayor y más rápida movilidad de los *Dispositivos 1* al interior del buzón. Esto se pudo lograr debido al bajo perfil del *Dispositivo de protección* seleccionado lo que amplía el espacio disponible para el movimiento del *Dispositivo 1*.

A partir de los resultados se ha llegado a la conclusión de que en el caso del primer experimento de extracción desde el alimentador utilizando una *Dispositivo 1*, el segundo diseño es que tiene mejor desempeño general llegando a obtener una tasa de captura superior al sesenta y cinco por ciento. A partir de esto se recomendó seguir el desarrollo de la segunda garra para esta situación.

En el caso del segundo experimento se obtuvieron resultados similares para dos de los tres diseños, con una puntuación prácticamente igual entre el primer y segundo modelo de *Dispositivo 1*. Ambos fueron capaces de retirar efectiva- y rápidamente los inchancables por lo que se recomendó continuar el desarrollo de ambas soluciones tomando en cuenta las desventajas de cada modelo.

Para el tercer experimento no se lograron obtener resultados estadísticamente significativos para diferenciar un diseño de otro, por lo que se realizó un análisis cualitativo de las características favorables de cada diseño para evaluarlos. Además, se debe destacar que en todos los casos los *Dispositivos 2* capturaron de forma exitosa los inchancables. En el caso del primer diseño, este era capaz de cubrir el mayor porcentaje de material, lo que eventualmente puede aumentar el volumen de inchancables capturados. Principalmente por esta razón, en conjunto con los resultados de la respuesta de “Funcionalidad adicional 3” se recomendó continuar el desarrollo del primer diseño disponible del *Dispositivo 2*.

Bibliografía

- [1] G. Box, J. Hunter, and W. Hunter. *Statistics of Experimenters - Design, Innovation and Discovery*. Wiley, 2003.
- [2] División El Teniente Codelco. *Estadísticas de RISES*. Codelco, 2016.
- [3] CodelcoTech. *02-15-E000-GMA-01 - Matrices de supuestos y restricciones de maqueta de extracción*. Codelco, 2016.
- [4] CodelcoTech. *02-15-E000-GPO-01 - Perfil de operación de maqueta de extracción*. Codelco, 2016.
- [5] CodelcoTech. *02-15-E2A0-MDE-001 - Plano de diseño harnero de captura opción 1*. Codelco, 2016.
- [6] CodelcoTech. *02-15-E2A0-MDE-002 - Plano de diseño Harnero de captura opción 2*. Codelco, 2016.
- [7] CodelcoTech. *02-15-E2A0-MDE-003 - Plano de conjunto, Harnero de captura opción 3*. Codelco, 2016.
- [8] CodelcoTech. *Definición del concepto de solución para la extracción de inchancables*. Codelco, 2016.
- [9] CodelcoTech. *Matriz de pruebas A*. Codelco, 2016.
- [10] CodelcoTech. *02-15-E100-GPR-02 - Procedimiento de pruebas de extracción de inchancables en maqueta*. Codelco, 2017.
- [11] K. Dunn. *Process Improvement Using Data*. Creative Commons, 2018.
- [12] FMA. *IM2-FMA-ME-007 - Garra manipulación 1*. Codelco, 2016.
- [13] FMA. *IM2-FMA-ME-010 - Garra manipulación 2*. Codelco, 2016.
- [14] FMA. *IM2-FMA-ME-011 - Garra manipulación 3*. Codelco, 2016.
- [15] FMA. *IM2-FMA-ME-015 - Conos de protección*. Codelco, 2016.
- [16] U. Grömping. *Tutorial for design experiments using R package RcmdrPlugin.DoE*. Fach-

bereich II, Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2011.

- [17] U. Grömping. *R Package DoE.Base for Factorial Experiments*. Fachbereich II, Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2016.
- [18] H. Hartman. *Introductory Mining Engineering*. Wiley, 1987.
- [19] IM2. *IM2-FMA-DP-001 - Diagrama de proceso y balance de masas*. Codelco, 2016.
- [20] D. Montgomery. *Design and Analysis of experiments*. Wiley, 2003.
- [21] UC. Simula v 2.0, 2018. último acceso: 03-12-2018.
- [22] D. Wheeler. *Understanding Industrial Experimentation*. SPC Press, 1990.

Capítulo 10

Anexos

10.1. Plan de pruebas: Selección de ubicación

Replicado 1			Replicado 2		
Prueba	O. Aplicación	Nivel	Prueba	O. Aplicación	Nivel
1	5	Viga	1	3	Plancha
2	1	Barra	2	5	Viga
3	4	Pl. Soldadas	3	4	Pl. Soldadas
4	2	Malla	4	1	Barra
5	3	Plancha	5	2	Malla

Replicado 3			Replicado 4		
Prueba	O. Aplicación	Nivel	Prueba	O. Aplicación	Nivel
1	4	Pl. Soldadas	1	3	Plancha
2	3	Plancha	2	4	Pl. Soldadas
3	5	Viga	3	1	Barra
4	1	Barra	4	5	Viga
5	2	Malla	5	2	Malla

Replicado 5			Replicado 6		
Prueba	O. Aplicación	Nivel	Prueba	O. Aplicación	Nivel
1	4	Pl. Soldadas	1	5	Viga
2	3	Plancha	2	3	Plancha
3	2	Malla	3	4	Pl. Soldadas
4	1	Barra	4	2	Malla
5	5	Viga	5	1	Barra

Replicado 7		
Prueba	O. Aplicación	Nivel
1	3	Plancha
2	1	Barra
3	2	Malla
4	5	Viga
5	4	Pl. Soldadas

10.2. Plan de pruebas: Selección de *Dispositivo de protección*

Replicado 1		
Prueba	Orden de aplicación	Nivel factor
1	3	Diseño 3
2	2	Diseño 2
3	1	Diseño 1

Replicado 2		
Prueba	Orden de aplicación	Nivel factor
1	1	Diseño 1
2	3	Diseño 3
3	2	Diseño 2

Replicado 3		
Prueba	Orden de aplicación	Nivel factor
1	2	Diseño 2
2	1	Diseño 1
3	3	Diseño 3

10.3. Plan de pruebas: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde frente del alimentador

Replicado 1				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
2	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
3	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
4	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
5	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
6	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
7	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
8	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
9	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral

Replicado 2				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
2	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
3	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
4	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
5	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
6	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
7	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
8	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
9	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron

Replicado 3				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
2	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
3	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
4	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
5	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
6	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
7	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
8	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
9	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral

10.4. Plan de pruebas: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde buzón de alimentación

Replicado 1				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
2	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
3	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
4	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
5	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
6	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
7	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
8	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
9	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron

Replicado 2				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
2	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
3	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
4	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
5	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
6	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
7	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
8	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
9	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral

Replicado 3				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
2	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
3	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
4	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
5	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
6	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
7	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
8	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
9	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral

10.5. Plan de pruebas: Extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

Replicado 1				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral
2	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
3	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
4	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
5	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
6	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
7	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
8	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
9	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral

Replicado 2				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
2	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
3	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
4	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
5	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
6	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
7	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
8	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
9	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral

Replicado 3				
Prueba	Aplicación	Nivel factor A	Nivel factor B	Nivel factor C
1	3	Diseño 1	Plancha	Bajo Mineral
2	9	Diseño 3	Plancha	Costado Apron
3	2	Diseño 1	Malla	Costado Apron
4	7	Diseño 3	Viga	Bajo Mineral
5	1	Diseño 1	Viga	Sobre Mineral
6	8	Diseño 3	Malla	Sobre Mineral
7	4	Diseño 2	Viga	Costado Apron
8	6	Diseño 2	Plancha	Sobre Mineral
9	5	Diseño 2	Malla	Bajo Mineral

10.6. Análisis de varianza: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde frente del alimentador

Tiempo de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	77937	38968	2.394	0.12	
Inchancable	2	6141	3070	0.189	0.83	
Ubicación	2	7822	3911	0.240	0.789	
Diseño:Inchancable	2	22224	11112	0.683	0.518	
Residuals	18	293017	16279			

Calidad de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	2.6667	1.3333	2.250	0.134	
Inchancable	2	0.889	0.4444	0.750	0.487	
Ubicación	2	1.556	0.7778	1.312	0.294	
Diseño:Inchancable	2	2.889	1.4444	2.437	0.116	
Residuals	18	10.667	0.5926			

Estabilidad del dispositivo						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	4.222	2.1111	2.478	0.112	
Inchancable	2	0.667	0.3333	0.391	0.682	
Ubicación	2	4.222	2.1111	2.478	0.112	
Diseño:Inchancable	2	1.556	0.7778	0.913	0.419	
Residuals	18	15.333	0.8519			

Porcentaje de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	18519	9259	4.167	3.26E-02	*
Inchancable	2	741	370	0.167	0.8478	
Ubicación	2	5185	2593	1.167	0.3339	
Diseño:Inchancable	2	2963	1481	0.667	0.5226	
Residuals	18	40000	2222			

10.7. Análisis de varianza: Extracción mediante *Dispositivo 1* y *Dispositivo de protección* desde buzón de alimentación

Tiempo de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.a
Diseño	2	7649	3824	1.911	0.1768	
Inchancable	2	10455	5228	2.612	0.1009	
Ubicación	2	14618	7309	3.652	0.0466	*
Diseño:Inchancable	2	357	178	0.089	0.9152	
Residuals	18	36026	2001			

Tiempo de traslado						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	1867	993.5	1.857	0.1849	
Inchancable	2	2009	1004.5	1.998	0.1646	
Ubicación	2	4063	2031.4	4.040	0.0355	*
Diseño:Inchancable	2	1140	569.9	1.134	0.3438	
Residuals	18	9050	502.8			

Calidad de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	4.741	2.3704	5.818	0.0112	*
Inchancable	2	0.963	0.4815	1.182	0.3294	
Ubicación	2	0.963	0.4815	1.182	0.3294	
Diseño:Inchancable	2	1.407	0.7037	1.727	0.206	
Residuals	18	7.333				

Estabilidad del dispositivo						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	0.519	0.25926	1.167	0.334	
Inchancable	2	0.296	0.14815	0.667	0.526	
Ubicación	2	0.519	0.25926	1.167	0.334	
Diseño:Inchancable	2	0.074	0.03704	0.167	0.848	
Residuals	18	4	0.22222			

Funcionalidad adicional 1						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	12.667	6.333	85.500	6.45E-10	***
Inchancable	2	0.222	0.111	1.500	0.25	
Ubicación	2	0.222	0.111	1.500	0.25	
Diseño:Inchancable	2	0.222	0.111	1.500	0.25	
Residuals	18	1.333	0.074			

10.8. Análisis de varianza:Extracción mediante *Dispositivo 2* desde la descarga del alimentador

Tiempo de instalación						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	548	274	0.176	0.8402	
Inchancable	2	15135	7567	4.854	0.0206	
Ubicación	2	2055	1027	0.659	0.5294	
Diseño:Inchancable	2	2170	1085	0.696	0.5115	
Residuals	18	28061	1559			

Tiempo de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	74	37	0.347	0.711	
Inchancable	2	26	13	0.122	0.886	
Ubicación	2	372.7	186.33	1.748	0.202	
Diseño:Inchancable	2	20.7	10.33	0.097	0.908	
Residuals	18	1918.7	106.59			

Tiempo de retorno						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	6068	3034	3.793	0.0422	
Inchancable	2	157	78.5	0.098	0.908	
Ubicación	2	5047	2523.4	3.154	0.0669	
Diseño:Inchancable	2	3381	1690.5	2.113	0.1498	
Residuals	18	14399	800			

Calidad de captura						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	6.31E-30	3.16E-30	1.000	0.387	
Inchancable	2	6.31E-30	3.16E-30	1.000	0.387	
Ubicación	2	6.31E-30	3.16E-30	1.000	0.387	
Diseño:Inchancable	2	6.31E-30	3.16E-30	1.000	0.387	
Residuals	18	5.68E-29	3.16E-30			

Estabilidad del dispositivo						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	0.519	0.2593	0.467	6.34E-01	
Inchancable	2	0.074	0.037	0.067	0.936	
Ubicación	2	0.074	0.037	0.067	0.936	
Diseño:Inchancable	2	1.185	0.5926	1.067	0.365	
Residuals	18	10	0.5556			

Funcionalidad Adicional 2						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	2	186.2	93.12	2.267	1.32E-01	
Inchancable	2	202.2	101.09	2.461	0.114	
Ubicación	2	29.2	14.62	0.356	0.705	
Diseño:Inchancable	2	141.6	70.82	1.724	0.207	
Residuals	18	739.5	41.08			

Funcionalidad adicional 3						
	DF	Sum Sq	Mean Sq	F Value	Pr(>F)	Sign.
Diseño	1	775.1	775.1	49.175	1.41E-05	***
Inchancable	2	5.5	2.8	0.175	0.842	
Ubicación	2	3.4	1.7	0.107	0.899	
Diseño:Inchancable	2	6.3	3.152	0.267	0.768	
Residuals	18	212.22	11.79			