



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL

APLICACIÓN DEL SISTEMA XPM EN CONSTRUCCIÓN DE
PROTECCIONES COSTERAS Y BASES DE APOYO EN BLOQUES DE
MUELLE. TERMINAL PORTUARIA PUNTA PEREIRA, URUGUAY.

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

RENATO HUMBERTO VARGAS DIAZ

PROFESOR GUÍA:
HUGO BAESLER CORREA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
DAVID ALBERTO CAMPUSANO BROWN
CÉSAR FERNANDO REQUESENS FABRE

SANTIAGO DE CHILE
NOVIEMBRE 2012

Resumen

El proyecto Montes del Plata consiste en la construcción de una planta de celulosa de última generación ubicada en Punta Pereira, Uruguay. El proyecto cuenta con un terminal portuario, constituido por un muelle con dos sitios de atraque de bloques de hormigón, los cuales están apoyados en una base de apoyo compuesta por material granular. La alta turbiedad del Río de La Plata impide la colocación de protecciones costeras de manera convencional y también el nivelamiento de las bases de apoyo. Debido a esto surge la necesidad de utilizar el sistema XPM, el cual es capaz de realizar ambas tareas con exactitud y sin visibilidad.

El eXcavator Position Monitor (XPM) es un sistema que se implementa en una retroexcavadora estándar, el cual permite el control y monitoreo del dragado y depósito de material bajo el agua. Este sistema está compuesto por una computadora, sensores y también un sistema GPS de gran precisión (DGPS-RTK), los cuales entregan la información necesaria para modelar los movimientos de la excavadora y el fondo marino. De esta manera es posible operar la excavadora sin tener una visión de esta.

El objetivo del presente trabajo es realizar un estudio del sistema XPM y presentar su aplicación en terreno. Para ello se estudió el funcionamiento y el comportamiento del sistema en terreno y también la eficiencia de su trabajo. El estudio incluye los costos del sistema para poder compararlo con otros métodos y evaluar la conveniencia de su uso.

De lo observado en terreno y de los costos obtenidos, se concluyó que el sistema XPM puede realizar en forma precisa y eficiente los trabajos de colocación de coraza (protecciones costeras) y que tiene un menor costo en comparación con la colocación utilizando grúas. Finalmente se evaluó la posibilidad incorporar esta tecnología en nuestro país.

Esta memoria se la dedico a mi familia y a mis amigos, quienes me inspiraron a luchar hasta el final durante estos años de sacrificio.

Agradezco a mi Profesor Guía Hugo Baesler y a mis profesores de la comisión David Campusano y Fernando Requesens por tenerme paciencia durante mis largas ausencias y brindarme sus apoyos.

Además agradezco a todas las personas que me permitieron realizar mi memoria en terreno gracias a su disposición y que me permitieron adquirir experiencia profesional y personal. Entre las cuales quiero destacar al equipo mecánico compuesto por: José Flores, Pablo Castillo, José Vergara, Osvaldo Pérez, Juan Gastorene y Roberto Willmer; al equipo de topografía: Hernán Castro, Luis Otárola y también al especialista en electrónica Moisés Merino.

Agradecimientos especiales a Carlos Seminario, Rafael Paredes y a Gabriel Tenorio, quienes se encargaron de mi durante la ausencia de mi padre y que me brindaron de su compañía y conocimientos.

Muchas gracias a mi padre por cuidarme y compartir conmigo durante mi estadía en Uruguay.

Índice de capítulos

1	Introducción	6
1.1	Descripción General del Proyecto.	6
1.2	Colocación de coraza.....	11
1.3	Construcción de bases de apoyo.....	12
2	Descripción y funcionamiento	13
2.1	Descripción del sistema.	13
2.2	Elementos del sistema XPM.....	19
2.2.1	Descripción de elementos básicos.	21
2.2.2	Descripción de elementos adicionales	30
2.3	Funcionamiento del Sistema	33
2.3.1	Funcionamiento General	33
2.3.2	Design	37
2.3.3	Configurator	41
2.3.4	Digisys Digiviewer	43
3	Aplicación del sistema XPM en terreno	48
3.1	Procedimientos.....	48
3.1.2	Procedimiento de calibración de los sensores.....	51
3.1.3	Procedimiento para la colocación de rocas.....	70
3.1.4	Procedimiento de armado de núcleo y filtro	73
3.1.5	Procedimiento de enrazado de bases	75
3.1.6	Colocación de rocas con grúa.....	76
3.2	Rendimientos	78
3.3	Análisis de la aplicación del sistema XPM	79
3.3.1	Capacidades	79
3.3.2	Limitaciones	81
3.3.3	Recomendaciones	82
3.4	Comparación la colocación de coraza con grúa y excavadora.....	84
4	Contingencias	85
4.1	Descripción de problemas y soluciones	85
5	Análisis económico	93
5.1	Costo de la excavadora implementada con el sistema XPM.....	93
5.2	Costo de la grúa implementada con sistema Rover	94
5.3	Comparación de costos.....	95

6	Conclusiones y Comentarios	96
6.1	Aplicación del sistema XPM según la metodología empleada.....	96
6.1.1	Enrazamiento de bases de apoyo	96
6.1.2	Colocación de coraza	97
6.2	Consejos y Recomendaciones.....	98
6.3	Evaluación de su uso en Chile	98
7	Glosario	100
8	Bibliografía	103
	Anexo A: Explicación general del sistema GPS	104
	Anexo B: Manual del Operador	106
	Anexo C: Registro y cálculo de rendimientos	134

Índice de imágenes

Imagen 1.1: Punta Pereira, Uruguay	7
Imagen 1.2: Modelo 3D de la planta general del proyecto	8
Imagen 1.3: Excavadora Komatsu PC-800 con brazo largo	12
Imagen 1.4: Bloques de hormigón	13
Imagen 1.5: Base de apoyo de prueba	13
Imagen 2.1: Computadora (CPU).....	22
Imagen 2.2: Conexiones de entrada de la computadora	22
Imagen 2.3: Monitores pantalla plana	23
Imagen 2.4: Mouse.....	24
Imagen 2.5: Teclado de 32 botones	24
Imagen 2.6: Teclado numérico	24
Imagen 2.7: Adaptador USB	24
Imagen 2.8: Transductor de ángulo de la pluma	25
Imagen 2.9: Transductor de ángulo del stick.....	26
Imagen 2.10: Transductor de ángulo del balde.....	26
Imagen 2.11: Transductor de rotación.....	27
Imagen 2.12: Sensor de inclinación frontal y lateral.....	27
Imagen 2.13: Caja de distribución I/O.....	28
Imagen 2.14: Interior de la caja de distribución	28
Imagen 2.15: Caja de poder	29
Imagen 2.16: Inversor	30
Imagen 2.17: Antena receptora (GPS)	31
Imagen 2.18: Receptor GPS.....	31
Imagen 2.19: Antenas montadas en estructura trasera	32
Imagen 2.20: Estación base.....	32
Imagen 2.21: Botón de vertido.....	33
Imagen 2.22: Conexiones al computador.....	35
Imagen 2.23: Conexiones a la caja de distribución I/O	35
Imagen 2.24: Esquema del funcionamiento eléctrico	36
Imagen 2.25: Diseño del eje	38
Imagen 2.26: Creación de perfiles en el Design	39
Imagen 2.27: Creación del DTM	40
Imagen 2.28: Visualización del DTM.....	40
Imagen 2.29: Exportación del DTM	41
Imagen 2.30: Disposición de elementos del Configurator	42
Imagen 2.31: Ejemplo de configuración.....	43
Imagen 3.1: Retiro de encoder	48
Imagen 3.2: Instalación de sensores.....	49
Imagen 3.3: Apoyos de varillas	50
Imagen 3.4: Unión varilla y apoyo	50

Imagen 3.5: Unión de varilla con encoder	50
Imagen 3.6: Instalación de sensores de inclinación	51
Imagen 3.7: Cambio de nivel de acceso	52
Imagen 3.8: Calibración ingenieril del sensor de rotación.....	52
Imagen 3.9: Calibración ingenieril del sensor de inclinación frontal	58
Imagen 3.10: Calibración ingenieril del sensor de inclinación lateral.....	61
Imagen 3.11: Calibración operacional de sensores	62
Imagen 3.12: Posición de calibración operacional	63
Imagen 3.13: Ángulo de calibración pluma	64
Imagen 3.14: Ángulo de calibración stick.....	64
Imagen 3.15: Ángulo de calibración balde	64
Imagen 3.16: Ventana de prueba	65
Imagen 3.17: Desnivel de la pluma calculado por el sistema XPM	66
Imagen 3.18: Desnivel del stick calculado por el sistema XPM	67
Imagen 3.19: Desnivel del balde calculado por el sistema XPM.....	68
Imagen 3.20: Edición de coordenadas de altura	69
Imagen 3.21: Posición de trabajo	70
Imagen 3.22: Grúa Link Belt LS-518	77
Imagen 3.23: Ubicación del receptor GPS	78
Imagen 3.24: Libreta electrónica y grilla de colocación	78
Imagen 3.25: Protección caja de distribución	83
Imagen 3.26: Protección sensor del balde.....	83
Imagen 4.1: Rebaje	85
Imagen 4.2: Ojo del vástago original	85
Imagen 4.3: Plancha flexionada.....	86
Imagen 4.4: Cilindro hidráulico del grapo	86
Imagen 4.5: Ojo de vástago fracturado	86
Imagen 4.6: Rótula fracturada	86
Imagen 4.7: Refuerzo de la pluma	87
Imagen 4.8: Modificación de coordenadas del origen del sistema coordinado.....	88
Imagen 4.9: Modificación de configuración del rumbo	89
Imagen 4.10: Mensajes de advertencia de los sensores de ángulo	92
Imagen 4.11: Conector X4 dañado.....	92
Imagen 4.12: Tarjetas internas (Módulos M027 y M047)	93
Imagen 7.1: Grapo	100
Imagen 7.2: Paralelogramo.....	101
Imagen 7.3: Pasadores	102

Índice de figuras

Figura 1.1: Planta del rompeolas y muelle.....	8
Figura 1.2: Sección transversal del rompeolas y sitio de atraque.....	9
Figura 1.3: Isométrico de bloque tipo 9.....	10
Figura 1.4: Juntas y rellenos típicos.....	11
Figura 2.1: Visualización en planta.....	15
Figura 2.2: Visualización lateral.....	16
Figura 2.3: Dimensionamiento de elementos y representación de ángulos de giro...17	
Figura 2.4: Vista superior del modo de vertido.....	19
Figura 2.5: Vista lateral del modo de vertido.....	19
Figura 2.6: Disposición de los elementos del XPM.....	21
Figura 2.7: Digisys Digiviewer.....	44
Figura 2.8: Ejemplo de vista superior.....	47
Figura 2.9: Ejemplo de vista lateral.....	47
Figura 3.1: Rotación.....	53
Figura 3.2: Alineación de cabina con orugas.....	54
Figura 3.3: Posición de calibración de inclinómetros.....	55
Figura 3.4: Lectura de inclinación 1.....	55
Figura 3.5: Rotación de la cabina.....	56
Figura 3.6: Lectura de inclinación 2.....	56
Figura 3.7: Lectura de inclinación 3.....	57
Figura 3.8: Cabina perpendicular a las orugas.....	58
Figura 3.9: Lectura de balance 1.....	59
Figura 3.10: Rotación de la cabina.....	59
Figura 3.11: Lectura de balance 2.....	60
Figura 3.12: Lectura de balance 3.....	61
Figura 3.13: Posición de calibración ingenieril (recomendada).....	63
Figura 3.14: Posición de calibración ingenieril (alternativa).....	63
Figura 3.15: Posición de calibración inicial.....	64
Figura 3.16: Cota calculada por el sistema XPM.....	69
Figura 3.17: Progresiva de la excavadora.....	70
Figura 3.18: Colocación de roca.....	71
Figura 3.19: Posicionamiento del grapo sobre la roca.....	72
Figura 3.20: Marca de roca puesta.....	72
Figura 3.21: Armado del talud (núcleo o filtro).....	74
Figura 3.22: Zonas trabajadas.....	74
Figura 3.23: Posicionamiento antes de enrazar.....	75
Figura 3.24: Enrazado.....	76
Figura 4.1: de advertencia de pérdida de señal del GPS.....	91
Figura 7.1: Partes de una excavadora.....	101
Figura 7.2: Partes del cilindro hidráulico.....	103

1 Introducción

En Chile actualmente las operaciones submarinas en las obras marítimas son examinadas por buzos y es necesario realizar extensas actividades de verificación para asegurar la construcción del proyecto. El tiempo empleado en la inspección está muy relacionado con las condiciones a las cuales se enfrentan bajo agua. Tanto profundidad como turbiedad del agua son algunas dificultades que se tiene debido a que la visibilidad puede ser casi nula, las corrientes y el oleaje también son otros factores que retrasan el desarrollo del proyecto.

Frente a esta situación es importante estudiar el sistema XPM, el cual permite tener un control y registro de las actividades submarinas como el dragado, colocación de coraza, enrazamiento, etc. Estas faenas involucran grandes equipos, por lo que es vital mejorar la productividad. Por este motivo, la constructora BELFI S.A. encomendó el desarrollo del presente trabajo de título para realizar un estudio de la aplicación del sistema XPM.

El sistema XPM había sido empleado por Belfi el año 2004 en Perú, sin embargo esta tecnología sigue siendo nueva y la información es limitada. Por lo tanto, el alumno tuvo que presentarse en terreno para estudiar el funcionamiento y el comportamiento del sistema XPM, permitiendo de esta manera adquirir los conocimientos necesarios para poder brindar soporte técnico y también desarrollar el presente trabajo.

1.1 Descripción General del Proyecto.

El proyecto de la empresa mandante Montes del Plata, constituida por las empresas Arauco (Chile) y Stora Enso (Suecia-Finlandia) consiste en la construcción de una planta de celulosa de última generación que incorpora también una unidad abastecedora de energía renovable para el autoabastecimiento a partir de biomasa y la construcción de una terminal portuaria para la exportación de celulosa y el ingreso de insumos. La planta se encuentra frente a Buenos Aires en Punta Pereira, Uruguay (Imagen 1.1). El proyecto se inició a mediados del 2011 y la construcción de todas las obras estaban proyectada inicialmente para ser concluidas en 18 meses, sin embargo debido a distintos motivos laborales se ha reconsiderado un nuevo

plazo de 24 meses. Montes del Plata contrató a diferentes empresas para realizar el trabajo, entre las más importantes se encuentran las siguientes: Andritz, Belfi-Techint, Degremont-Saceem, OHL Uruguay, KSH-Berkes-Erco y Pöyry.

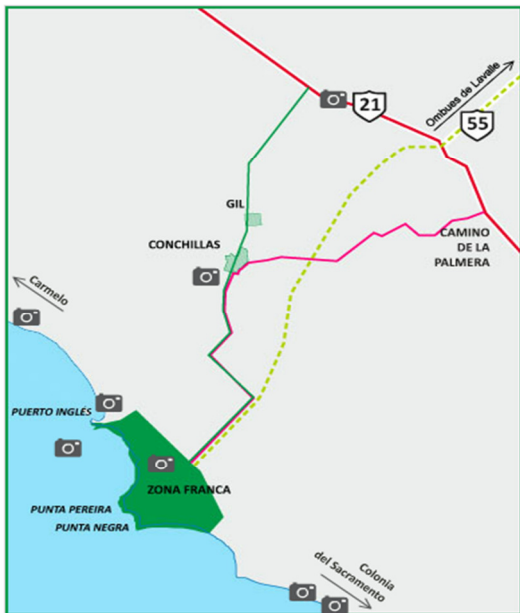


Imagen 1.1: Punta Pereira, Uruguay

La planta contará con un terminal portuario, el cual tiene por objetivo descargar las materias primas para la fabricación de celulosa y también el embarque para su exportación. Para ello cuenta con dos muelles de bloques de hormigón, uno para barcazas, que hace posible la recepción de madera rolliza y otro para embarcaciones oceánicas cuyo objetivo es exportar la celulosa. La construcción del muelle sirve también como un rompeolas de escollera, protegiendo los sitios de atraque y permitiendo la carga y descarga de los barcos (Imagen 1.2, Figura 1.1 y Figura 1.2). Se realizó también un dragado de 2 millones de metros cúbicos para alcanzar la cota -12.25m para asegurar que el calado de los barcos no tenga contacto con el fondo fluvial. Las construcciones de las obras de abrigo y del muelle fueron encargadas a la empresa BELFI-TECHINT constituida por las empresas constructoras BELFI (Chile) y TECHINT (Argentina).



Imagen 1.2: Modelo 3D de la planta general del proyecto

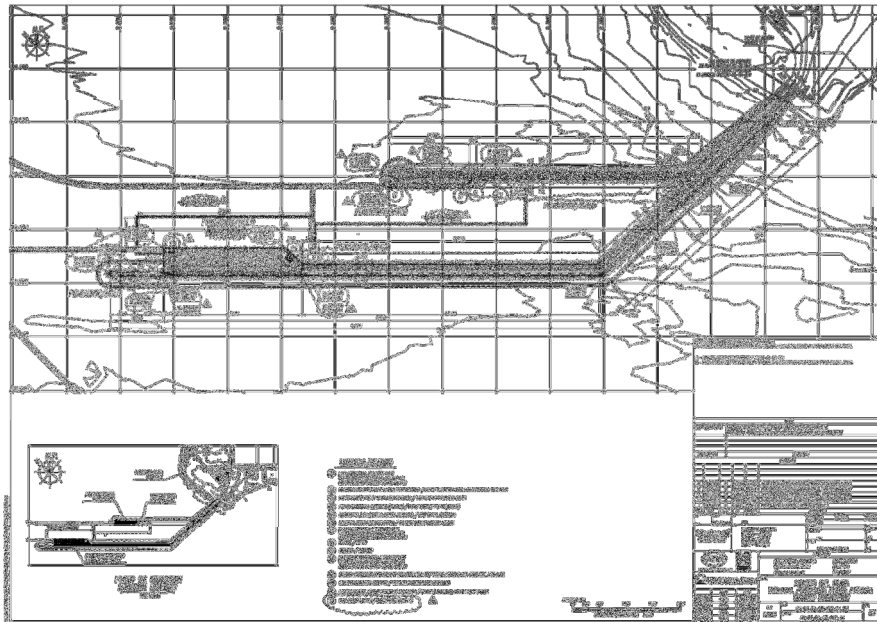


Figura 1.1: Planta del rompeolas y muelle

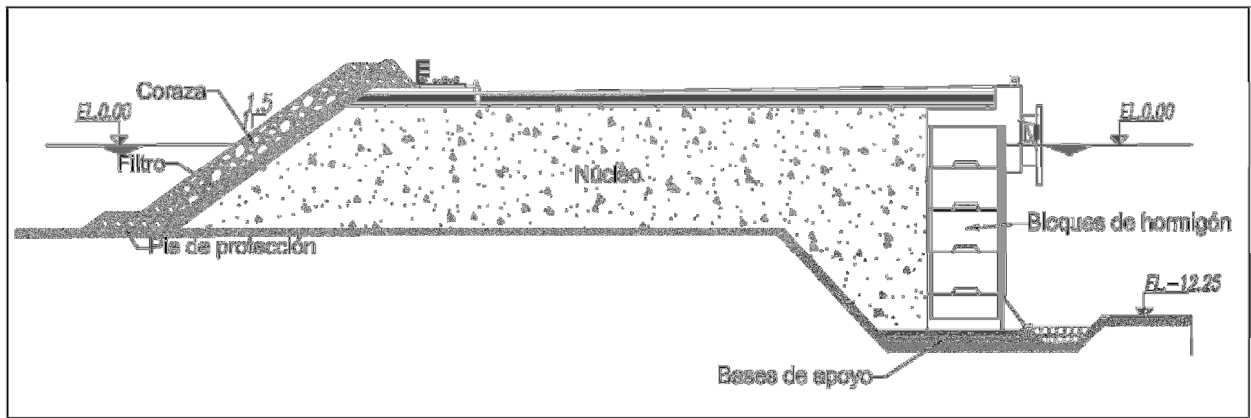


Figura 1.2: Sección transversal del rompeolas y sitio de atraque

Los rompeolas de escolleras consisten en estructuras que son capaces de proteger a las embarcaciones frente al oleaje y corriente, disipando la energía que tiene la ola entrante y disminuyendo su altura. Usualmente están compuestos por tres capas de material granular y enrocado: núcleo, filtro y coraza. La coraza (protecciones costeras y fluviales) está en contacto directo con las olas y está conformada por rocas o elementos de hormigón prefabricado de mayor tamaño que el núcleo y el filtro, cuyo objetivo es impedir que el oleaje desarme la estructura del dique y de disipar la energía de las olas. En la base del talud se construye un pie de protección para evitar el socavamiento del terreno.

El abastecimiento de rocas fue suministrado por tres canteras locales: Montes del Plata, Artigas y Riachuelos, situadas a 9, 10 y 80 kms de la obra respectivamente. El núcleo está compuesto por material granular exento de finos, cuya granulometría varía de rocas que pasan por la malla #4 hasta rocas de 30kg. El material es transportado por camiones tolvas de 40 toneladas y luego es esparcido con bulldozers a lo largo del muelle. El filtro consiste en rocas que varían de 1.5" hasta 750kg y se colocarán con el balde de las retroexcavadoras CAT320BL y CAT325BL, conformando un talud de 1.5:1 (H:V). La coraza estará compuesta por dos capas de rocas de 1 a 1.8 toneladas (1.6 toneladas promedio) y se utilizará una excavadora Komatsu PC-800 implementada con el sistema eXcavator Position Monitor (XPM) para su colocación bajo el agua y excavadoras convencionales para la colocación de corazas que se dispongan sobre el nivel del agua. El pie de protección del talud está conformado con el mismo tipo de material que la coraza y se colocará con una grúa Link-Belt LS-518. La grúa es implementada con un sistema Rover¹ (DGPS-RTK²), el cual consiste en un GPS de gran precisión que se utiliza frecuentemente en topografía. Cabe señalar que para la construcción del pie de protección del talud también se utilizará la retroexcavadora PC-800 utilizando el sistema XPM (eXcavator Position

Monitor). En la Figura 1.2 se presenta un esquema general de la sección del muelle y la disposición de los distintos elementos y componentes que conforman el rompeolas y el sitio de atraque.

El frente de atraque cuenta con un sitio diseñado para naves oceánicas de 75.000DWT con una eslora de 220m y el otro para barcasas de 6.000DWT con eslora de 95m. Cada sitio de atraque está estructurado por bloques de hormigón montados uno sobre otro, conformando un muro gravitacional. El peso propio y la configuración con la que están dispuestos han sido diseñados para evitar el volcamiento y deslizamiento de estos (funcionamiento similar a un muro de contención gravitacional).

En este proyecto los bloques prefabricados tienen una sección transversal tipo "H" (Figura 1.3), los cuales serán rellenos en su interior con material granular una vez que se encuentren puestos en su lugar. Cada bloque tiene una llave de corte en la parte superior para evitar que estos se deslicen. Además los desplazamientos entre bloques adyacentes se encuentran restringidos por medio de una unión en las alas de cada elemento (Figura 1.4). El muro gravitacional de bloques no se fundará en contacto directo con el fondo fluvial, pues el terreno es muy irregular y la primera hilada de bloques puede quedar desnivelada. Por lo tanto, en el proyecto surge la necesidad de colocar previamente una base de material granular que constituya el sello de fundación de los bloques y distribuya mejor las tensiones y deformaciones en el suelo. Esta base de sello de fundación del muro deberá ser compactada y emparejada bajo agua, para la cual se necesita de un método constructivo y equipo que sea capaz de hacer lo que requiera el proyecto.

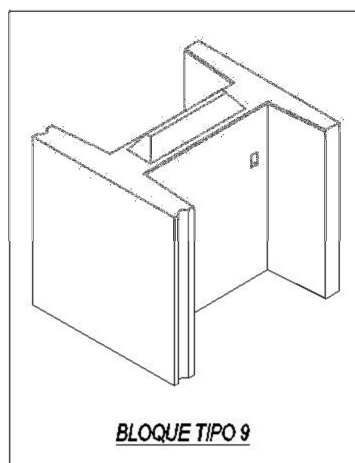


Figura 1.3: Isométrico de bloque tipo 9

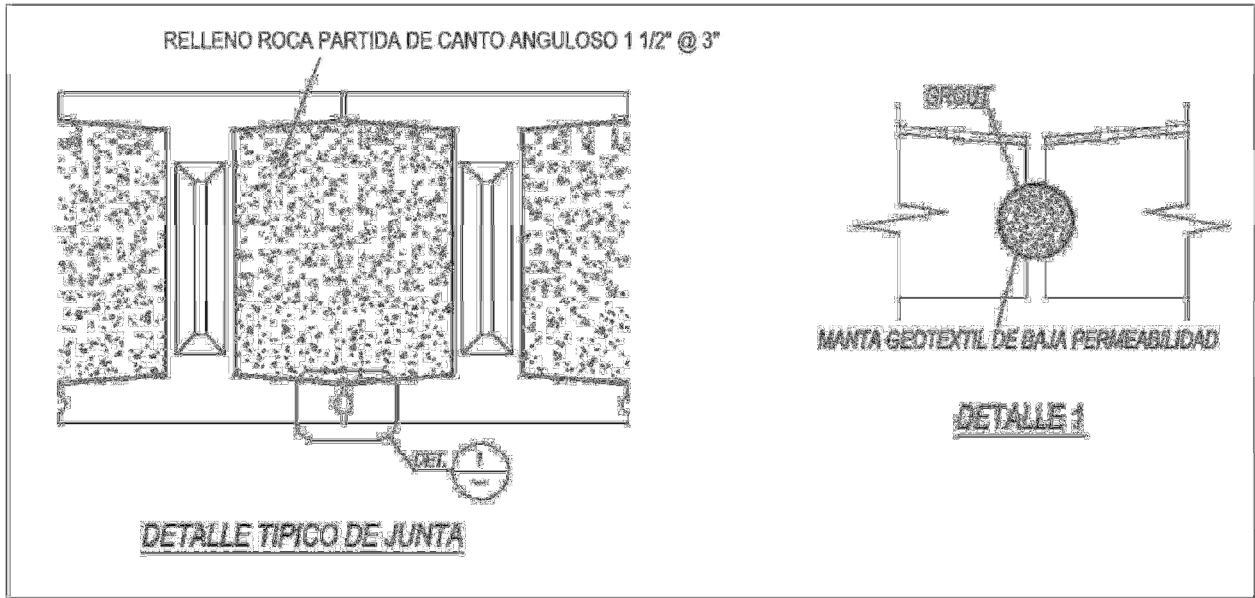


Figura 1.4: Juntas y rellenos típicos

1.2 Colocación de coraza.

Las protecciones costeras, comúnmente llamado enrocado o coraza, son colocados normalmente en Chile utilizando grúas y con buzos dirigiendo las maniobras. Debido a la alta turbiedad del Río de la Plata, la visibilidad bajo agua es nula y la colocación de coraza no es posible con la metodología tradicional. De este modo, para la construcción de este proyecto fue requerido un sistema capaz de colocar rocas en forma intercalada, que lo haga sin visibilidad, con control y registro, logrando una eficiencia en el uso de materiales y tiempos. Para ello, la empresa constructora BELFI compró el sistema XPM (eXcavator Position Monitor) a la empresa holandesa IHC Systems, el cual se implementó en una excavadora Komatsu PC-800 (Imagen 1.3).

La excavadora mediante una herramienta hidráulica, llamada comúnmente en terreno como "grapo³", cogerá las rocas en el acopio y las depositará bajo el agua conformando dos capas de material y un talud especificado en los diseños. El brazo original de la excavadora PC-800 no tenía alcance suficiente para colocar las rocas, de modo que se fabricó un brazo más largo en taller. El sistema XPM implementado en la PC-800 permite visualizar los movimientos de la excavadora y la ubicación de esta utilizando sensores y un sistema GPS de gran precisión (DGPS-RTK, Differential Global Positioning Systems - Real Time Kinematic). Además permitirá visualizar el fondo

marino y la sección transversal del dique en construcción. Para este problema, la función fundamental del sistema es poder visualizar, controlar y registrar los movimientos de la excavadora cuando está bajo el agua y dejar un registro en el modelo del lugar donde fue depositada la roca para que el operador pueda identificar las zonas en las cuales ya ha trabajado. El sistema tiene la capacidad de hacer una verificación submarina, determinando la cota de la posición de las rocas colocadas. La excavadora trabajará desde el nivel superior del dique y tomará las rocas del acopio suministrado por los camiones. En forma paralela, una grúa Link-Belt LS-518 (150ton) colocará las rocas del pie de protección que se encuentren más alejadas del dique.



Imagen 1.3: Excavadora Komatsu PC-800 con brazo largo

1.3 Construcción de bases de apoyo.

Las bases de apoyo consisten en material granular depositados en una zanja realizada previamente por una dragadora de Dredging International. Las bases de apoyo tienen por objetivo soportar a los bloques y proveerles una superficie nivelada, distribuyendo de mejor manera las tensiones y deformaciones en el suelo. Las bases están compuestas por desecho de cantera seleccionado que varía de 1.5" a 6" que constituirán el sello de fundación de los cinco niveles de bloques de hormigón que conforman los sitios de atraques del muelle (Imagen 1.4 e Imagen 1.5). Se requiere nivelar estas bases de apoyo con gran precisión en forma previa a la colocación de los bloques debido a que un pequeño desnivel en la base de apoyo genera un desalineamiento de la instalación de los bloques, sus juntas y terminación superficial. La tolerancia exigida para la terminación de la base de apoyo, de acuerdo al método de construcción, es de 5cm. Por lo tanto, el emparejamiento de las bases y la colocación misma de los bloques requiere

de gran exactitud. Por este motivo, la metodología de construcción estableció el uso del sistema XPM, ya que permite alcanzar dichas precisiones y también puede hacerlo sin visibilidad de la zona en la cual se está trabajando bajo agua.



Imagen 1.4: Bloques de hormigón



Imagen 1.5: Base de apoyo de prueba

2 Descripción y funcionamiento

2.1 Descripción del sistema.

El XPM (eXcavator Position Monitor) es un sistema que está conformado por sensores de ángulos, sensores de inclinación, sistema DGPS-RTK, una computadora, dos monitores y tres programas computacionales, los cuales se implementan en una excavadora estándar y permiten modelar los movimientos de la excavadora bajo agua y también el fondo marino. De esta manera se tiene un control y monitoreo de la excavadora trabajando sin visibilidad directa. El sistema XPM está diseñado para controlar las excavaciones bajo agua, en particular con la excavadora posicionada sobre un pontón y no está diseñado específicamente para dirigir la colocación de protecciones costeras ni enrazar, sin embargo es posible utilizarlo en dichas actividades y en otras aplicaciones. Lo que hace el sistema principalmente es captar todos los movimientos que tiene la excavadora para luego replicarlos y visualizarlos en los monitores instalados dentro de la cabina, de modo que el operador puede tener un control y registro de los movimientos de cada

parte de la excavadora que se encuentra sumergida bajo el agua y también conocer la información del fondo marino. El uso de sistemas DGPS-RTK tiene un rol fundamental pues posiciona a la excavadora en una coordenada geográfica y también define la cota a la que se encuentra.

El sistema XPM emplea tres programas computacionales que permiten el funcionamiento del sistema (Configurator, Design y Digisys Digiviewer). El programa de configuración permite modificar todas las dimensiones y las partes de la excavadora, los colores, los parámetros a mostrar en pantalla, etc. En el programa de diseño se crean los perfiles de las excavaciones que se requieran hacer y el terreno del fondo marino. El visualizador (Digisys Digiviewer) muestra en tiempo real la posición de la excavadora y del terreno de su entorno, el cual es presentado en base a modelos digitales, DTM⁴ (Digital Terrain Models).

Existen dos pantallas instaladas dentro de la cabina que presentan el modelo de la excavadora trabajando en planta y de perfil (Figura 2.1 y Figura 2.2). En ambas, la representación del terreno es diferente y tienen distintas funcionalidades. El sistema trabaja con tres modelos de terreno (DTM) diferentes: el terreno del fondo marino (perfil de dragado), el perfil teórico y el perfil diferencial. Este último se genera automáticamente en base a la diferencia entre las cotas del terreno del fondo marino con las del perfil teórico.

En la vista en planta se observa el diseño de todo el proyecto y el DTM presentado corresponde al perfil diferencial, permitiendo al operador visualizar mediante una escala de colores las zonas donde ya realizó el trabajo y cuantificar lo que le aún no se ha hecho. Cuando se requiere dragar, lo ideal es que el perfil diferencial tenga un color asociado al valor cero en toda su extensión, lo que indicaría que la cota terreno alcanzó la del diseño y por lo tanto no se requiere seguir excavando. Cada vez que se excave material el color del perfil diferencial cambia, pues la diferencia de cotas entre el terreno y el perfil teórico varía. En la Figura 2.1 se presenta la vista en planta del sistema y de los cambios en el perfil diferencial al realizar una excavación.

En la vista lateral el operador observa la sección transversal de la excavación, la cual indica con más detalle la forma que tiene (taludes, zanjas, etc....). En esta vista, los DTM presentados corresponden al perfil de dragado y el teórico, los cuales no tienen asociado una escala de colores

pues permiten observar directamente el terreno que se encuentra por sobre o debajo del diseño. Sin embargo el sistema utiliza dos colores (rojo y verde) para visualizar con mayor facilidad el terreno que debe ser removido y el sobre excavado. En la Figura 2.2 se presenta un par de imágenes de la vista lateral, simulando una excavación. El color verde indica el material que se encuentra por sobre el perfil teórico y el color rojo indica la zona sobre excavada. La línea amarilla que separa ambos colores representa el perfil teórico. Cuando la excavadora adquiere movimiento, la zona de color verde que es barrida por el balde desaparece, pues el programa interpreta que se excavó satisfactoriamente. En forma similar, si el balde pasa por terreno que se encuentra por debajo del perfil teórico se marcará de color rojo, indicando la zona sobre excavada.

Para tener un completo control del trabajo, el operador debe utilizar ambas pantallas, la vista lateral para realizar las excavaciones y la vista superior para identificar la extensión de la excavación que deberá cubrir.

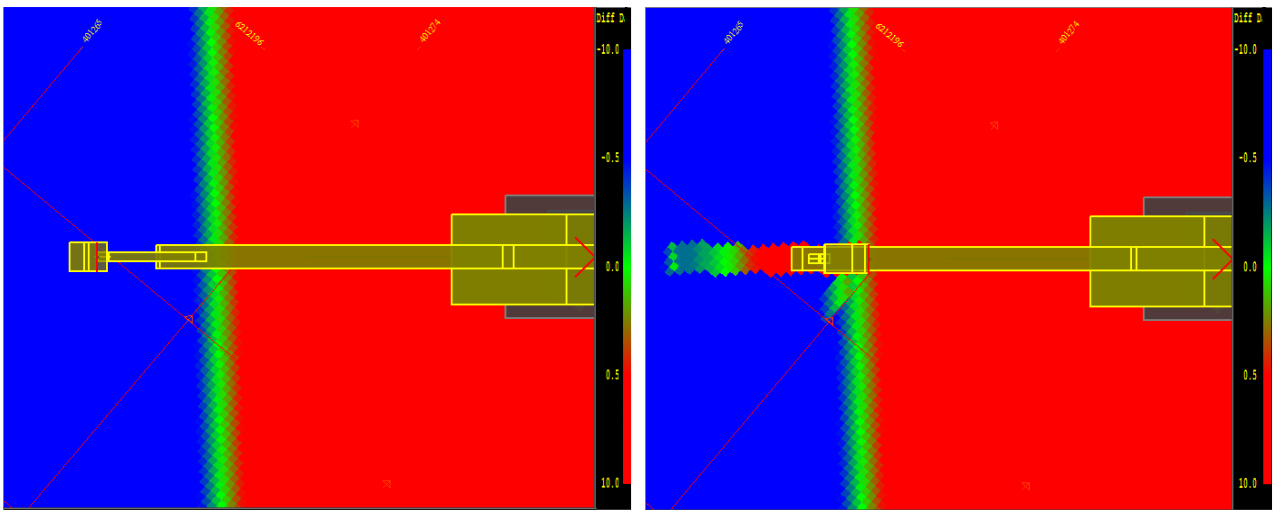


Figura 2.1: Visualización en planta

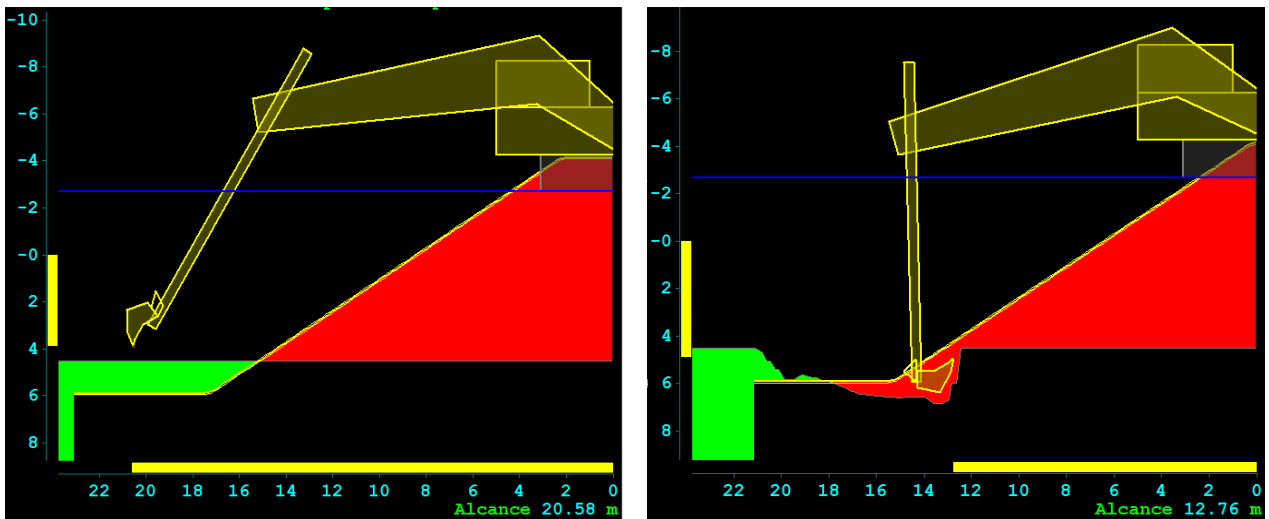


Figura 2.2: Visualización lateral

Los movimientos de la excavadora son captados por transductores de giro instalados en las articulaciones de cada elemento (tres en el brazo y uno en el eje de rotación de la excavadora), los cuales envían su información al computador a través de cables diseñados específicamente para las operaciones submarinas (impermeables, resistentes a la fatiga y a los golpes). El objetivo de los transductores es cuantificar el ángulo que forma cada parte del brazo, para luego poder modelar el movimiento y también la rotación de la cabina. Por este motivo se encuentran instalados estratégicamente en las articulaciones (Figura 2.3). Para que el modelo represente correctamente el movimiento real de la excavadora es necesario medir precisamente las diferentes dimensiones de la excavadora indicadas por el manual de IHC Systems (largo del brazo, altura de la orugas, etc.) y luego calibrar el sistema para hacer coincidir la posición real de la excavadora con la modelada.

Combinando la información de los sensores de giro y las dimensiones de cada elemento, se pueden determinar las coordenadas relativas con respecto al centro de rotación de la excavadora (CRP⁵) utilizando funciones trigonométricas. De esta manera el programa calcula internamente la posición de todas las partes de la excavadora. En la Figura 2.3 se presentan las distancias de cada elemento con respecto al centro de rotación (A,A1,B,B1...) que son calculadas por el sistema y también se presenta una imagen de cómo se modela la excavadora. Debido a que el desnivel en el terreno también influye al momento de obtener las coordenadas, se utilizan dos sensores de inclinación que permiten determinar la inclinación frontal y lateral, corrigiendo este factor. Los sensores de inclinación son

fundamentales en caso de que la excavadora se encuentre posicionada sobre un pontón y el oleaje mueva en forma constante la base en la cual se apoya.

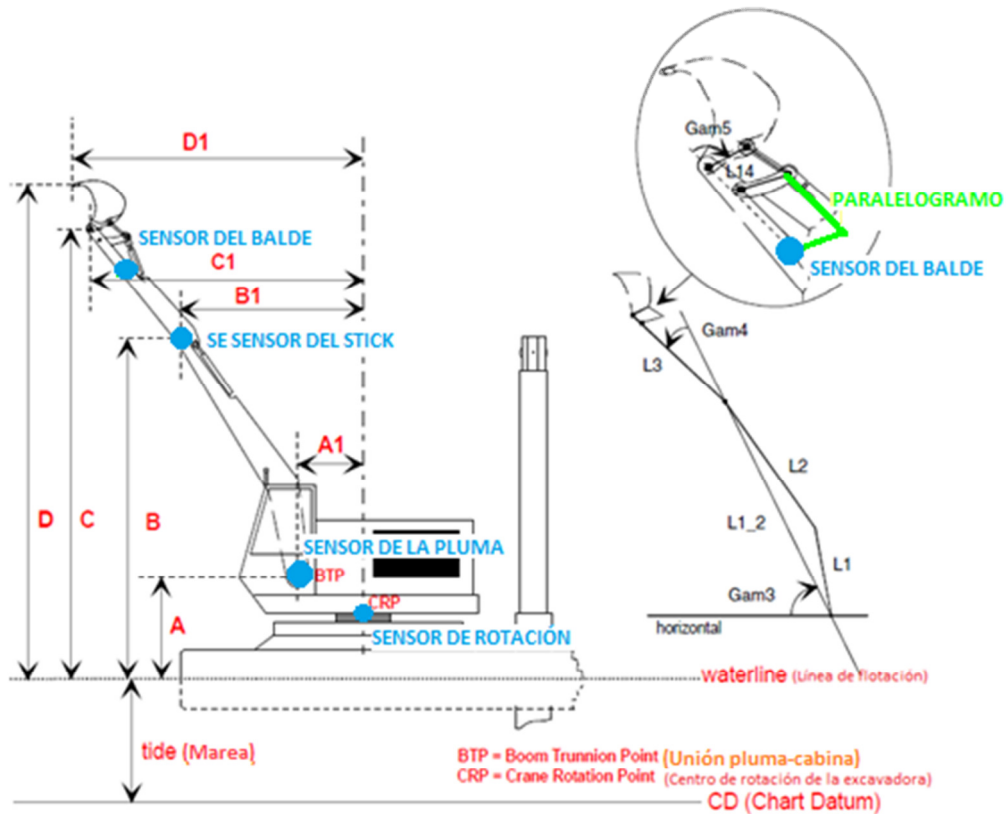


Figura 2.3: Dimensionamiento de elementos y representación de ángulos de giro

El sistema XPM tiene implementado un sistema de posicionamiento global diferencial en tiempo real (DGPS-RTK) el cual permite conocer el rumbo (Azimut) y la posición geográfica de la excavadora (Coordenadas Norte y Este en sistema UTM). Para ello, el sistema GPS cuenta con dos antenas receptoras montadas en una estructura externa instalada en la parte trasera de la excavadora y una estación base instalada en tierra para corregir la posición. La precisión del DGPS-RTK en las mejores condiciones es del orden de 1cm en el plano horizontal y 2cm en la vertical, la cual es superior al del GPS convencional. En el Anexo A se presenta una explicación general sobre el funcionamiento del sistema DGPS-RTK.

El GPS sólo determina la posición geográfica de la antena y se debe realizar un transporte de coordenadas para conocer la posición del centro de rotación de la excavadora. Estos cálculos son realizados internamente por el programa, por ende necesita que se le ingresen correctamente las distancias de las antenas al centro de rotación para obtener un buen resultado. Una vez

determinada la posición del centro de rotación el programa puede calcular las coordenadas y cotas de de todas las articulaciones del brazo y también las de la punta del balde. Conocer las coordenadas y la cota de la punta del balde es de suma importancia pues se pueden hacer verificaciones submarinas determinando la cota del fondo.

El sistema XPM puede utilizarse para otras labores además de excavar. Por este motivo el sistema puede modelar diferentes herramientas de trabajo. En el programa de configuración se pueden configurar distintos tipos de plumas, sticks⁶ o herramientas de trabajo. El programa tiene pre configuradas distintas herramientas entre las más comunes se encuentran los baldes, pulpos, martillos y clamshells.

Adicionalmente el sistema cuenta con una opción llamada modo de vertido, el cual se activa con un botón instalado en la cabina llamado "Dump switch" (botón de vertido). El modo de vertido sirve para registrar el lugar y las veces en donde se ha realizado un vertido de material y también para realizar una actualización del fondo marino en forma puntual. Al presionar el botón, el sistema simula un vertido y se crea una grilla cuadrada en el modelo del terreno de la vista en planta (Figura 2.4). El sistema puede trabajar hasta con 6 tipos de suelos diferentes. Al mismo tiempo, en la vista lateral, el fondo marino actualiza su cota en forma puntual, marcando presencia de terreno justo en donde se encuentra posicionado el extremo del grapo. En la Figura 2.4 y Figura 2.5 se puede observar las grillas de vertido y la actualización del terreno del fondo marino. Las letras presentadas en el interior de la grilla representan el tipo de suelo vertido y el número indica el número de veces que se ha vertido en cada una.

El botón de vertido tiene solamente un efecto eléctrico para simular su apertura en el programa y no tiene ninguna relación con el funcionamiento hidráulico de la apertura o cierre del grapo, es decir, si el operador abre el grapo para depositar rocas y no presiona el botón de vertido, el programa no puede detectar este movimiento y por ende tampoco realizará ninguna acción. Por lo tanto el operador debe presionar el botón cada vez que se deposita una roca. Esta opción es fundamental para la colocación de rocas bajo el agua, pues permite al operador marcar las zonas donde se colocó material e identificar los lugares donde falta.

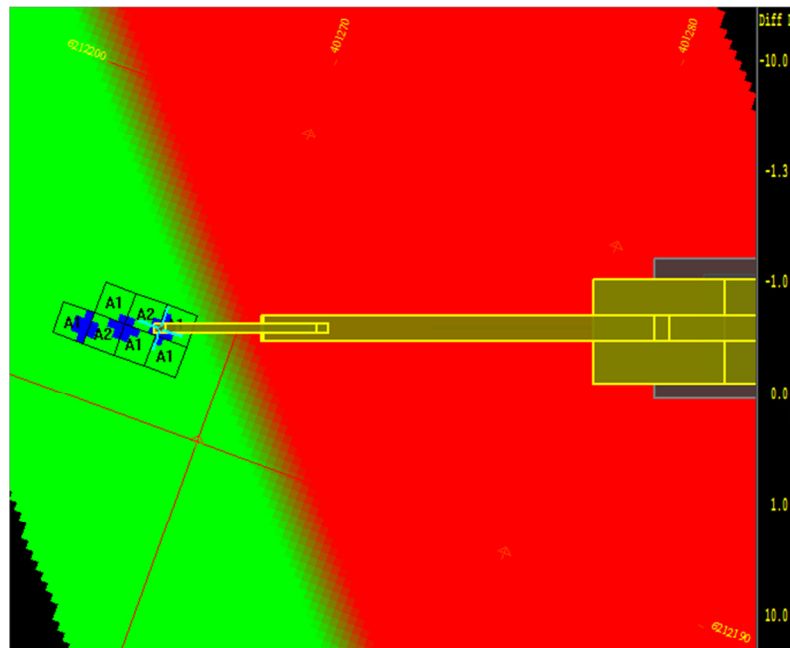


Figura 2.4: Vista superior del modo de vertido

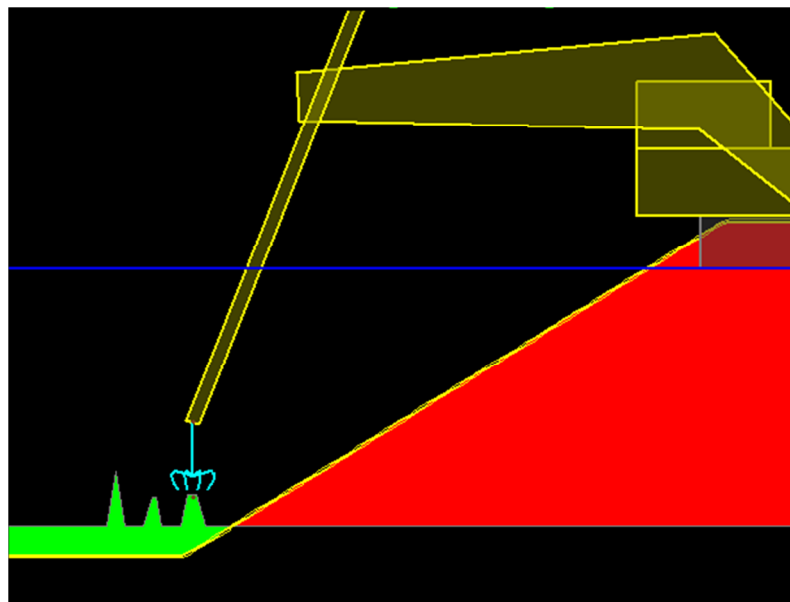


Figura 2.5: Vista lateral del modo de vertido

2.2 Elementos del sistema XPM

El sistema XPM tiene una gran variedad de accesorios, entre los cuales se encuentran los componentes básicos y los adicionales que amplían sus funciones. En esta sección se presentarán los elementos más importantes,

cuya información aparece en el manual de IHC Systems o se ha obtenido por experiencia en terreno. En la Figura 2.6 se muestra la ubicación esquemática de los más importantes.

El sistema XPM básico tiene una mínima cantidad de accesorios que le permiten funcionar, sin embargo es muy limitado pues no incorpora un sistema DGPS-RTK y la posición deberá ser ingresada en forma manual. A continuación se presentan los elementos básicos.

- Transductor⁷ de giro del balde. (1)
- Transductor de giro de stick. (2)
- Transductor de giro de la pluma (boom). (3)
- Transductor de giro de rotación. (4)
- Transductor de inclinación frontal (inclinómetro). (5)
- Computadora con entradas USB (CPU). (6)
- Teclado numérico, teclado de 32 botones y ratón (mouse).
- Dos monitores pantalla plana. (7)
- Inversor 24DC/230AC. (8)
- Caja de poder.
- Caja de distribución I/O

Es posible solicitar accesorios e instrumentos adicionales para ampliar sus funciones o solicitar a IHC Systems alguna configuración adicional dependiendo de lo que se requiera. Los elementos listados a continuación corresponden a los accesorios adicionales más comunes y que aparecen en el manual o en los catálogos.

- Posición de alcance de grúa.
- Posición del carro de pilones.
- Calado del pontón. (9)
- Posición de la marea.
- Posición y rumbo de la excavadora (DGPS-RTK). (10)
- Comunicación con sistema externo de levantamiento (DTPS).
- Corrección de ladeo o inclinación lateral (inclinómetro).
- Interruptor de modo de vertido (Dump switch).
- Registro y repetición.
- Limitación de movimiento de rotación (movimiento automático)
- Limitación de alcance (movimiento automático).
- Limitación para protección del pontón.
- Profundidad de excavación.



Figura 2.6: Disposición de los elementos del XPM

2.2.1 Descripción de elementos básicos.

i. Unidad Procesadora (CPU)

La unidad procesadora consiste en un computador con sistema operativo Windows XP al cual se le conectan los distintos accesorios y sensores (Imagen 2.1). Para ello cuenta con conexiones seriales RS232 y RS422 para recibir la información de los GPS, entradas USB, dos conexiones no estándares de 37 pines (X4 y X5) que permiten la recepción de información de todos los sensores y conexiones VGA para las pantallas. Dispone también de entradas para verificar los voltajes de alimentación del computador, tres fusibles estándares de 1A (1F1, 1F2, 1F3) y una conexión de salida de 24V en el caso que se instalen otros monitores. En la Imagen 2.2 se presentan todas las conexiones de entrada y salida presentes en la parte trasera de la CPU.

La carcasa del computador es metálica y está diseñado para resistir las vibraciones y trabajos de impacto. Tiene incorporado varios sistemas de alarma y de bloqueo en caso de que las condiciones afecten su integridad (temperaturas altas o bajas, sobre voltajes, etc...). Debido a que el espacio en la cabina del operador es reducido las dimensiones de la CPU son de 400x450x300mm (alto x ancho x largo) y puede ser utilizado en posición horizontal o vertical. Cabe mencionar que el computador funciona a 230V y tiene una conexión de salida que alimenta con la misma corriente a los monitores de pantalla plana.



Imagen 2.1: Computadora (CPU)

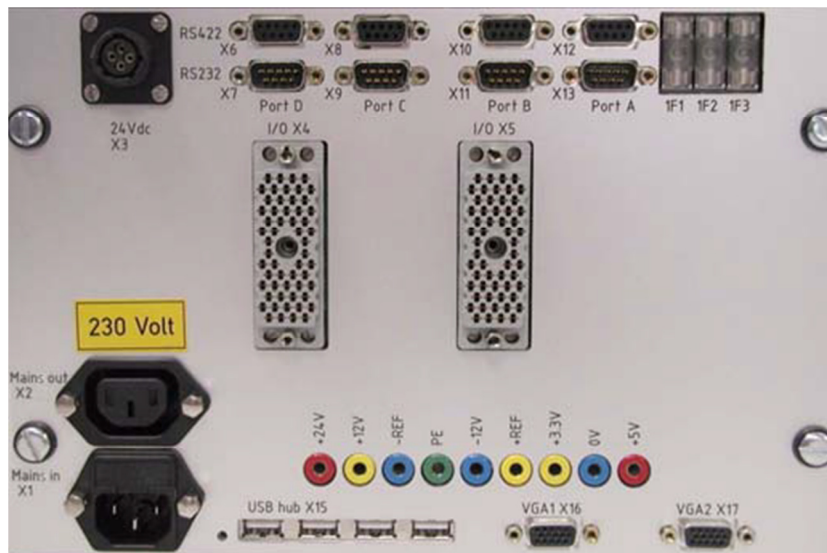


Imagen 2.2: Conexiones de entrada de la computadora

ii. Monitores

El sistema cuenta con dos monitores pantalla plana que funcionan a 230V y se conectan a la CPU a través de conexión VGA (estándar). El programa puede funcionar con un solo monitor, sin embargo para un uso más efectivo se aconseja utilizar los dos ya que permite una visión más detallada. En la Figura 2.3 se presentan los monitores instalados dentro de la excavadora, a los pies del operador.



Imagen 2.3: Monitores pantalla plana

iii. Teclados y ratón (mouse).

El sistema tiene tres accesorios para poder circular por las opciones del programa, un mouse y dos teclados. El mouse tiene una esfera en el centro que, al girarla, permite el movimiento del cursor en pantalla, de esta manera puede funcionar encontrándose fijo en una posición y no requiere de una superficie plana (Imagen 2.4). El teclado de 32 botones es un teclado estándar con conexión USB que permite escribir letras y números en forma rápida (Imagen 2.5). El teclado numérico cuenta con la capacidad de escribir letras y de realizar las mismas operaciones que un teclado estándar, sin embargo se encuentra fijo y frente al operador (Imagen 2.6). Tanto el mouse como los teclados van conectados a un adaptador USB (Imagen 2.7) para evitar tener que conectarlos directamente en la parte trasera de la CPU.



Imagen 2.4: Mouse



Imagen 2.5: Teclado de 32 botones



Imagen 2.6: Teclado numérico



Imagen 2.7: Adaptador USB

iv. Transductores de ángulo.

Los transductores de ángulo son sensores que cuantifican el giro de dos elementos. Para el funcionamiento interno del sistema se necesitan instalar los sensores en cada articulación del brazo de la excavadora. El sistema tiene en total 3 transductores de ángulo, los cuales se encuentran instalados en el brazo de la excavadora, uno en la conexión de la pluma con la cabina⁸ (Imagen 2.8), otro en la articulación entre la pluma y el stick (Imagen 2.9) y el tercero en la articulación del balde con el stick (Imagen 2.10). Estos sensores están fabricados de acero inoxidable y pueden ser intercambiados unos con otros pues son idénticos.

Los sensores transmiten la información a través de cables diseñados específicamente para el trabajo bajo agua, por lo tanto están impermeabilizados y protegidos para resistir golpes. Debido que la señal emitida por los encoders⁹ es muy sensible, los cables se encuentran protegidos ante cualquier interferencia o ruido externo que pueda causar una alteración en la señal.

El giro se transmite a través de varillas de acero inoxidable que están conectadas al sensor y también al brazo. Las varillas se encuentran libres en sentido axial debido a que si el sensor no se encuentra justo en el centro de la articulación la varilla solamente se desplaza y no se deforma. Para el caso del sensor del balde fue necesario fabricar un paralelogramo¹⁰ rotulado, de esta manera se determina en forma indirecta el ángulo que forma el balde con el stick. Esto se hace por medida de protección para que el sensor se encuentre menos expuesto al impacto. Cabe destacar que las longitudes de las varillas del paralelogramo pueden ser ajustadas.



Imagen 2.8: Transductor de ángulo de la pluma



Imagen 2.9: Transductor de ángulo del stick



Imagen 2.10: Transductor de ángulo del balde

v. Transductor de rotación.

Los transductores de rotación detectan y cuantifican la rotación que tiene la cabina con respecto a las orugas. Este transductor es diferente a los de ángulo y no son intercambiables. La forma en que transmite el giro no es con varillas, sino que es mediante engranajes (funcionamiento similar al de una bicicleta). El engranaje dentado es solidario al cuerpo central¹¹ (Carbody) mientras que el sensor está fijo con la estructura de la cabina, de manera que cuando la cabina gira en torno al cuerpo central, la rotación se transmite a través de una cadena al sensor de rotación. Se instalaron dos tensores para impedir que la cadena se salga de su posición debido a la vibración y los

movimientos. La Imagen 2.11 muestra el sensor de rotación y también la cadena con el tensor.



Imagen 2.11: Transductor de rotación

vi. Sensor de inclinación frontal y lateral.

Los sensores de inclinación se utilizan para determinar la inclinación que tiene la excavadora con respecto del plano horizontal. Los inclinómetros se encuentran instalados en la parte trasera de la cabina, uno en la dirección longitudinal para poder registrar la inclinación frontal de la excavadora y el otro en dirección transversal para determinar el ladeo.



Imagen 2.12: Sensor de inclinación frontal y lateral

vii. Caja de distribución I/O (Input/Output).

La caja de distribución es fundamental pues recibe todas las señales de los sensores y las comunica al computador a través de dos conectores de salida. La caja de distribución fue instalada en el techo de la cabina y está diseñada para soportar condiciones ambientales adversas. En las Imágenes 2.13 y 2.14 se presentan fotos del exterior e interior de la caja de distribución.



Imagen 2.13: Caja de distribución I/O

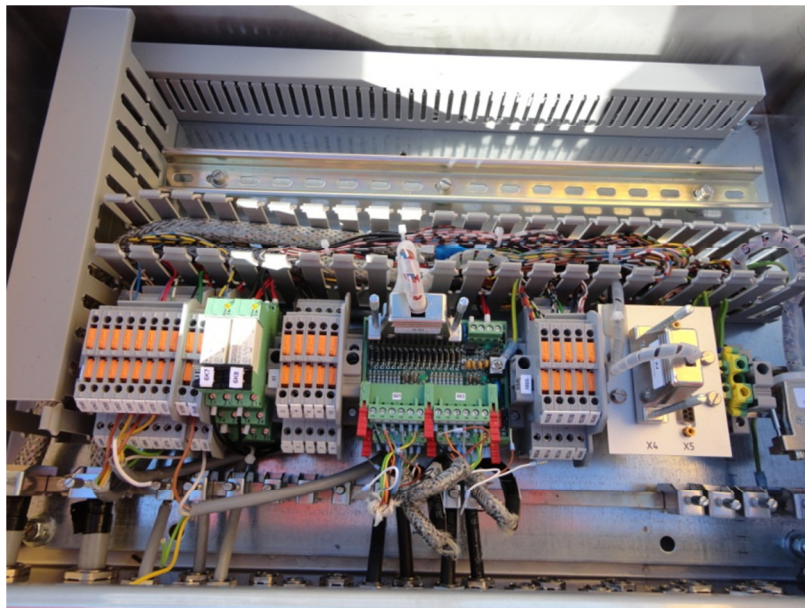


Imagen 2.14: Interior de la caja de distribución

viii. Caja de poder

La caja de poder permite el flujo de energía eléctrica a todo el sistema, tiene una perilla que indica si está encendido o apagado. Se encuentra instalado interior de la cabina.



Imagen 2.15: Caja de poder

ix. Inversor

El inversor permite transformar la energía eléctrica de la batería de la excavadora de una corriente continua de 24V a una corriente alterna de 230V, permitiendo el funcionamiento de la CPU, de los monitores y del receptor GPS. En algunos casos el inversor se encuentra fuera de la excavadora debido a que utiliza mucho espacio. Es posible encenderlo en forma remota, colocando el switch en la opción "Remote".



Imagen 2.16: Inversor

2.2.2 Descripción de elementos adicionales

i. Posición de marea automática

El sensor de marea automática se encuentra en tierra, midiendo directamente la altura de la marea desde la orilla del mar. La información es enviada a la excavadora en forma radial.

ii. Calado del pontón

A través de un sensor de presión se puede estimar en tiempo real el calado que tiene el pontón. Idealmente debe colocarse en la parte inferior y justo bajo del eje de rotación de la excavadora. En base a la presión ejercida por el agua ($\gamma \cdot h$) el programa calcula internamente la profundidad del sensor. Si este se encuentra en la parte inferior del pontón corresponderá al calado (h).

iii. Posición y rumbo

El sistema XPM emplea un sistema GPS diferencial en tiempo real ó DGPS-RTK (Differential Global Positioning System, Real Time Kinematic), el cual es capaz de entregar la posición geográfica de la excavadora con una precisión de 1cm en el plano horizontal y 2cm en la altura. El sistema GPS también puede identificar el rumbo de la excavadora (Azimut) y requiere de una

estación base fija en tierra para transmitir radialmente las correcciones de la posición y obtener las precisiones mencionadas anteriormente.

El sistema utiliza dos antenas receptoras (Imagen 2.17), una que determina la posición y la otra el rumbo (brújula), ambas entregan su información por cables protegidos contra la interferencia al receptor GPS instalado dentro de la cabina (Imagen 2.18). Las antenas receptoras se encuentran montadas en una estructura en la parte trasera de la excavadora. En la Imagen 2.19 las antenas receptoras están ubicadas en los extremos y la del centro corresponde a la antena de radio que recibe la información de la estación base. En la Imagen 2.20 se muestra la estación base situada en tierra.



Imagen 2.17: Antena receptora (GPS)



Imagen 2.18: Receptor GPS



Imagen 2.19: Antenas montadas en estructura trasera



Imagen 2.20: Estación base

iv. DTPS (Dredge Track Presentation System)

El DTPS es un dispositivo que permite hacer una inspección del fondo marino (batimetría) y actualiza el modelo del terreno con información real.

v. Interruptor de modo de vertido (Dump Switch)

El interruptor de modo vertido permite marcar la zona y el número de veces en el que se vierte un tipo de material.



Imagen 2.21: Botón de vertido

vi. Movimiento automático de perfil y profundidad

La excavadora puede ser equipada con un sistema que permite movimientos automatizados. En primera instancia la pluma se maneja automáticamente y el operador sólo se encarga de mover el balde y el stick. Puede incorporarse también la automatización del balde para mantener un ángulo constante del con respecto al perfil para excavar un talud o mantener una profundidad constante.

vii. Limitación y seguridad

Es posible limitar los movimientos de la excavadora por motivos de seguridad, el sistema dará una alarma acústica y también bloqueará mecánicamente los movimientos de la excavadora cuando los límites sean excedidos. También existe la posibilidad de implementar la limitación de los movimientos para la protección del pontón y así evitar que la excavadora lo golpee.

2.3 Funcionamiento del Sistema

2.3.1 Funcionamiento General

El sistema XPM funciona en base a las dimensiones de la excavadora, los sensores, el GPS y a los programas computacionales que procesan toda la información. Efectuar las mediciones en forma precisa de cada elemento de la excavadora es fundamental para el funcionamiento general del sistema y

con esta información los programas computacionales logran modelar correctamente todos los movimientos. Cualquier error en las dimensiones afecta directamente el modelamiento y en consecuencia a la precisión final.

Todo el sistema XPM funciona en base a electricidad, la cual es obtenida de la batería de la excavadora, por esa misma razón el motor debe estar siempre encendido cada vez que se use el sistema o la batería se descargará en pocos minutos. Dentro de la cabina se encuentra una caja de poder con un interruptor de corriente, la cual permite el paso de energía eléctrica proveniente de la batería de la excavadora a todo el sistema XPM. Como el computador, los monitores y el GPS trabajan con 230V es necesario tener también un inversor que transforme la corriente continua de 24V de la batería a una corriente alterna de 230V (60Hz). El inversor alimenta directamente al GPS y al computador, sin embargo los monitores se alimentan a través de una conexión de salida de 230V ubicada en la parte trasera del computador (Imagen 2.22(A)).

Los sensores también funcionan eléctricamente y se encuentran conectados a una caja de distribución I/O a través de cables protegidos al ambiente y a la interferencia. La caja de distribución recibe toda la información de los sensores y la envía al computador a través de dos conectores, X4 y X5. Cabe señalar que la alimentación eléctrica de cada sensor proviene del computador través de dichos conectores. En la Imagen 2.23(A) se observan siete cables de entrada conectados a la caja de distribución (Input), estos corresponden a los cuatro sensores de giro, los dos inclinómetros y al botón de vertido. Los cables de salida (Output) de la caja de distribución I/O se presentan en la Imagen 2.23(B), los cuales se conectan al computador a través de los conectores X4 y X5 mostrados en la Imagen 2.22(B).

El computador cuenta también con dos conexiones VGA para los monitores, conexiones seriales que recibe la información del GPS y varias entradas USB para conectar diversos dispositivos como el mouse, el teclado o tarjetas de memoria. En la Imagen 2.24 se puede observar un esquema general del funcionamiento eléctrico.

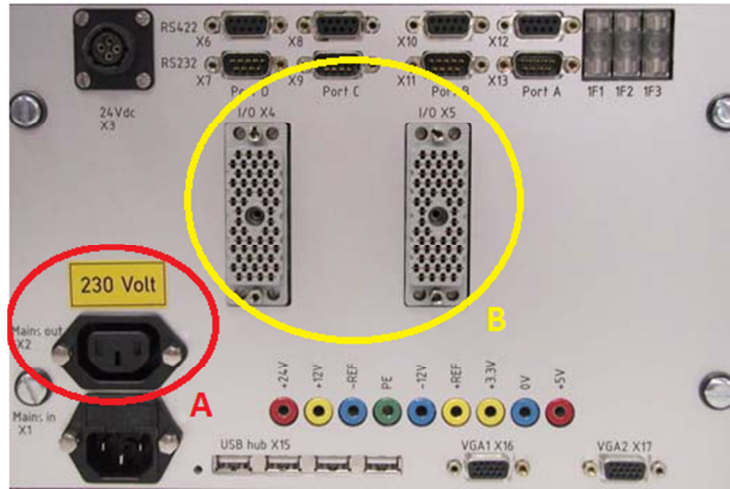


Imagen 2.22: Conexiones al computador

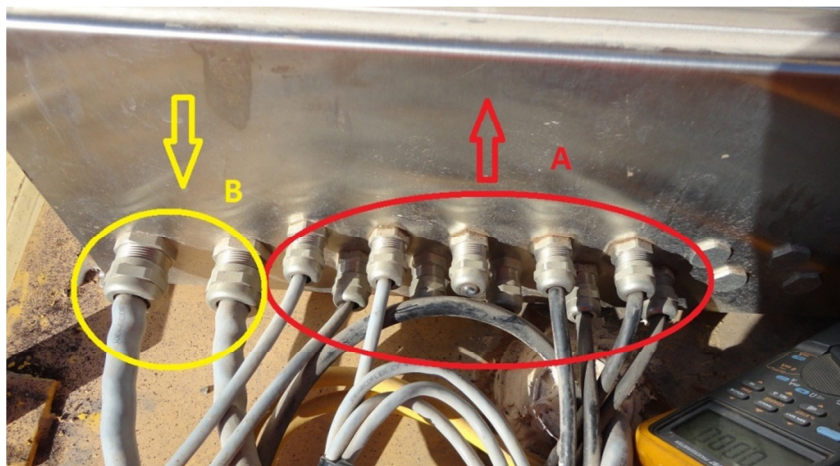


Imagen 2.23: Conexiones a la caja de distribución I/O

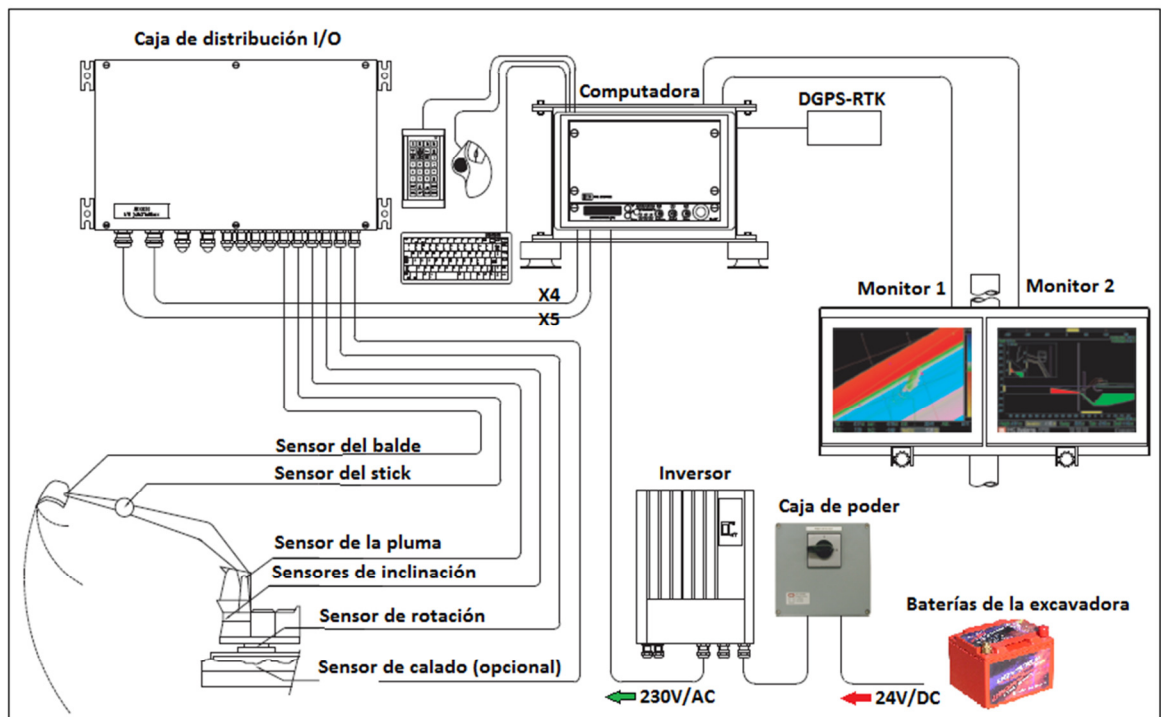


Imagen 2.24: Esquema del funcionamiento eléctrico

Los sensores instalados en la excavadora tienen por objetivo detectar los movimientos para poder modelarlos en el computador. De modo que el sistema mecánico de la excavadora no está ligado al sistema XPM y puede funcionar normalmente si este se encuentra apagado. Lo que hace básicamente el sistema XPM es captar movimientos de la excavadora y luego reproducirlos en la pantalla. Para ello cuenta con cuatro sensores que detectan el giro de las articulaciones del brazo y la rotación con respecto a las orugas. Además cuenta con dos sensores que detectan la inclinación con respecto al plano horizontal en el sentido frontal y en el lateral.

Combinando la información de las dimensiones y la obtenida por los sensores, es posible realizar internamente todos los cálculos necesarios para replicar los movimientos de la excavadora en tiempo real. El DGPS-RTK tiene por objetivo posicionar geográficamente la excavadora y gracias a esto es posible ver en pantalla el desplazamiento que tiene la excavadora pues no existe ningún otro instrumento o sensor que pueda detectar el traslado de esta. Además el GPS le otorga la dirección a la cual están orientadas las orugas (Azimut) y la cota en la que se encuentra.

La computadora es la responsable de modelar la excavadora y su entorno. Por lo tanto debe procesar la información previamente ingresada (dimensiones, terreno, etc....) y trabajar con la información que recibe externamente de los sensores y del GPS. Para ello el sistema XPM emplea 3 programas diferentes: Design (Diseño), Configurator (Configurador) y el Digisys Digiviewer (Visualizador).

El programa Design es un programa de dibujo y diseño que se encarga de elaborar todos los modelos digitales del terreno (DTM) para que puedan ser visualizados en el computador. Lo ideal es utilizarlo en un computador de oficina y posteriormente importar la información en la computadora de la excavadora.

El Configurator tiene como objetivo configurar todos los elementos del sistema y es la base de la programación para hacer funcionar el sistema. En él se deben ingresar las dimensiones de la excavadora, configurar los sensores, mensajes de error, colores, herramientas, etc. Gracias a su flexibilidad es posible crear distintos tipos de configuraciones que se encuentran predefinidos por IHC Systems, dando libertad al usuario de programar lo que requiera. Si bien el acceso al código de programación interna no es posible, el usuario es libre de manipular las configuraciones predefinidas utilizando el Configurator.

El programa Digisys Digiviewer es un visualizador que procesa la información ingresada en los dos programas mencionados anteriormente y visualiza la excavadora y los DTM. Este programa es fundamental para el operador pues le permite observar la excavadora a través de las pantallas y también visualizar los parámetros que le resulten de interés como por ejemplo las coordenadas y cota de la punta del balde, altura de la marea, posición geográfica, rumbo, etc.

2.3.2 Design

El programa Design es un software CAD (Computer Aided Design) que permite diseñar la modelación digital del terreno del proyecto para que pueda ser visualizado por el programa Digisys Digiviewer. En él se deben diseñar el perfil teórico y el de dragado (terreno del fondo marino). Es un software de fácil aprendizaje pues tiene pocas opciones, pero también es limitado en algunos aspectos. El programa trabaja en base a la creación de

un eje o línea base el cual está conformado por perfiles y tiene la posibilidad de agregar otros elementos como batimetrías externas, obstáculos, límites de zonas de trabajo, matriz de vertido, diseños de Autocad, etc....

La línea base se encuentra definida a través de puntos, los cuales tienen asociados una sección transversal y son numerados según el orden de creación. Cada punto debe definirse en coordenadas UTM (Norte y Este) y deben estar relacionados uno con otro para poder conectar los perfiles y tener un eje continuo. Cabe mencionar que los puntos no tienen asociado una cota pues esta se obtiene al definir el perfil y que sólo es posible diseñar una línea base. En la Imagen 2.25 se presenta el trazado de un eje definido por cuatro puntos numerados del 1 al 4. La grilla conformada por líneas rojas representan las coordenadas geográficas UTM del área de trabajo (el eje de las ordenadas corresponden a las coordenadas Norte y las abscisas al Este). Los números asociados a cada punto indican el sentido de avance de la línea base, el número "1" es el comienzo y el número "4" es el término. También es posible importar a modo de visualización los archivos .dxf de Autocad para obtener una mejor visión del diseño. Sin embargo el diseño importado se copia como imagen y no podrá ser editado en el Design y tampoco es visible por el Digisys Digiviewer. En la Imagen 2.26 se muestra la ventana en la cual se pueden crear los perfiles y establecer sus conexiones.

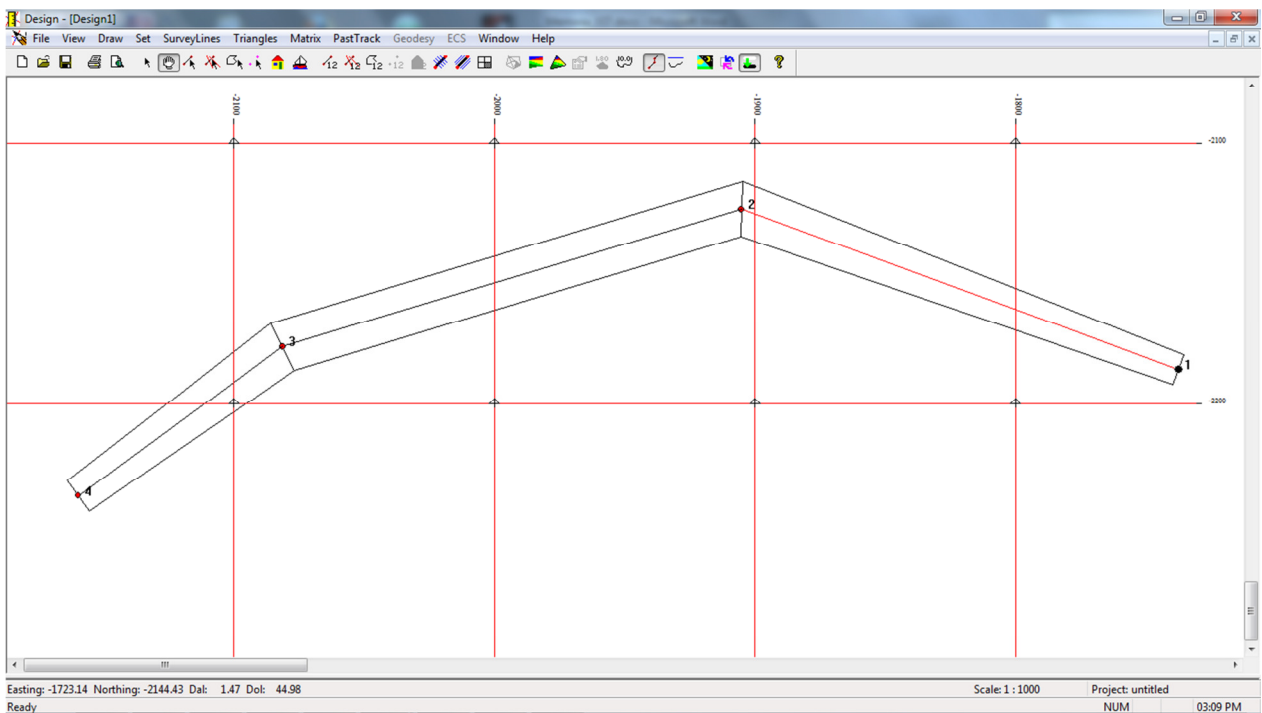


Imagen 2.25: Diseño del eje

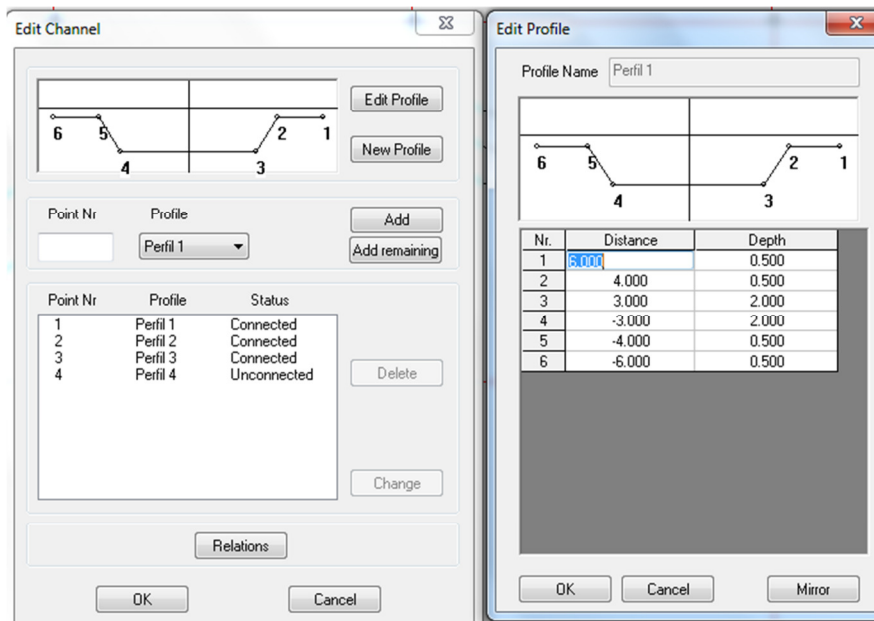


Imagen 2.26: Creación de perfiles en el Design

Para poder generar un DTM a partir del diseño en el Design, se requiere triangular previamente todos los puntos de los perfiles. Esto es posible hacerlo en el programa Design, o bien utilizando otros tipos de archivos como una matriz con formato XYZ o triangulaciones hechas por otros programas compatibles como Autocad Civil. Cabe mencionar que el Design puede realizar el proceso inverso, extrayendo de un DTM la triangulación o la matriz XYZ.

Después de tener el diseño ya triangulado es posible generar el DTM y definir el tamaño de la matriz. Esto último es fundamental, pues afecta directamente el tiempo que demora el computador de la excavadora en procesar la información. En la Imagen 2.27 se presenta la ventana en donde se puede editar la extensión (área) del DTM y también el tamaño (o número) de celdas que se requieran. Se debe escoger un tamaño de matriz adecuado teniendo en cuenta la superficie que se requiera modelar y también la precisión deseada.

En la Imagen 2.29 se aprecia el DTM generado del diseño para obtener posteriormente la triangulación (o la matriz XYZ) y exportarla al computador de la excavadora. Esto último se hace en la ventana "Matrix" y luego en "Export RAW files" (triangulación) o "Export xyz file" (Matriz XYZ). Si bien la generación del DTM también es posible realizarlo en el computador del sistema XPM, esto significaría tener detenida la operación de la maquinaria.

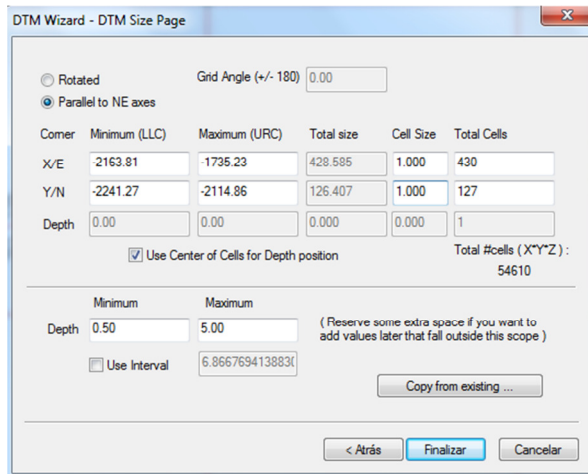


Imagen 2.27: Creación del DTM

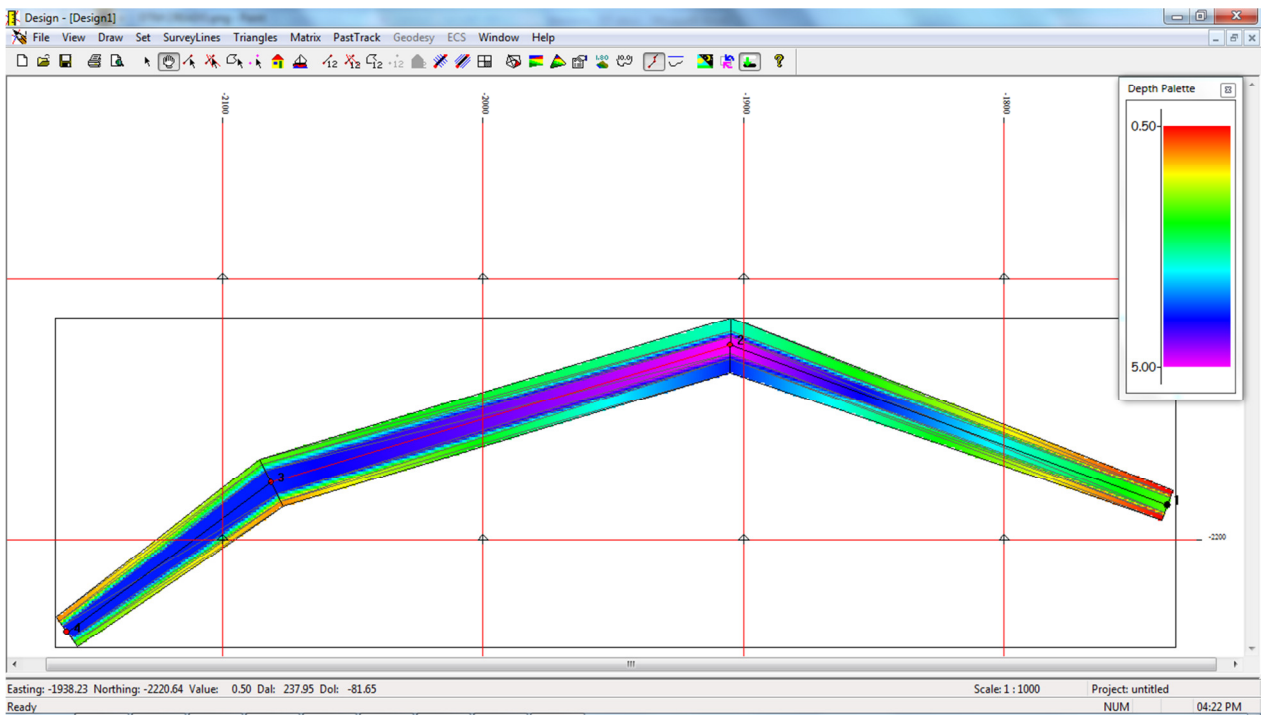


Imagen 2.28: Visualización del DTM

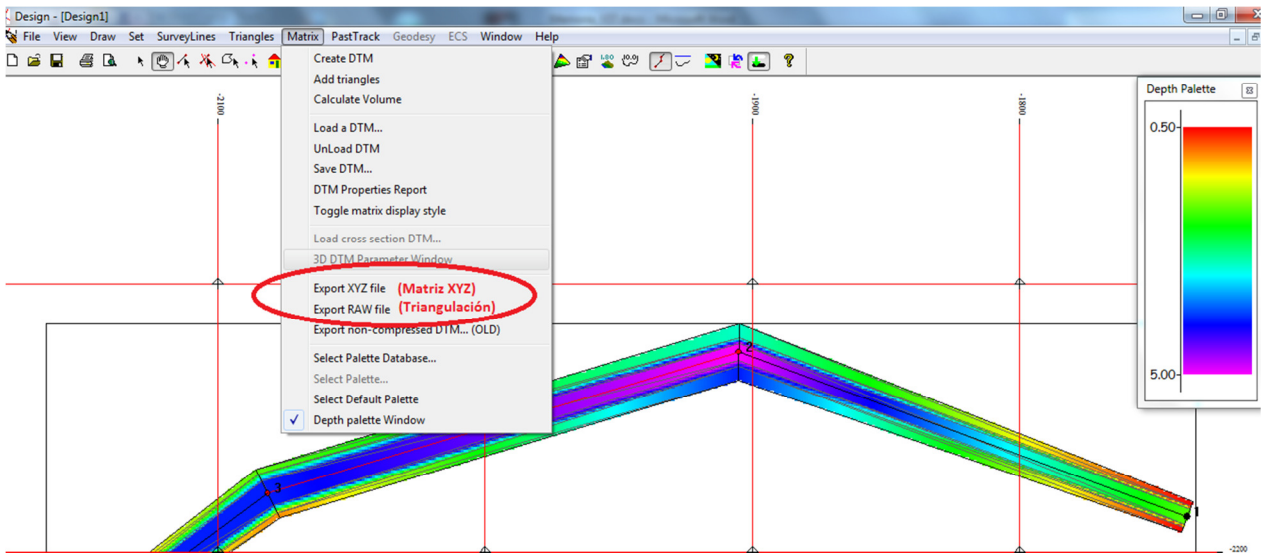


Imagen 2.29: Exportación del DTM

2.3.3 Configurator

El Configurator es un programa que configura todos los elementos del sistema XPM, desde las dimensiones de la excavadora hasta los colores y tamaños de cada texto presentados en el visualizador. El Configurator utiliza tres tipos de configuraciones distintas que trabajan en forma paralela, el Display Configurator, Project Configurator y Tool Configurator.

El Display Configurator se encarga de configurar todos los elementos numéricos que se presentan en el visualizador, seleccionando qué valores numéricos mostrar, el tipo y tamaño de sus letras. El Project Configurator se encarga de modificar todo lo relacionado con los DTM. Modifica la escala de colores del perfil diferencial, sus valores asociados y también puede editar los perfiles y la línea base (eje). El Tool Configurator es la configuración más importante pues afecta directamente en el modelamiento de la excavadora, mientras que el Display y el Project Configurator están relacionados principalmente con el aspecto visual. En el Tool Configurator se pueden definir todas las dimensiones de la excavadora y de las herramientas que se utilizarán. En esta configuración también se define la posición de la antena GPS y se pueden editar varios datos relacionados con la geodesia y la proyección cartográfica. Cabe mencionar que el funcionamiento del Display y Project Configurator es idéntico al del Tool Configurator y no se entrará en detalles.

Las posibles configuraciones están estructuradas en base a un árbol de elementos, los cuales se encuentran predefinidos y conectados en forma secuencial por orden de precedencia. El programa establece automáticamente la conexión al relacionar dos elementos, sin embargo es necesario especificar si estos se encuentran conectados al comienzo (Fixed) o al término del elemento precedente (Free). Dependiendo del tipo de elemento escogido en la configuración, es posible continuar con varios otros tipos de sub-elementos llamados "Possible Children" que se encuentran pre-configurados por IHC Systems.

A modo de ayuda para el usuario, la información de cada elemento seleccionado se presenta en una sub-ventana destinada exclusivamente a eso y cuenta también con un repositorio de configuraciones ya definidas pues son las que comúnmente se utilizan. En la Figura 2.30 se muestra la interface del Configurator y también la ubicación de cada sub-ventana.

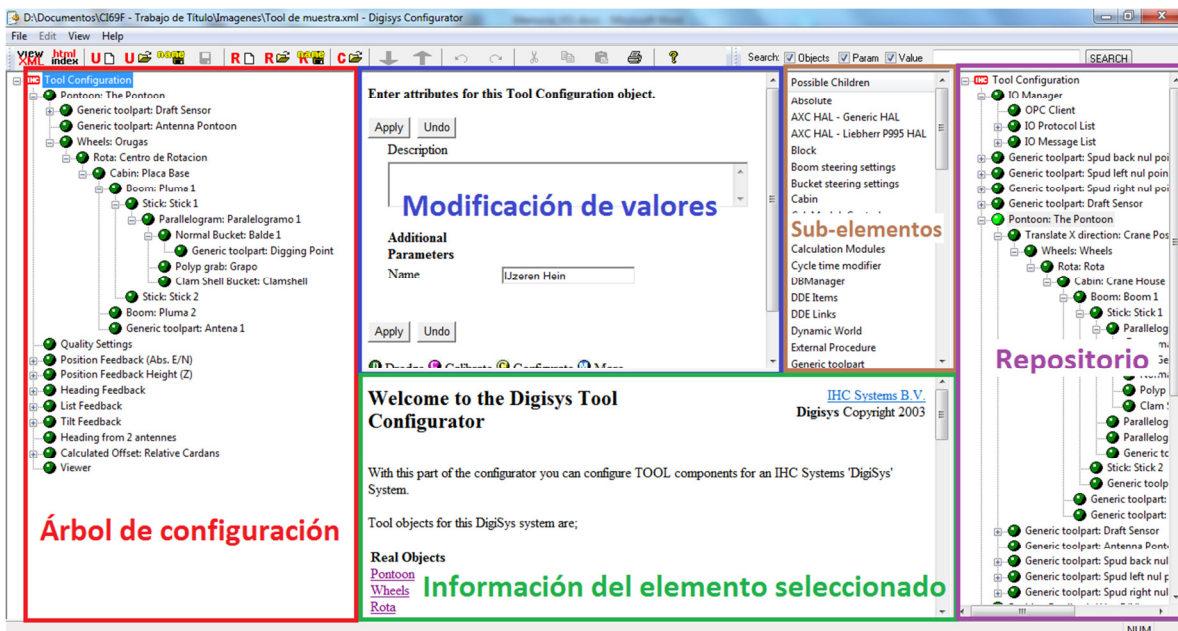


Imagen 2.30: Disposición de elementos del Configurator

En la Imagen 2.31 se presenta a modo de ejemplo una configuración sencilla de los elementos de una excavadora montada sobre un pontón. El primer elemento de la configuración es el pontón, siguen las orugas, y posteriormente la cabina (placa base), después se conecta la pluma y el stick hasta el último elemento que es el balde. Cabe destacar que el balde es predecesor de un elemento llamado "Digging point", el cual representa la punta del diente central del balde y permite obtener las coordenadas

geográficas y la cota a la cual se encuentra. Debido a que también es posible configurar e intercambiar otras herramientas de trabajo, se encuentran configurados un clamshell y un grapo.

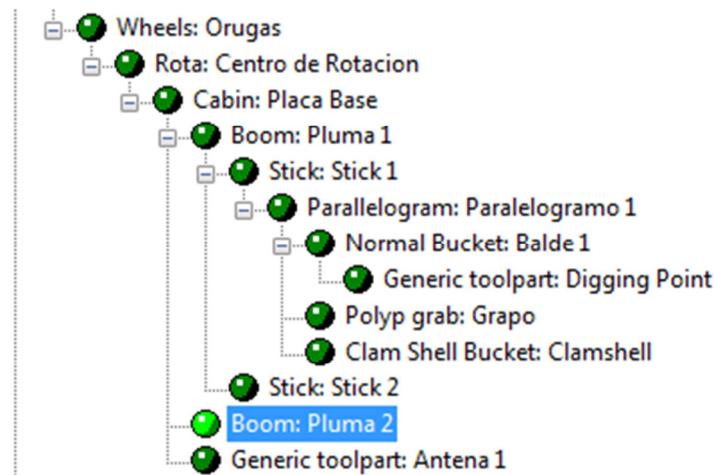


Imagen 2.31: Ejemplo de configuración

2.3.4 Digisys Digiviewer

El Digisys Digiviewer es un programa que permite visualizar a la excavadora y también el terreno en el cual está realizando todas las operaciones que hace bajo el agua. Presenta la visión en planta y lateral de la excavadora, el fondo marino, la marea y también el perfil de diseño, permitiendo ver las zonas en las cuales ya se ha trabajado y también el detalle de la forma de la excavación que se requiera. En este programa el operador puede observar en pantalla todos los atributos que tengan relevancia, por ejemplo las coordenadas geográficas de la posición de la excavadora o de la punta del balde, la rotación, la profundidad, etc. El operador también pueden intercambiar partes del brazo o las herramientas que utiliza la excavadora dependiendo del trabajo que se requiera hacer. En el caso de la construcción del rompeolas es necesario intercambiar varias veces el balde con el grapo dependiendo de si se requiere armar el talud o si se necesita colocar coraza. Cabe señalar que es en el Digisys Digiviewer en donde se pueden calibrar los sensores y manipular todos los respaldos de configuración y del proyecto.

Para que el visualizador dibuje todos los elementos es necesario combinar las dimensiones de cada elemento de la excavadora, el diseño del terreno y conocer también todos los datos de los sensores y del GPS en tiempo real. De modo que el Digisys Digiviewer utiliza la información del Configurator, pues en él se encuentran definidas todas las dimensiones y también del Design, el cual genera todos los perfiles y el proyecto mismo. Considerando

además la información que entregan los sensores y el DGPS-RTK, el programa puede calcular internamente las posiciones de todos los elementos en base al centro de rotación (CRP) mediante funciones trigonométricas (combinando los largos y los ángulos que conforman cada parte del brazo). Combinando la posición geográfica del centro de rotación y el rumbo de la excavadora (Azimut) es posible, mediante un transporte de coordenadas, determinar la posición de cada articulación del brazo hasta llegar a la punta del balde. Como la inclinación del terreno también influye en la posición de la excavadora, existen dos sensores que determinan en cuantificar la inclinación y corregir ese efecto.

El GPS determina la posición geográfica de la antena que se encuentra en la parte trasera de la excavadora, de modo que es fundamental medir correctamente las distancias y alturas que se indican en el manual para poder transportar correctamente las coordenadas desde la ubicación de la antena hasta el centro de rotación.

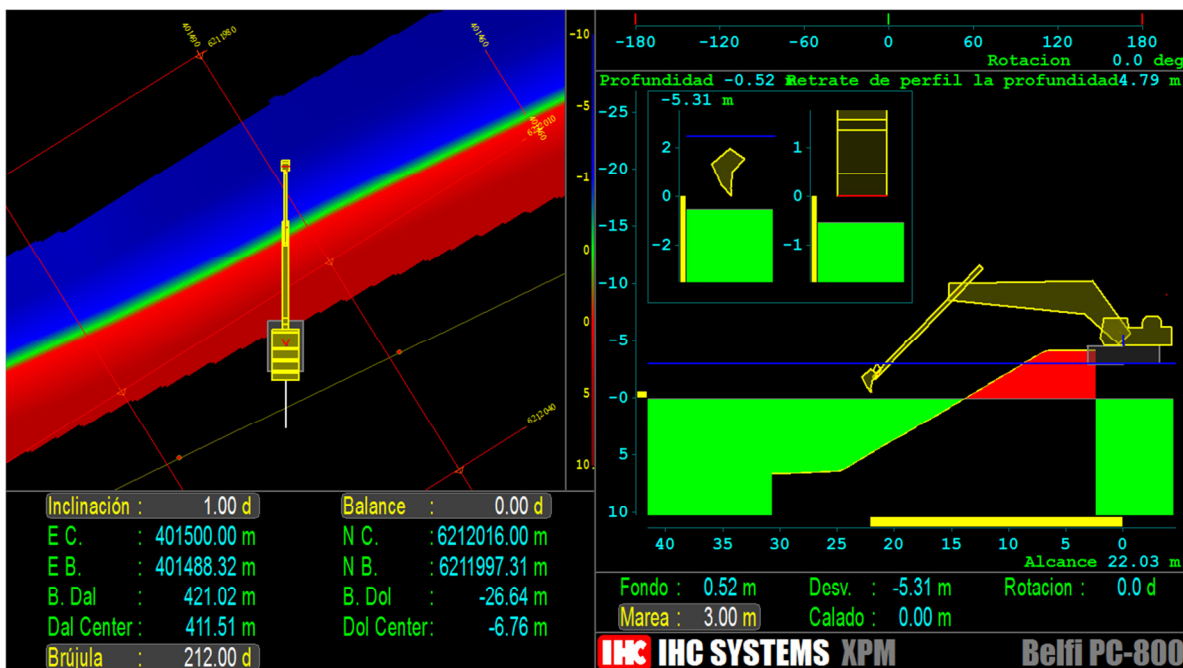


Figura 2.7: Digisys Digiviewer

En la Figura 2.7 se presenta el programa Digisys Digiviewer, el cual muestra la vista en planta y perfil de la excavadora trabajando desde el talud teórico del rompeolas y con un fondo marino constante en la cota 0. En la vista lateral, el eje de las ordenadas representa la elevación en metros y el eje de las abscisas las distancias horizontales cuyo origen es el CRP (centro de rotación). En la figura también se observan distintos parámetros e indicadores que fueron escogidos en el Configurator para que aparezcan en

la pantalla del operador. Hay una gran cantidad de parámetros dispuestos para configurar, pero se escogieron aquellos que son de mayor interés en el proyecto. Una breve explicación de cada atributo se presenta a continuación:

- i. Inclinación/Balance: Ángulo de inclinación frontal/lateral con respecto al plano horizontal.
- ii. E C. / N C.: Coordenada Este/Norte del centro de rotación en el sistema UTM.
- iii. E B. / N B.: Coordenada Este/Norte de la punta del balde en el sistema UTM.
- iv. B. Dal: Distancia del balde a lo largo del eje.
- v. B. Dol: Distancia del balde fuera del eje.
- vi. Dal Center / Dol Center: Distancia del centro de rotación a lo largo/fuera del eje.
- vii. Brújula: Ángulo que de la dirección de las orugas con respecto al norte (Azimut), también se le llama rumbo.
- viii. Fondo: Cota a la cual se encuentra la punta del balde.
- ix. Desv: Diferencia de cotas entre la punta del balde y el perfil de dragado (fondo marino).
- x. Rotación: Ángulo que forma la cabina con respecto de las orugas.
- xi. Marea: Altura de la marea.
- xii. Calado: Diferencia de cotas entre la marea y la parte inferior del pontón.

El Digisys Digiviewer tiene la capacidad visualizar los modelos del terreno, DTM (Digital Terrain Model). Sin embargo, es necesario procesar previamente los archivos de mallas trianguladas (o matrices XYZ) generados por el programa Design. Se necesitan en total dos mallas trianguladas, una para obtener el modelo del terreno asociado al perfil teórico y la otra para el de dragado. El perfil diferencial se crea en forma automática a partir de la diferencia de ambas.

Como se mencionó en la sección 2.1, la representación del terreno es diferente para las vistas en planta y lateral. En la vista en planta se muestra el perfil diferencial, el cual es un terreno dibujado en una escala de colores que representa la diferencia de cotas entre el perfil de dragado y el teórico. Cada vez que el balde excava el fondo marino, la diferencia entre la cota del terreno y la del perfil teórico cambia y se modifica el color. De esta manera es posible visualizar la extensión de la excavación, las zonas ya excavadas y cuantificar lo que aún queda por hacer. La limitación de esta vista es que no es posible apreciar qué forma tiene la excavación y por lo tanto se debe complementar con la vista lateral.

La vista lateral tiene por objetivo mostrar la sección transversal del terreno, de modo que es posible ver con mayor detalle la forma que tiene la excavación. El perfil teórico es representado por una línea amarilla y el perfil de dragado corresponde a la cota del terreno del fondo marino. Existe una sub-ventana en la cual se observa una vista ampliada de la herramienta de trabajo que permite ver con más claridad la zona de trabajo. El color verde representa el terreno que se encuentra por sobre el perfil teórico, mientras que el color rojo representa el terreno que fue sobre. Cuando el balde hace un barrido del terreno que está por sobre el perfil teórico, este desaparece y el programa asume que ha sido excavado. Si el balde excava por debajo de la cota de diseño, el terreno se marca de color rojo indicando una zona donde se requiere aporte de material para alcanzar la cota del perfil teórico. La vista lateral no permite conocer lo que sucede con la excavación fuera del plano de trabajo, ni tampoco identificar las zonas ya trabajadas, de modo que se complementa con la vista en planta.

Para entender mejor la relación entre ambas vistas, se presenta en las Figuras 2.8 y 2.9 una excavación de un terreno horizontal cuya cota inicial es cero. Se observa en la Figura 2.9 que el terreno se ha excavado siguiendo aproximadamente la forma del perfil teórico, reduciendo la diferencia de cotas entre el perfil de dragado y del teórico a un valor cercano a cero. El color de la matriz diferencial de la vista en planta será actualizada según el valor que tenga asociada a la escala de colores, el cual en este caso corresponde al color verde (Figura 2.8).

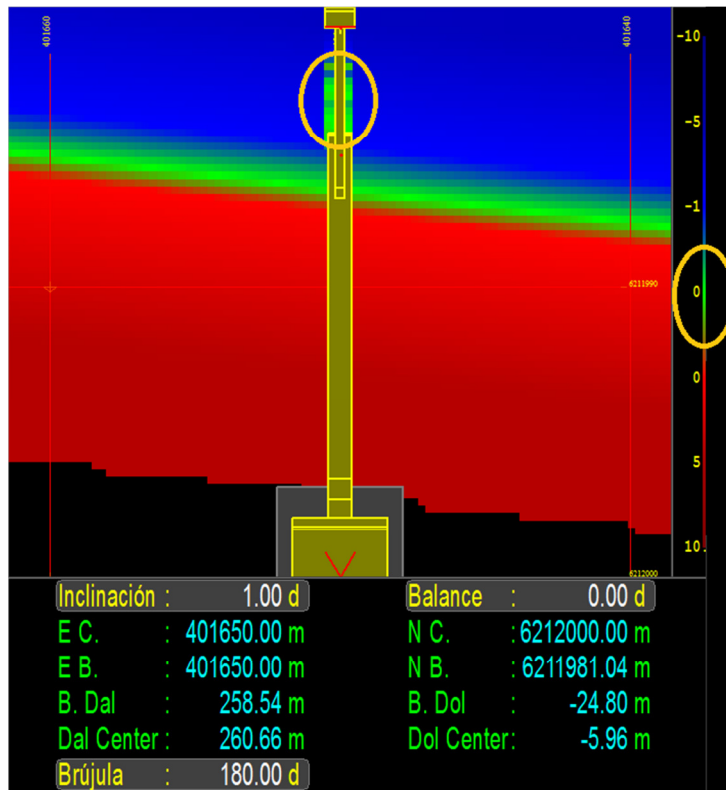


Figura 2.8: Ejemplo de vista superior



Figura 2.9: Ejemplo de vista lateral

3 Aplicación del sistema XPM en terreno

3.1 Procedimientos

A continuación se presentan distintos procedimientos que deben tenerse en cuenta para el funcionamiento y aplicación del sistema XPM. Estos procedimientos permiten explicar en forma general la instalación de los sensores, la calibración y también la aplicación del sistema XPM en la colocación de enrocado y enrazado de las bases de apoyo.

3.1.1.1 Sensores de ángulo

- i. Desatornillar y desmontar el encoder utilizando llaves Ale de 6mm.

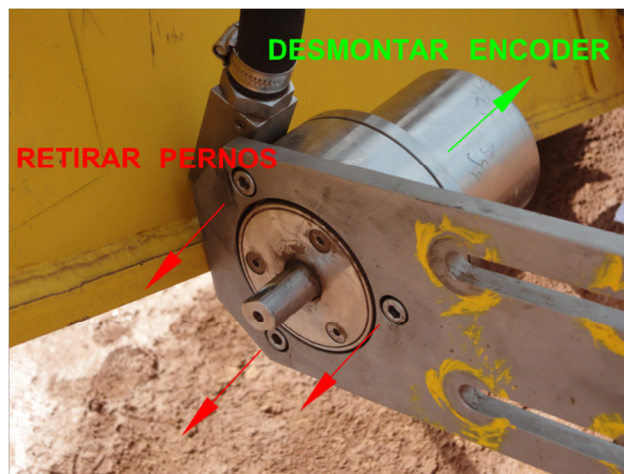


Imagen 3.1: Retiro de encoder

- ii. Colocar una guía en lugar del encoder (Imagen 3.2(A)).
- iii. Fijar los apoyos a la placa del sensor, apretando los cuatro pernos (Imagen 3.2(B)).
- iv. Posicionar la guía de manera que esté apuntando justo en el centro del pasador¹⁰ (Imagen 3.2(C)).
- v. Marcar la posición de los cuatro apoyos (Imagen 3.2(D)).
- vi. Soldar para acero inoxidable cada apoyo en los lugares previamente marcados (Imagen 3.2(D)). Deben encontrarse conectados en forma perpendicular al brazo de la excavadora. En caso de que los apoyos

sean de acero convencional, usar soldadura estándar 70/18. Se recomienda fijar previamente los apoyos a una placa base, pues es más sencillo soldar al brazo la placa completa que cada apoyo en forma individual.

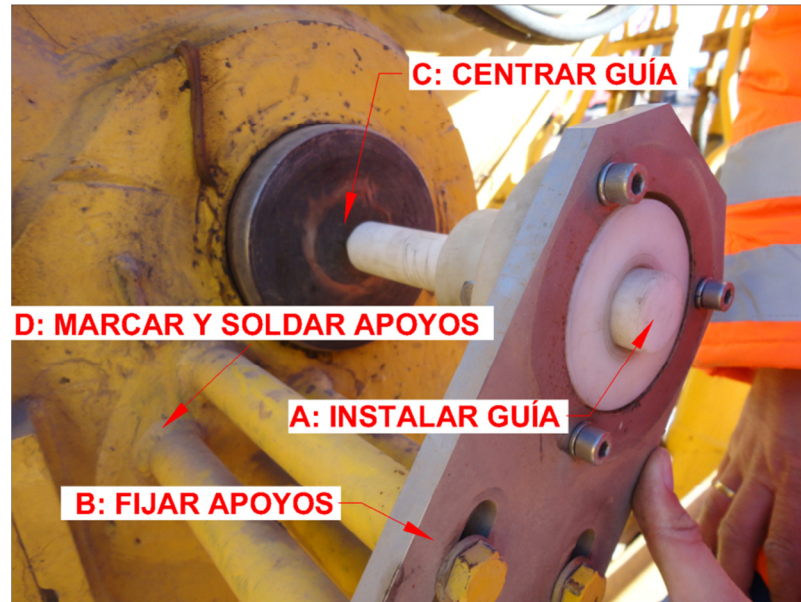


Imagen 3.2: Instalación de sensores

- vii. Corroborar que la guía se encuentre centrada en el pasador. En caso de que no lo esté, aflojar los pernos de los apoyos y desplazar la placa del encoder. En caso de que aún no se logre centrar será necesario reubicar apoyos.
- viii. Retirar la guía e instalar el encoder.
- ix. Soldar para acero inoxidable la base de los apoyos de las varillas al brazo de la excavadora en forma perpendicular.



Imagen 3.3: Apoyos de varillas

- x. Colocar un extremo de la varilla en su apoyo (Imagen 3.4) y el otro fijarlo al encoder (Imagen 3.5). El largo de la varilla puede cambiarse reajustando la tuerca que se encuentra en el encoder.



Imagen 3.4: Unión varilla y apoyo



Imagen 3.5: Unión de varilla con encoder

3.1.1.2 Sensores de inclinación

- i. Fijar los sensores de inclinación a una placa base de manera que la inclinación hacia el frente de la cabina sea negativa y la inclinación hacia la izquierda también lo sea. Ambos sensores deben encontrarse en forma perpendicular (Imagen 3.6(A)).
- ii. Fijar la placa base de los sensores de inclinación a la estructura de la excavadora. Los sensores deben estar orientados justo en las direcciones principales, es decir, en el eje longitudinal y transversal. Debe estar instalado en la cabina y no en las orugas (Imagen 3.6(B)).



Imagen 3.6: Instalación de sensores de inclinación

3.1.2 Procedimiento de calibración de los sensores

El proceso de calibración involucra combinar las operaciones mecánicas de la excavadora y la configuración del software. Existen diferentes métodos para la calibración de los sensores dependiendo de los recursos con que se cuenten. En el caso de la calibración para una excavadora en tierra se requiere de un instrumento capaz de detectar el desnivel entre dos puntos. En este caso se dispuso de una estación total para determinar las diferencias de cotas. Para el caso de una excavadora posicionada en un pontón también es posible utilizar el nivel del mar para poder calibrar todos los sensores. A continuación se presenta un procedimiento resumido de la calibración de sensores de ángulos y también los de inclinación y rotación. La calibración debe realizarse solamente una vez y en el mismo orden del presente procedimiento. Cabe destacar que existe otra calibración que es rutinaria (operación), cuyo procedimiento se encuentra detallado en el "Manual del Operador" adjuntado en el Anexo B.

3.1.2.1 Calibración del sensor de rotación.

- i. Presionar tecla "F1" para mostrar la ventana de opciones y cambiar en "Configuración" el nivel de acceso a "Más" cuya clave es "ABCD" (Imagen 3.7).

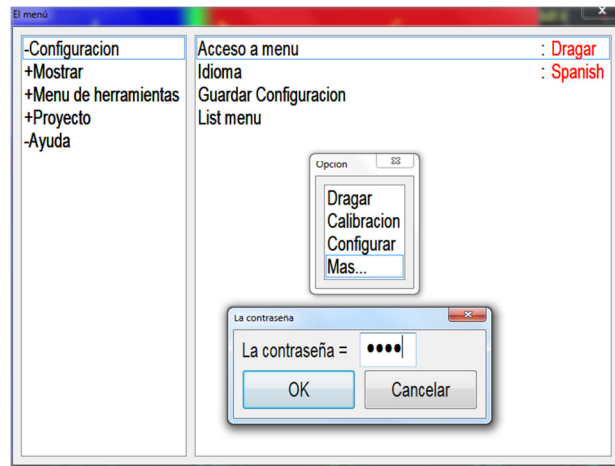


Imagen 3.7: Cambio de nivel de acceso

- ii. Entrar a la opción "Herramientas", "Estas son las herramientas" y abrir la ventana de "La rotación", luego seleccionar "Calibrar giro" (Imagen 3.8).

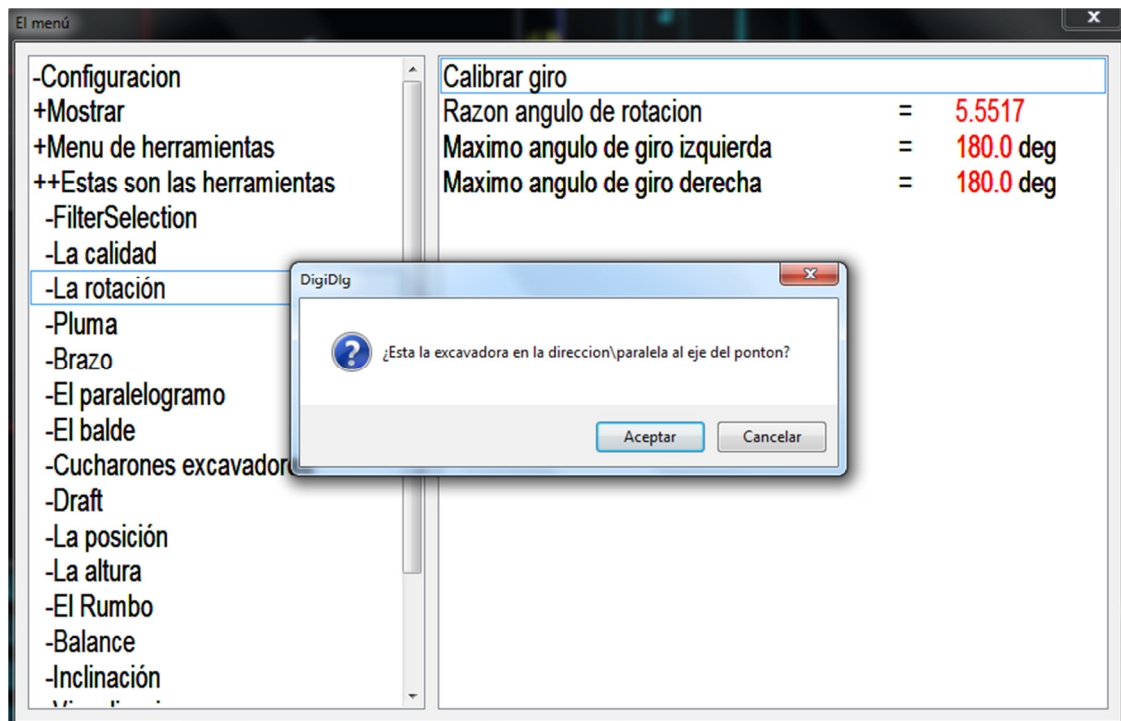


Imagen 3.8: Calibración ingenieril del sensor de rotación

- iii. Posicionar la cabina en línea con las orugas y presionar aceptar.
- iv. Registrar el valor de "Razón de ángulo de rotación", presentado en la Imagen 3.8.

- v. Dar una rotación completa de la cabina.
- vi. Registrar la cantidad de grados que giró la cabina según lo que indica el sistema XPM. Para ello se debe observar los valores de "Rotación" en la pantalla principal (Figura 3.1).

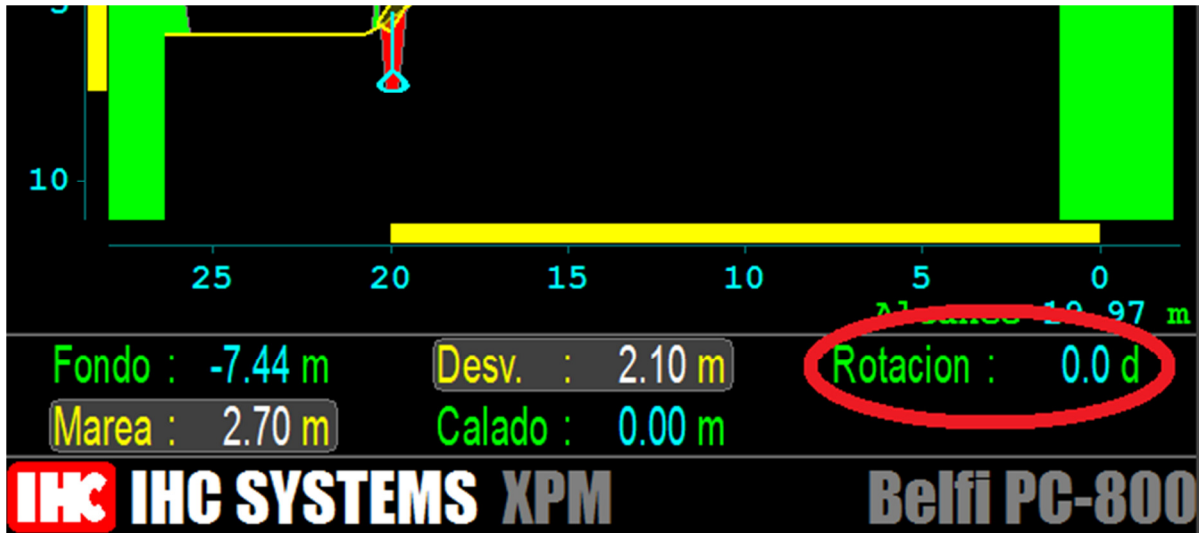


Figura 3.1: Rotación

- vii. Calcular un nuevo valor de "Razón de ángulo de rotación" utilizando la Ecuación 3.1. Cabe destacar que la calibración puede hacerse también con 90° o 180°, sin embargo al utilizar una vuelta completa (360°) se obtiene mejor precisión.

$$\frac{\alpha_{XPM}}{\alpha_{reales}} \cdot R_0 = R_1 \quad \text{Ecuación 3.1}$$

α_{XPM} : Rotación calculada por sistema XPM
 α_{real} : Rotación real (360° en caso de una vuelta)
 R_0 : Razón de ángulo de rotación registrado
 R_1 : Nueva Razón de ángulo de rotación a utilizar

- viii. Cambiar el valor de la "Razón de ángulo de rotación" por el calculado en el paso anterior y repetir el procedimiento hasta alcanzar la precisión deseada.

3.1.2.2 Calibración de los sensores de inclinación

Existen diferentes formas para poder calibrar los ángulos de inclinación según la situación amerite. En caso de que la excavadora se encuentre posicionada sobre un pontón, es posible elevar o descender mecánicamente la plataforma hasta que la excavadora esté nivelada. El presente procedimiento permite calibrar los sensores de inclinación en forma independiente de la base en la cual está apoyada la excavadora, incluso si está en tierra.

- i. Alinear la posición de la cabina con las orugas.

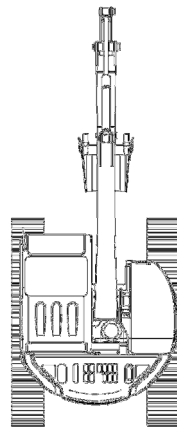


Figura 3.2: Alineación de cabina con orugas

- ii. Retraer el brazo lo más posible. Para ello se debe levantar la pluma completamente y retraer el stick y el balde.

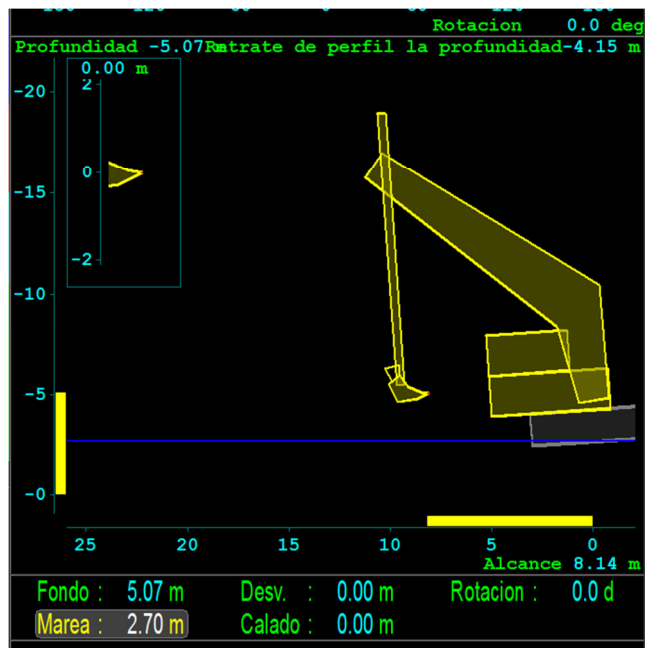


Figura 3.3: Posición de calibración de inclinómetros

iii. Registrar el valor indicado en "Inclinación". (Ejemplo: 1.55°).

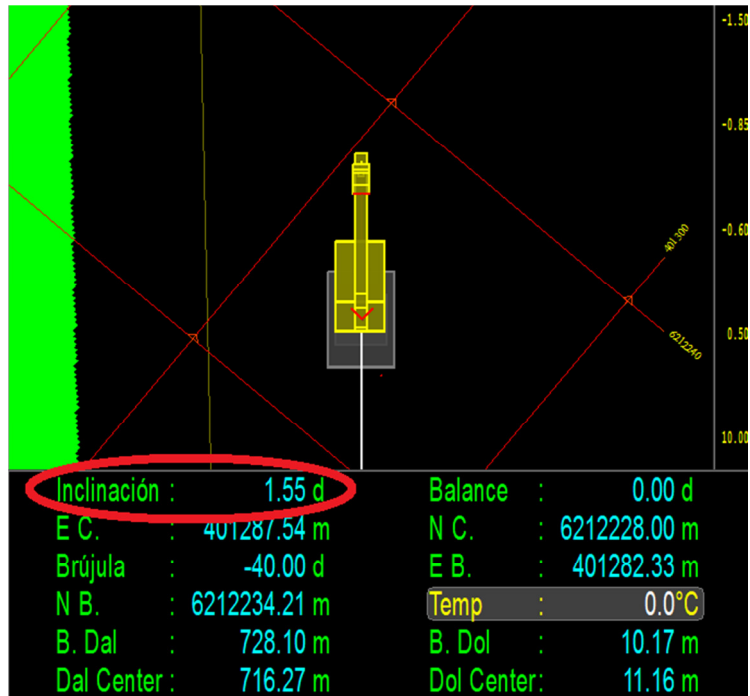


Figura 3.4: Lectura de inclinación 1

iv. Rotar la cabina en 180°.

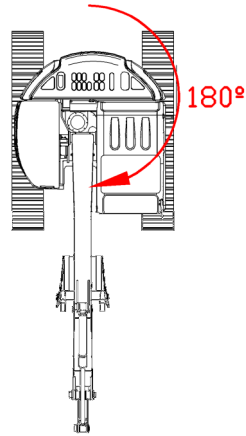


Figura 3.5: Rotación de la cabina

- v. Registrar nuevamente el valor indicado en "Balance" (Ejemplo - 2.45°).

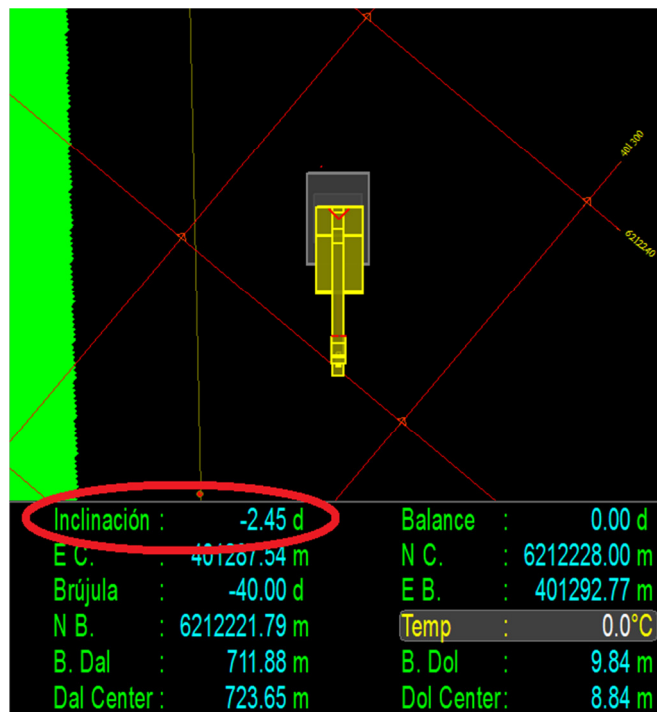


Figura 3.6: Lectura de inclinación 2

- vi. Calcular el promedio del valor absoluto de los valores registrados en el paso iii y v (Ejemplo: $\frac{1.55+2.45}{2} = 2^{\circ}$).
- vii. Sumar el promedio obtenido anteriormente con el menor de los ángulos (Ejemplo: $-2.45^{\circ}+2^{\circ}=-0.45^{\circ}$).

- viii. Girar la cabina de la excavadora hasta que el valor de "Inclinación" sea idéntico al valor obtenido en el paso vii.



Figura 3.7: Lectura de inclinación 3

- ix. Presionar F1 y en el "Menú de herramientas", seleccionar "Estás son las herramientas" y luego "Balance". Acceder en "Calibrar ángulo balance" y presionar "Aceptar".

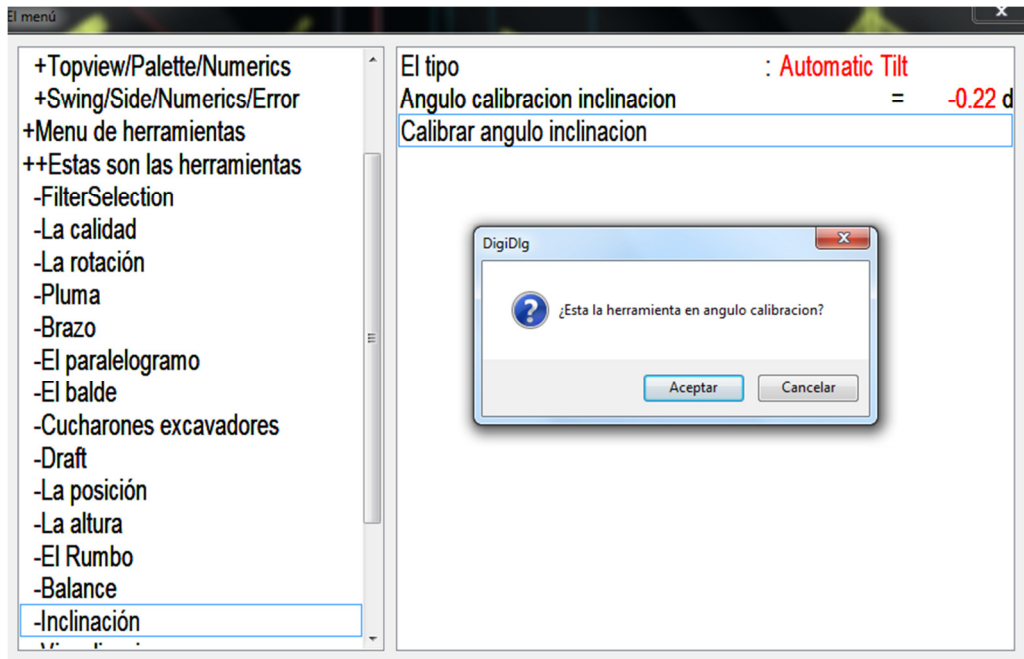


Imagen 3.9: Calibración ingenieril del sensor de inclinación frontal

- x. Para verificar que la calibración fue exitosa, volver a leer los valores de “Inclinación” en las posiciones del paso i y iv. Si la calibración está bien hecha, entonces las lecturas deben tener el mismo valor, pero con signo cambiado (Ejemplo: +/-2°).
- xi. Posicionar la cabina en 90° con respecto a las orugas.

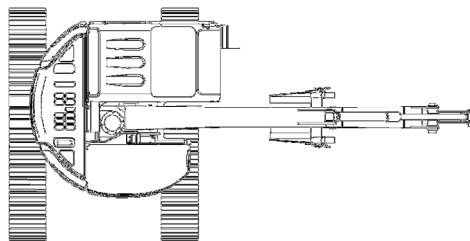


Figura 3.8: Cabina perpendicular a las orugas

- xii. Retraer el brazo lo más posible. Para ello se debe levantar la pluma completamente y retraer el stick y el balde (Figura 3.3).
- xiii. Registrar el valor indicado en “Balance”. (Ejemplo: 0.8°).

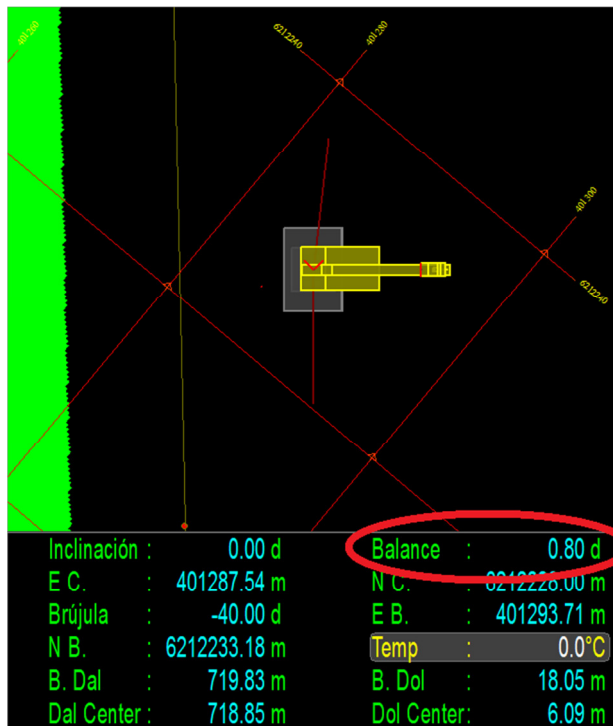


Figura 3.9: Lectura de balance 1

xiv. Rotar la cabina en 180°.

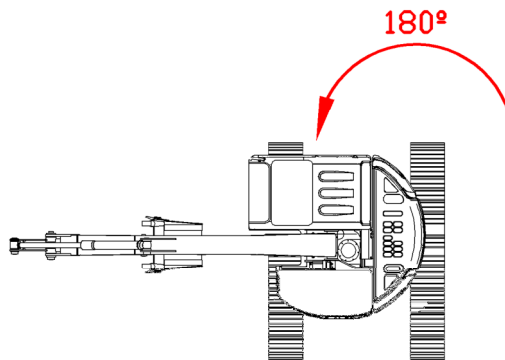


Figura 3.10: Rotación de la cabina

xv. Registrar nuevamente el valor indicado en "Balance" (Ejemplo: -2°).



Figura 3.11: Lectura de balance 2

- xvi. Calcular el promedio del valor absoluto de los valores registrados en el paso xiii y xv (Ejemplo: $\frac{2^{\circ}+0.8^{\circ}}{2} = 1.4^{\circ}$).
- xvii. Sumar el resultado anterior con el menor de los ángulos (Ejemplo: $-2^{\circ}+1.4^{\circ}=-0.6^{\circ}$).
- xviii. Girar la cabina de la excavadora hasta que el valor de "Balance" sea idéntico al valor obtenido en el paso xvii.

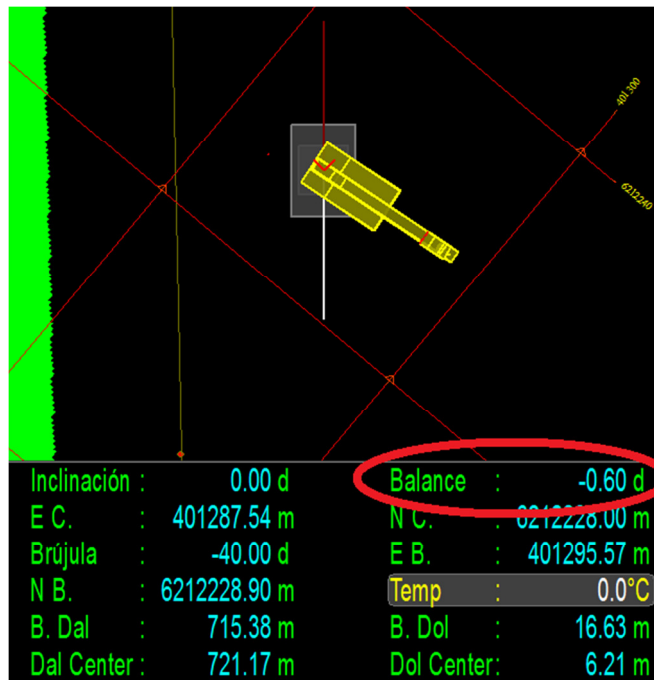


Figura 3.12: Lectura de balance 3

- xix. Presionar F1 y en el "Menú de herramientas", seleccionar "Estás son las herramientas" y luego "Balance". Acceder en "Calibrar ángulo balance" y presionar "Aceptar".

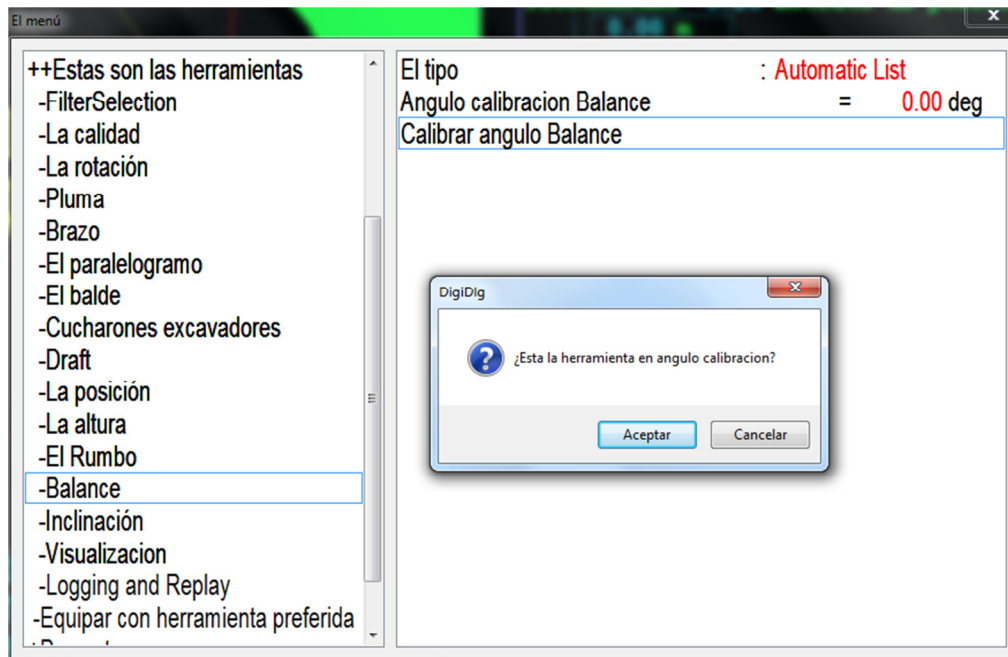


Imagen 3.10: Calibración ingenieril del sensor de inclinación lateral

- xx. Para verificar que la calibración fue exitosa, volver a leer los valores de "Balance" en las posiciones del paso xi y xiv. Si la calibración está bien hecha, entonces las lecturas deben tener el mismo valor, pero con signo cambiado (Ejemplo: +/-1.4°).

3.1.2.3 Calibración de los sensores de giro (pluma, stick y balde)

- i. Presionar tecla "F1" para mostrar la ventana de opciones y cambiar en "Configuración" el nivel de acceso a "Más" cuya clave es "ABCD".
- ii. Entrar a la opción "Herramientas", "Estas son las herramientas" y abrir la ventana de "Visualización", luego seleccionar "Calibrar transductores de ángulo".

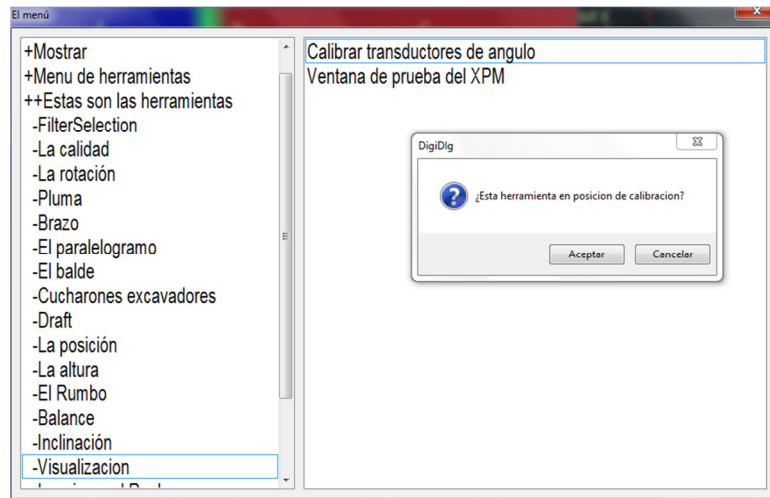


Imagen 3.11: Calibración operacional de sensores

- iii. Dejar la excavadora en posición de calibración, la cual consiste en extender a máxima capacidad la pluma, el stick y abrir completamente el balde (Imagen 3.12) y presionar "Aceptar".



Imagen 3.12: Posición de calibración operacional

- iv. Apoyar el brazo contra el suelo, preferentemente colocando el stick en un ángulo de 90° con respecto a la horizontal. Los dientes del balde deben apuntar en forma paralela al suelo como es indicado en la Figura 3.13. En caso de que por efectos de las dimensiones de la excavadora no sea posible colocarla en esta posición, la calibración también puede realizarse con el brazo extendido como es indicado en la Figura 3.14. Lo fundamental es que siempre se encuentre apoyada en el suelo, de lo contrario el brazo descende por efecto de peso propio, afectando la calibración.

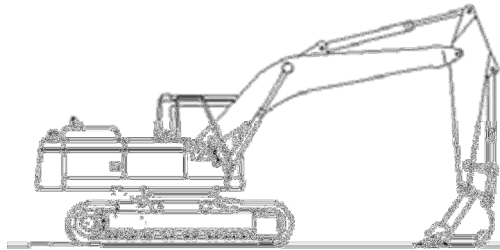


Figura 3.13: Posición de calibración ingenieril (recomendada)

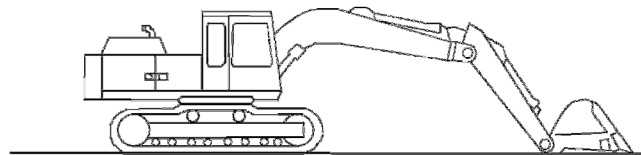


Figura 3.14: Posición de calibración ingenieril (alternativa)

- v. Variar el ángulo de calibración de la pluma, stick y balde hasta que la imagen adquiriera una posición similar a la que tiene la excavadora. Esto se hace en el “Menú de herramientas” en las opciones “Pluma” (Imagen 3.13), “Brazo” (Imagen 3.14) y “Paralelogramo” (Imagen 3.15). En la Figura 3.15 se muestra la posición de los elementos de la excavadora después de ajustar en todos los valores.

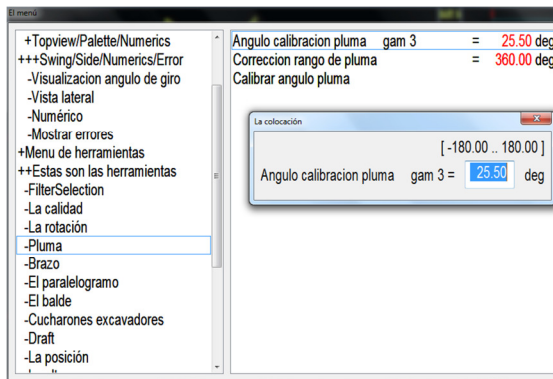


Imagen 3.13: Ángulo de calibración pluma

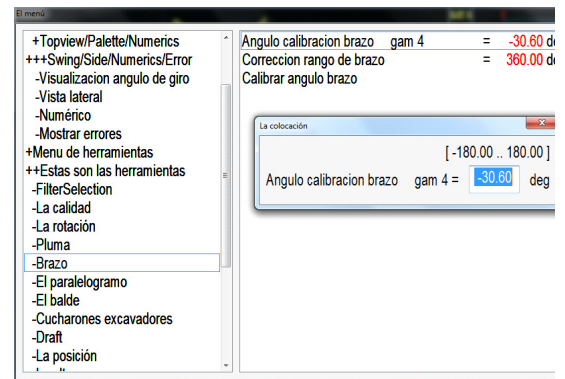


Imagen 3.14: Ángulo de calibración stick

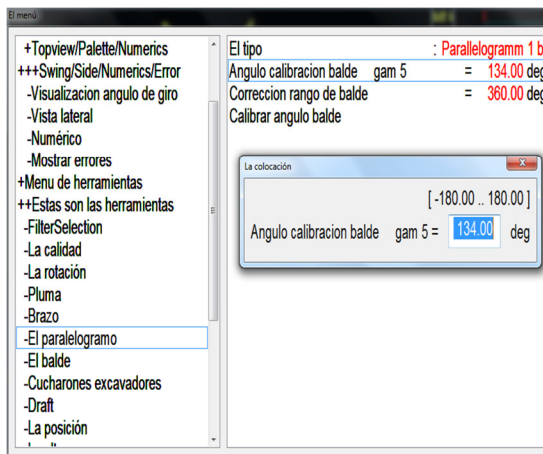


Imagen 3.15: Ángulo de calibración balde

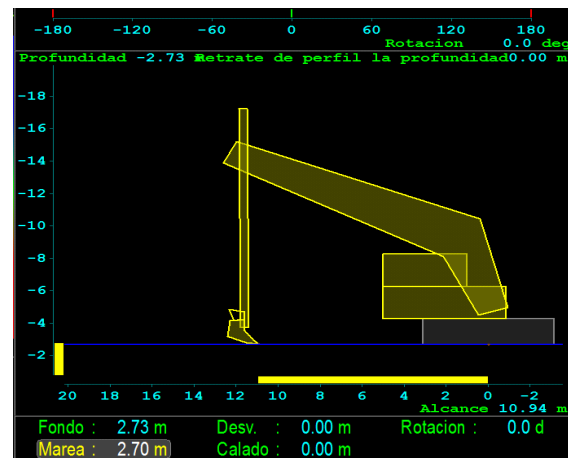


Figura 3.15: Posición de calibración inicial

- vi. Abrir la “Ventana de Prueba del XPM” que también se encuentra en “Visualización”, la cual contiene la información relevante para la calibración.

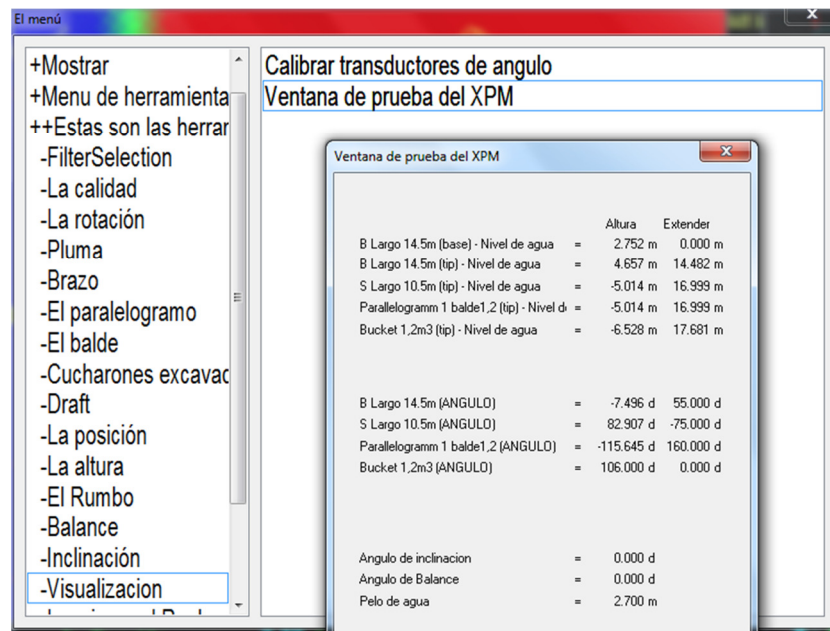


Imagen 3.16: Ventana de prueba

- vii. Obtener el desnivel que tiene el pasador que une la pluma y el stick con respecto a la base de las orugas utilizando estaciones totales u otro instrumento.
- viii. Comparar el valor obtenido en el paso anterior con el de "Altura" que aparece en la "Ventana de Prueba del XPM" presentado en la Imagen 3.17. Este valor corresponde a la diferencia de cotas (desnivel) calculado por el sistema XPM de la punta de la pluma con respecto al nivel del agua fijo en la base de las orugas.

El nombre del elemento dependerá del que se haya puesto en la configuración, en este caso en particular se llama "B Largo 14.5m". Lo importante es diferenciar entre el comienzo del elemento (base) y el extremo (tip). La base de la pluma corresponde al pasador que la une con la cabina, mientras que la punta corresponde al pasador que une la pluma con el stick. De manera similar ocurre con el stick y el balde. (La punta del stick corresponde a la unión con el balde y en el caso del balde corresponde a los dientes que tiene este).

	Altura	Extender
B Largo 14.5m (base) - Nivel de agua	= 2.752 m	0.000 m
B Largo 14.5m (tip) - Nivel de agua	→ 4.657 m	14.482 m
S Largo 10.5m (tip) - Nivel de agua	= -5.014 m	16.999 m
Parallelogramm 1 balde1,2 (tip) - Nivel de	= -5.014 m	16.999 m
Bucket 1,2m3 (tip) - Nivel de agua	= -6.528 m	17.681 m
B Largo 14.5m (ANGULO)	= -7.496 d	55.000 d
S Largo 10.5m (ANGULO)	= 82.907 d	-75.000 d
Parallelogramm 1 balde1,2 (ANGULO)	= -115.645 d	160.000 d
Bucket 1,2m3 (ANGULO)	= 106.000 d	0.000 d
Angulo de inclinacion	= 0.000 d	
Angulo de Balance	= 0.000 d	
Pelo de agua	= 2.700 m	

Imagen 3.17: Desnivel de la pluma calculado por el sistema XPM

- ix. Variar el ángulo de calibración de la pluma hasta que el desnivel calculado en el sistema XPM coincida con el determinado con estaciones totales.
- x. Obtener el desnivel del pasador que una el stick con el balde con respecto a la base de las orugas.
- xi. Abrir la "Ventana de Prueba del XPM" y comparar el valor que entrega la diferencia de cotas entre la punta del stick (Imagen 3.18) con el valor obtenido anteriormente.

Ventana de prueba del XPM		
	Altura	Extender
B Largo 14.5m (base) - Nivel de agua	= 2.752 m	0.000 m
B Largo 14.5m (tip) - Nivel de agua	= 11.542 m	11.666 m
S Largo 10.5m (tip) - Nivel de agua	= 1.548 m	11.612 m
Parallelogramm 1 balde1,2 (tip) - Nivel de	= 1.548 m	11.612 m
Bucket 1,2m3 (tip) - Nivel de agua	= 0.031 m	10.937 m
B Largo 14.5m (ANGULO)	= -36.996 d	25.500 d
S Largo 10.5m (ANGULO)	= 127.307 d	-30.600 d
Parallelogramm 1 balde1,2 (ANGULO)	= -82.327 d	134.000 d
Bucket 1,2m3 (ANGULO)	= 106.000 d	0.000 d
Angulo de inclinacion	= 0.000 d	
Angulo de Balance	= 0.000 d	
Pelo de agua	= 2.700 m	

Imagen 3.18: Desnivel del stick calculado por el sistema XPM

- xii. Variar el ángulo de calibración del stick hasta que la diferencia de cotas indicada por el sistema XPM sea idéntico al de las estaciones totales.
- xiii. Abrir el balde y apoyarlo contra el suelo.
- xiv. Obtener el desnivel de la punta de los dientes del balde con respecto a la base de las orugas.
- xv. Abrir la "Ventana de Prueba del XPM" y comparar el valor del desnivel obtenido anteriormente con el calculado por el sistema XPM (Imagen 3.19).


	Altura	Extender
B Largo 14.5m (base) - Nivel de agua	= 2.752 m	0.000 m
B Largo 14.5m (tip) - Nivel de agua	= 11.542 m	11.666 m
S Largo 10.5m (tip) - Nivel de agua	= 1.548 m	11.612 m
Paralelogramm 1 balde1,2 (tip) - Nivel de	= 1.548 m	11.612 m
Bucket 1,2m3 (tip) - Nivel de agua	=  0.031 m	10.937 m
B Largo 14.5m (ANGULO)	= -36.996 d	25.500 d
S Largo 10.5m (ANGULO)	= 127.307 d	-30.600 d
Paralelogramm 1 balde1,2 (ANGULO)	= -82.327 d	134.000 d
Bucket 1,2m3 (ANGULO)	= 106.000 d	0.000 d
Angulo de inclinacion	= 0.000 d	
Angulo de Balance	= 0.000 d	
Pelo de agua	= 2.700 m	

Imagen 3.19: Desnivel del balde calculado por el sistema XPM

- xvi. Variar el ángulo de calibración del balde hasta que la diferencia de cotas calculado por el sistema XPM sea idéntico al registrado por estaciones totales.
- xvii. Cambiar de posición el brazo y apoyarlo en el suelo (posición alternativa) y comparar nuevamente los desniveles obtenidos por topografía con los calculados por el sistema XPM. Este proceso es iterativo y se deben utilizar dos posiciones diferentes hasta obtener una precisión adecuada. Si el error no converge, es posible que las dimensiones de los elementos no estén correctas.
- xviii. Determinar con un GPS móvil (u otro instrumento) la cota de proyecto de la punta del balde.
- xix. Comparar el valor obtenido en el paso anterior con el valor "Fondo".

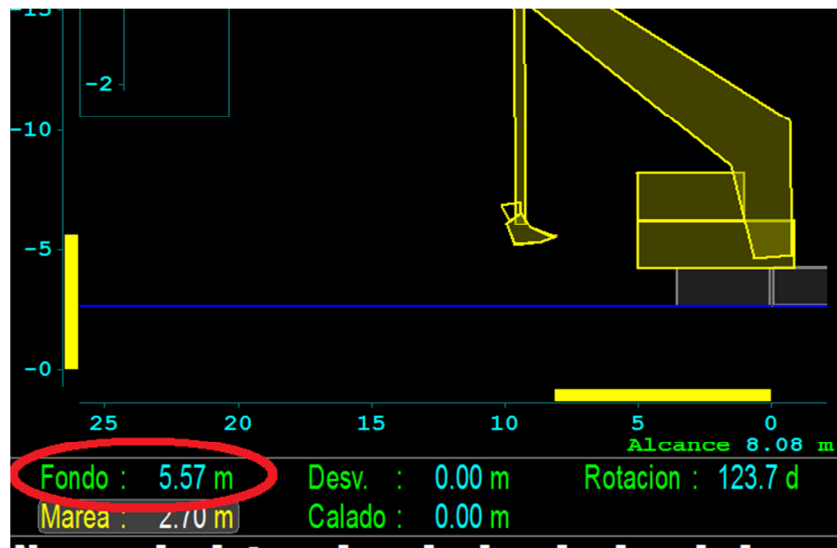


Figura 3.16: Cota calculada por el sistema XPM

- xx. En caso de que ambos valores no coincidan, abrir el “Tool Configurator” y editar las coordenada de altura hasta que el valor obtenido por el XPM (Fondo) y el real cuadren (Imagen 3.20).

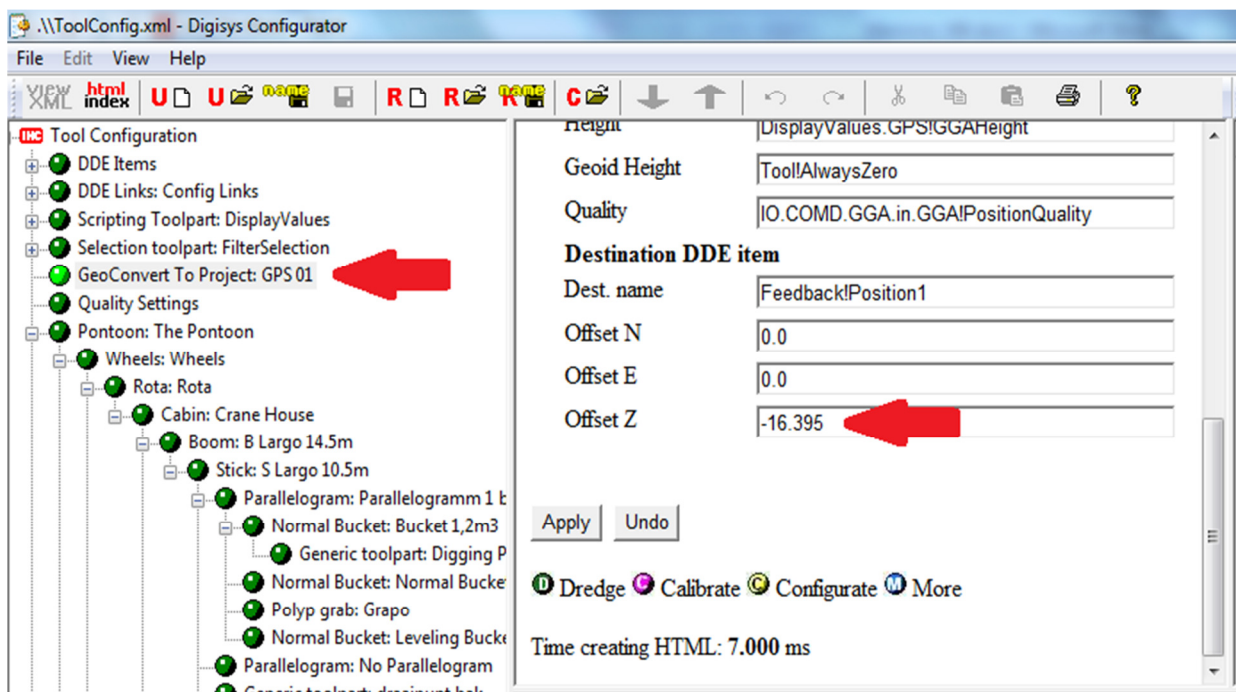


Imagen 3.20: Edición de coordenadas de altura

- xxi. Presionar “Apply” y guardar.

3.1.3 Procedimiento para la colocación de rocas

- i. Encender el sistema XPM y esperar a que cargue el programa.
- ii. Hacer una calibración operacional del sistema (los detalles se encuentran en el "Manual del Operador" en el Anexo B).
- iii. Posicionar la excavadora al borde del talud manteniendo las orugas de la excavadora en la misma dirección de avance del muelle y luego girar la cabina en 90° con respecto de las orugas tal como se presenta en la Imagen 3.21. Se referirá a esta posición como "posición de trabajo". Cabe destacar, que se debe resguardar una distancia de al menos un metro del borde del talud por motivos de seguridad.



Imagen 3.21: Posición de trabajo

- iv. Registrar el valor del parámetro "Dal Center" que corresponde a la progresiva en la que se encuentra la excavadora.

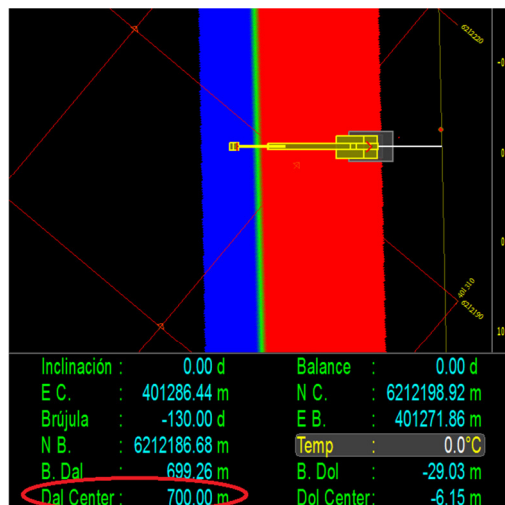


Figura 3.17: Progresiva de la excavadora

- v. Coger las rocas con el grapo.
- vi. Girar la excavadora hasta que el grapo se encuentre justo en la esquina de una de las marcas del modo de vertido. O bien, sobre los lugares donde no haya marca. El color verde indica que no hay rocas puestas, el celeste indica rocas de primera capa, el rojo de segunda capa pero que no está a cota y el azul indica que no se requieren más rocas.

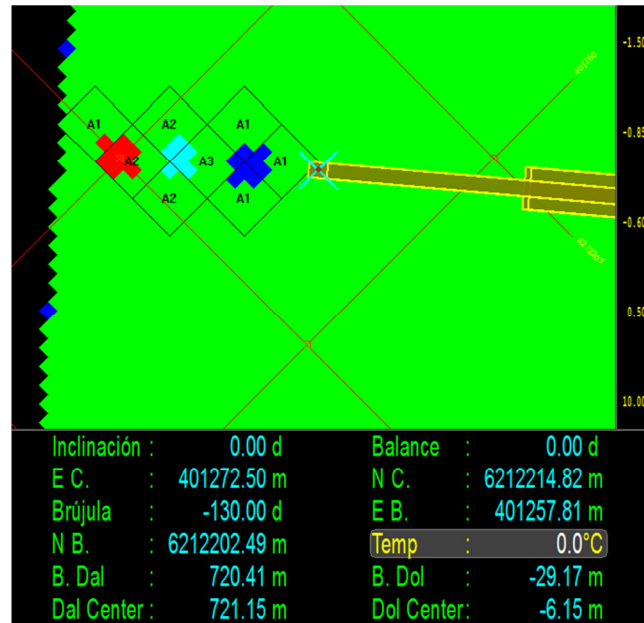


Figura 3.18: Colocación de roca

- vii. Sumergir el brazo de la excavadora hasta que toque el fondo, soltar la roca y luego posicionar el grapo sobre ella (Figura 3.19). Cabe destacar que la línea amarilla superior indica la cota teórica que debe alcanzar la segunda capa del enrocado, la línea central corresponde a la cota del filtro que se encuentra en contacto con la coraza y la línea inferior la cota que separa el núcleo del filtro.

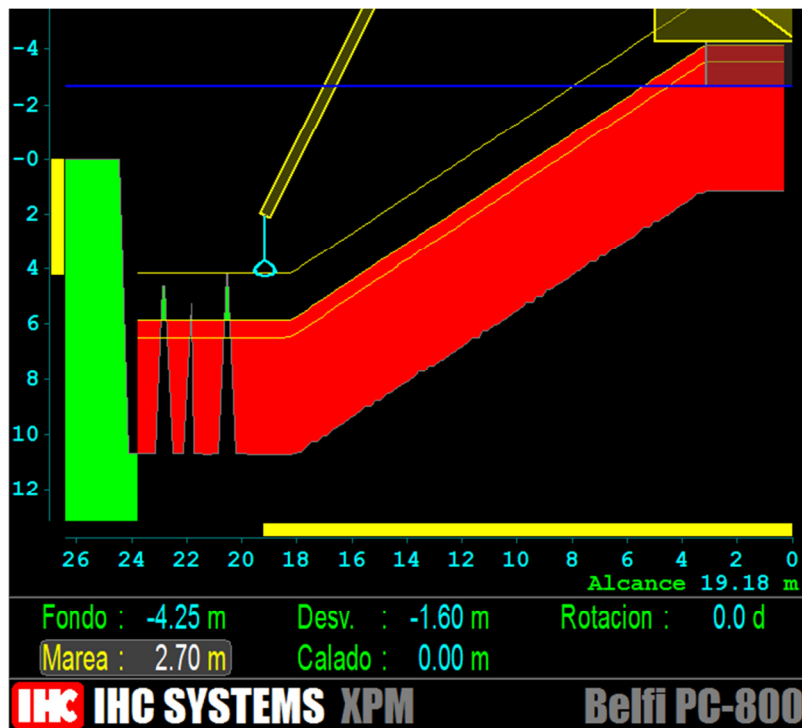


Figura 3.19: Posicionamiento del grapo sobre la roca

- viii. Presionar levemente el botón de vertido hasta que deje una marca en la pantalla (Figura 3.20).

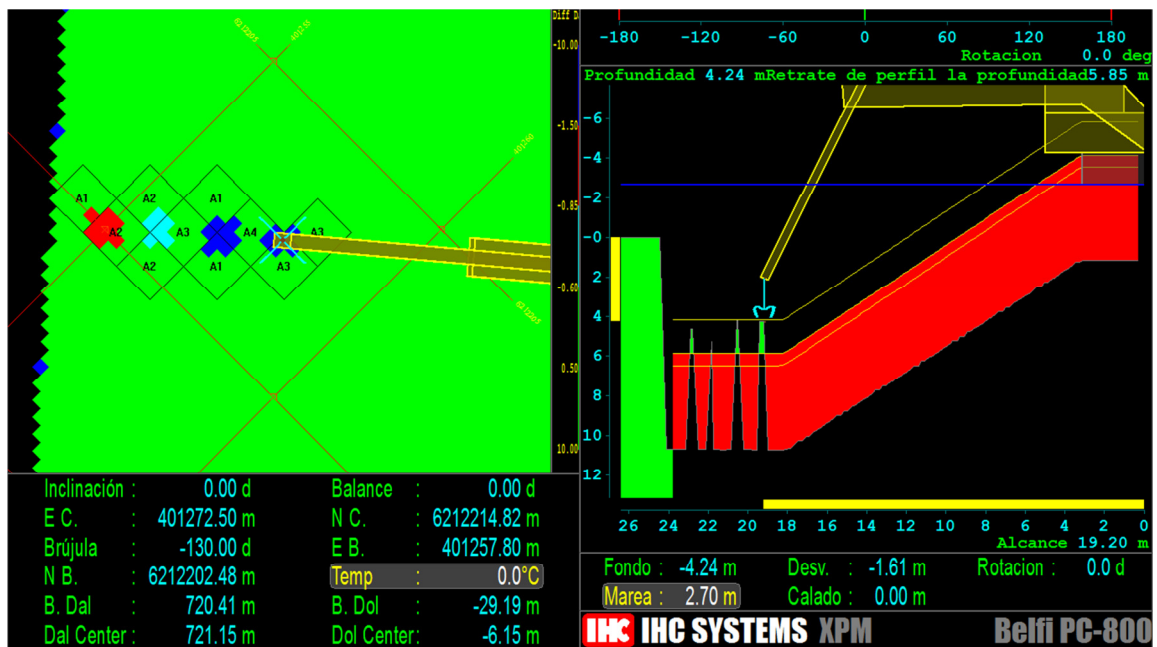


Figura 3.20: Marca de roca puesta

- ix. Retirar la excavadora del agua y repetir el paso seis.
- x. En caso de que no se haya presionado el botón de vertido o si se desea verificar si hay roca puesta, se debe tocar con el grapo la parte superior de las rocas y presionar el botón de vertido para registrar su ubicación.
- xi. Finalizado el trabajo, registrar la progresiva final en "Dal Center".

3.1.4 Procedimiento de armado de núcleo y filtro

- i. Encender el sistema XPM y esperar a que cargue el programa.
- ii. Calibrar el sistema XPM.
- iii. Colocar la excavadora en la posición de trabajo.
- iv. Registrar el valor del parámetro "Dal Center" que corresponde a la progresiva en la que se encuentra la excavadora.
- v. Recoger el material, ya sea núcleo o filtro.
- vi. Sumergir el brazo de la excavadora hasta que toque la zona del talud donde se desea depositar el material.
- vii. Depositar el material en el talud y luego darle la pendiente pasando el balde justo por la línea amarilla. Si el balde pasa por debajo de la línea significa que falta material en el talud y en la vista lateral se marcará de color rojo la zona donde lo requiere (Figura 3.21).

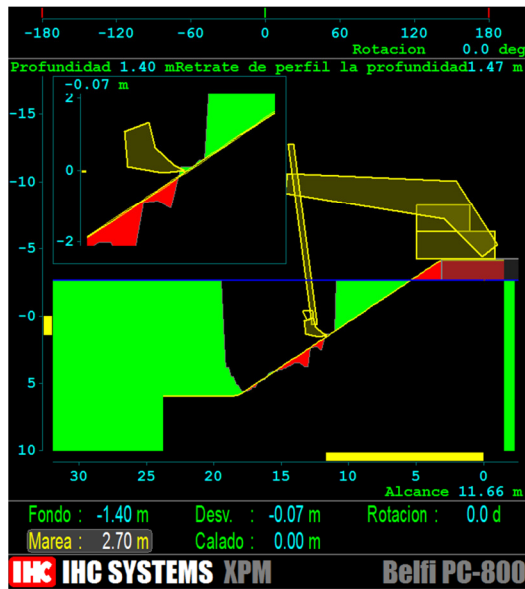


Figura 3.21: Armado del talud (núcleo o filtro)

- viii. Verificar que todo el talud se encuentre a la cota deseada tocando el fondo con el balde, en caso contrario, depositar material adicional en las zonas donde lo requieran.
- ix. Desplazar la excavadora un metro aproximadamente a lo largo del muelle y repetir para armar el talud e otra zona. En la vista en planta se puede observar las zonas donde el trabajo ya ha sido realizado, las cuales se presentan de color verde.

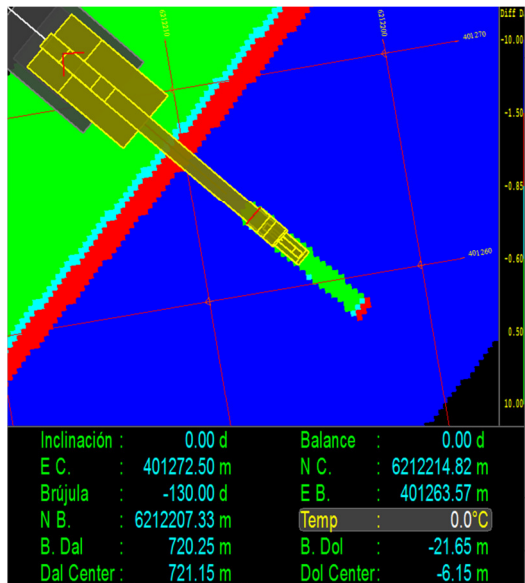


Figura 3.22: Zonas trabajadas

3.1.5 Procedimiento de enrazado de bases

- i. Encender el sistema XPM y esperar a que cargue el programa.
- ii. Posicionar las orugas y la cabina orientadas hacia el mar (posición de trabajo).
- iii. Calibrar el sistema XPM.
- iv. Registrar el valor del parámetro "Dal Center" que corresponde a la progresiva en la que se encuentra la excavadora.
- v. Sumergir el brazo de la excavadora hasta que la punta del balde esté sobre la línea amarilla, la cual representa la cota de las bases de apoyo.

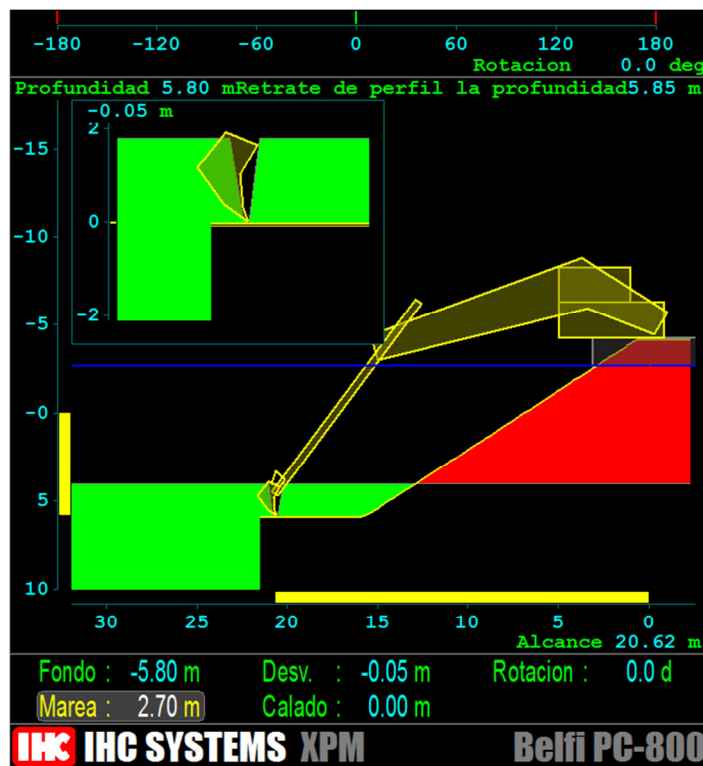


Figura 3.23: Posicionamiento antes de enrazar

- vi. Retroceder la excavadora hasta que el balde toque el comienzo del talud. Durante este proceso la posición del balde y el brazo no debe ser alterada, de lo contrario podría cambiar la cota a la cual se esté enrazando. El sistema XPM dejará una marca en ambos monitores

indicando la zona en la cual ya se ha enrazado y permitirá ver si se ha hecho correctamente.

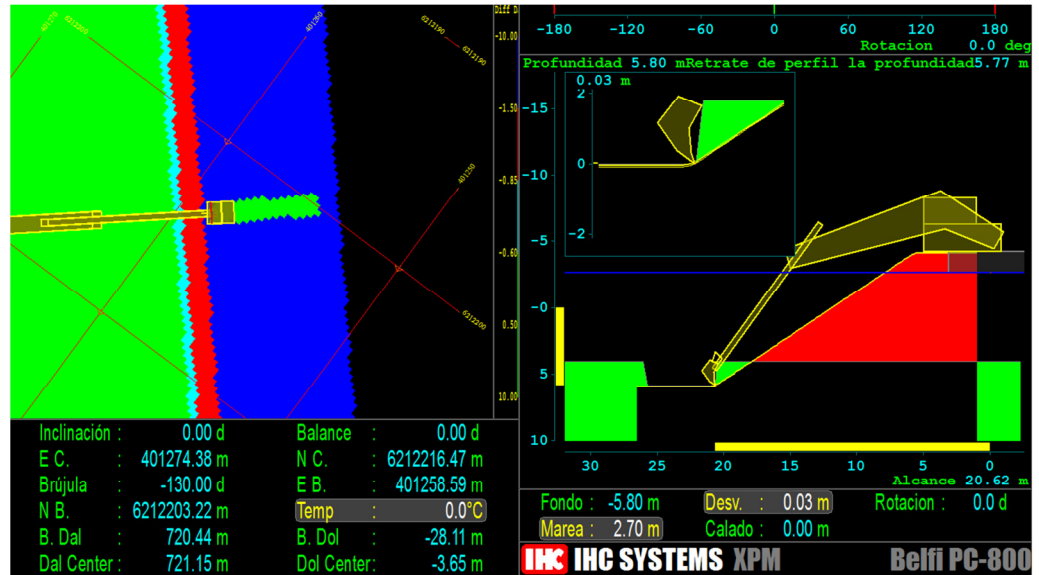


Figura 3.24: Enrazado

- vii. Reposicionar la excavadora un metro más delante de la zona trabajada para continuar enrazando otro sector. Alternativamente se puede visualizar en pantalla las zonas donde aún falta enrazar, en base a esto cuantificar el desplazamiento que se requiere.
- viii. Finalizado el trabajo, registrar la progresiva final en "Dal Center".

3.1.6 Colocación de rocas con grúa

Debido al desarrollo de las actividades del proyecto, se decidió colocar coraza con una grúa Link-Belt LS-518 (Imagen 3.22) equipada, en forma improvisada, con un receptor GPS móvil. El receptor GPS consiste en una antena que identifica su posición geográfica y cota. La información la transfiere su a una libreta electrónica través de bluetooth, la cual procesa los datos y permite al operador trabajar con ellos. El conjunto entre el receptor y la libreta se conoce como Rover, el cual se usa comúnmente en distintas labores de topografía. Este instrumento tiene la ventaja que puede ser utilizado por una persona y permite identificar rápidamente puntos que se encuentran a grandes distancias y sin visibilidad directa, por ende no requiere puntos de referencia.

El receptor GPS se instaló en la punta de la pluma (Imagen 3.23) con el objetivo de identificar la proyección vertical de la carga que cuelga, identificando las coordenadas Este y Norte. La cota captada por la antena no corresponde a la de la roca pues el receptor se encuentra a varios metros sobre el nivel del mar en la punta de la pluma. Para la colocación de rocas se diseñó una grilla en Autocad con un espaciamiento de 75cm, la cual indica las zonas donde se debe colocar la coraza y además registra las marcas donde se ha puesto. Este diseño puede debe ser cargado en forma previa (vía pendrive) y puede ser visualizado en la libreta electrónica, de modo que es posible observar la ubicación del receptor GPS y de la grilla mientras está operando la grúa.

Para la colocación de rocas se debe posicionar la grúa de tal manera que la marca de la posición del receptor quede en el centro de cada cuadrado de la grilla (Imagen 3.24) y posteriormente descender lentamente la roca hasta que toque fondo y registrar el punto en la libreta del GPS. Se requiere la coordinación de tres personas: el operador, el rigger y el ayudante de topografía para realizar esta actividad. Cabe mencionar que el ayudante de topografía debe situarse en una posición cercana a la grúa ya que la señal por Bluetooth tiene un alcance limitado (60m aproximadamente) y no puede estar en el interior de la grúa junto al operador debido a que se genera interferencia e impide la transferencia de información del receptor GPS a la libreta. El ayudante le indica al rigger hacia donde posicionar la roca y este le da las instrucciones al operador.



Imagen 3.22: Grúa Link Belt LS-518

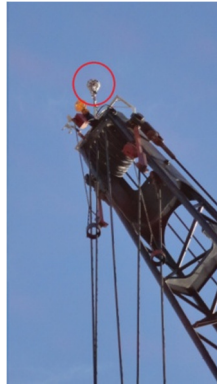


Imagen 3.23: Ubicación del receptor GPS



Imagen 3.24: Libreta electrónica y grilla de colocación

3.2 Rendimientos

Se registraron en terreno los rendimientos de dos maquinarias diferentes, los de una grúa Link-Belt LS-518 de 150 toneladas implementada con un GPS móvil y los de una excavadora Komatsu PC-800 con el sistema XPM. No se agregaron los rendimientos de otros métodos convencionales (sin GPS) debido a que las condiciones de trabajo en Punta Pereira no son comparables con otros proyectos realizados en Chile. Normalmente, en nuestro país, la colocación de enrocados se realiza con buzos dirigiendo las maniobras, sin

embargo en este proyecto la visibilidad de los buzos bajo el agua es nula (producto de la turbiedad), impidiendo realizar la colocación.

Los rendimientos obtenidos se ven influenciados por distintos factores, de los cuales las condiciones ambientales, el tamaño de las rocas y la habilidad del operador son los más importantes. Las condiciones laborales en Uruguay y los constantes problemas mecánicos no permitieron hacer una comparación de avances semanales ni diarios, pues se genera una variabilidad muy alta y que no representa el rendimiento mismo de los equipos. Por ende, no se consideraron tiempos muertos por razones ajenas a la colocación de rocas y se realizaron las mediciones en condiciones ambientales normales. Para el cálculo del rendimiento de ambas maquinarias se consideró, a modo de comparación, el tiempo promedio de colocación de una roca (un ciclo). Para ello se utilizó un muestreo de 50 rocas por máquina y debido a que la tendencia obtenida era evidente no fue necesario aumentarla. Cabe destacar que se consideró un peso promedio por roca de 1.6 toneladas presentadas en las especificaciones técnicas del proyecto.

En las Tablas 3.1 y 3.2 se presentan los rendimientos calculados en base al tiempo que se demora la grúa y la excavadora en colocar una roca. El rendimiento se encuentra expresado en la cantidad de rocas puestas en una hora y también en base a su peso. Además se presenta el tiempo promedio que se demora cada maquinaria en realizar un ciclo de trabajo. En el Anexo C se puede tener acceso a los registros obtenidos en terreno.

Rendimiento grúa Link-Belt		
Promedio	0:04:29	
Rendimiento	13.4	rocas/hora
	21.4	ton/hora

Tabla 3.1: Rendimiento grúa Link-Belt

Rendimiento excavadora PC-800		
Promedio	0:01:09	
Rendimiento	52.2	rocas/hora
	83.5	ton/hora

Tabla 3.2: Rendimiento excavadora PC-800

3.3 Análisis de la aplicación del sistema XPM

3.3.1 Capacidades

El XPM es un sistema que está diseñado principalmente para excavar y tiene muchos atributos y opciones disponibles que no están siendo aprovechados cuando se colocan rocas. Sin embargo el sistema XPM demuestra ser una herramienta de gran ayuda para el operador y la mejor opción para esta tarea, pues le permite visualizar el entorno donde tiene que colocar la

coraza, identificando el terreno, el talud y también la ubicación de las rocas ya puestas.

- i. Combinando el uso del sistema XPM y la experiencia del operador, tanteando con el balde la superficie de las rocas o del terreno, se puede determinar con seguridad las zonas donde hace falta colocar rocas. El sistema XPM muestra la cota y posición del grapo y también las marcas que indican el lugar donde hay roca puesta, identificando las zonas dónde faltan rocas por poner, ya sea en primera o segunda capa.
- ii. De manera similar a la anterior es posible realizar una verificación submarina del trabajo realizado, posicionando el grapo hasta que toque fondo y actualizando la nueva cota del terreno cada vez que se oprime el botón de vertido. Dependiendo de la extensión de la superficie a inspeccionar se deberá evaluar la posibilidad de utilizar una batimetría externa con ecosonda. El DTSP es un accesorio adicional que permite realizar una batimetría y que se encuentra conectado al sistema XPM para importar la información de datos reales con mayor facilidad, sin embargo se requiere que la excavadora se encuentre posicionada sobre un pontón.
- iii. El sistema XPM también se puede emplear en otras labores como el armado del talud del rompeolas, el cual se presenta dibujado en pantalla y el operador puede determinar mediante tanteo si las rocas del talud se encuentran en la cota correspondiente, en caso contrario se debe agregar o cortar material del talud y verificar la cota nuevamente hasta que alcance la especificada en el diseño.
- iv. El sistema cuenta con parámetros asociados a los avances y rendimientos, puede cuantificar el número de excavadas realizadas, el tiempo que se demora en hacer cada una y el volumen total removido. Además puede identificar la progresiva en la que se encuentra, de modo que no es necesario utilizar topografía para determinar el avance lineal.
- v. La precisión obtenida en terreno en el plano horizontal es de +/-20cm y +/-1cm en la vertical. Por experiencia de los técnicos holandeses la precisión que generalmente se obtienen en las excavadoras es del orden de +/-15cm. El error obtenido en terreno es levemente mayor

debido a que la pluma está levemente deformada hacia un costado y cuando el brazo se encuentra completamente extendido el error se incrementa, además se debe considerar que los errores de las mediciones se van acumulando pues son secuenciales.

3.3.2 Limitaciones

Algunas limitantes de la aplicación del sistema XPM se presentan a continuación.

- i. No muestra cómo resulta el fondo marino real después de realizar una excavación, pues el programa trabaja en base a modelos y asume que toda la zona donde pasa virtualmente el balde es excavada satisfactoriamente, sin embargo esto puede que no ocurra por diversos motivos. Después de colocar una roca, si no es marcada con el botón de vertido, el sistema no la reconoce y debe posicionarse la punta del grapo sobre la roca para poder marcar en forma puntual la cota del terreno.
- ii. Los registros de la colocación de coraza realizados en el modo de vertido sólo funcionan con el grapo, de modo que si las rocas son colocadas con el balde no es posible identificar las zonas en que se han puesto. Sin embargo, la excavadora puede colocar las rocas si se realiza de manera cautelosa, posicionando la excavadora en sentido transversal (posición de trabajo y combinando la vista lateral con el tanteo del fondo, se puede observar en pantalla la cota y determinar si existe una zona donde falte roca. Debido a que el tamaño de la coraza es significativa, es posible discriminar con claridad si se trata de la primera o segunda capa. Sin embargo, no se tendrá un registro del trabajo realizado.
- iii. No puede identificar el número de rocas puestas.
- iv. El computador del sistema cuenta con pocos recursos, de modo que los archivos que contengan la información relacionada con el diseño no pueden ser extensos ya que el tiempo de procesamiento puede ser significativo (15 minutos).

- v. La configuración que se le puede realizar al programa es limitada, pues sólo se pueden utilizar las configuraciones de los elementos predefinidos de IHC Systems, sin embargo estas se pueden combinar con libertad.
- vi. El Design carece de elementos de dibujo avanzados como el Autocad y no tiene muchas opciones de que permitan dibujar de manera más precisa como otros programas CAD.
- vii. El sistema considera que todos los elementos del brazo son rectos, de modo que las deformaciones o los movimientos laterales entre las piezas no serán detectados por los sensores y por ende no serán mostrados en el programa.
- viii. No puede trabajar en lugares cerrados (bajo techo) o con estructuras que se encuentren cerca de las antenas, ya que afectan a la señal del GPS.

3.3.3 Recomendaciones

- i. La ubicación de las pantallas en los pies del operador no permite una visión completa de los elementos, siendo que algunos tienen importancia al momento de trabajar, como por ejemplo la vista ampliada de la herramienta de trabajo (grapo o balde). También es posible que se dañen accidentalmente con los pies del operador o que se acumule el agua de las lluvias en su interior producto de alguna filtración del parabrisas de la excavadora. Lo ideal es que la pantalla quede a una altura más elevada para poder visualizar todos los elementos de la pantalla.
- ii. La ubicación del botón de vertido puede mejorarse instalándolo en el mando del operador para que este no tenga que dejar libre los controles de la excavadora para presionar el botón. En el instante en que el operador suelta los mandos, el brazo desciende por peso propio y la posición de la roca cambia, de modo que debe reposicionar el brazo hasta que la roca esté nuevamente en el lugar correcto para su colocación.
- iii. Otros equipos como el inversor es conveniente reubicarlos detrás del asiento del operador pues evita que este lo apague accidentalmente

topándolo con la cabeza, pues el botón de apagado/encendido se encuentra justo sobre el asiento del operador.

- iv. Los cables de los sensores de giro tienen que encontrarse bien amarrados al brazo de la excavadora, ya que se pueden flexionar en forma constante, provocando la cortadura interna de este.
- v. Fabricar una carcasa protectora de la caja de distribuciones I/O a modo de protegerla de las lluvias y del calor. Además es recomendable fabricar una protección del sensor del balde, el cual se encuentra más expuesto a los impactos que los otros sensores. En las Imágenes 3.25 y 3.26 se presentan las protecciones fabricadas en terreno.



Imagen 3.25: Protección caja de distribución



Imagen 3.26: Protección sensor del balde

- vi. Tener de antemano un repuesto del sensor del balde con sus respectivos cables, pues se encuentra más expuesto que el resto de los sensores. Además el sensor puede ser intercambiado con los de la pluma y el stick.
- vii. Cuando se esté realizando una soldadura en la excavadora se debe tener la conexión a tierra lo más cerca del electrodo para que la corriente no se transmita a través del sensor y produzca algún daño. También se recomienda alejar los cables de los sensores de la zona de soldadura para que no adquieran temperatura y se deterioren internamente.

- viii. El diseño del terreno y de los perfiles debe ser realizado en oficina y no tiene que ser muy extenso, dividir el muelle en tramos de 500m y con un tamaño de matriz 1mx1m.

- ix. Debido a que el diseño está basado en coordenadas geográficas, resulta muy útil tener un GPS móvil en terreno, ya que es una herramienta de gran ayuda para verificar la calibración, pues permite comparar las coordenadas y cota que entrega el sistema XPM con las del GPS móvil.

3.4 Comparación la colocación de coraza con grúa y excavadora

El sistema GPS implementado en la grúa está diseñado para utilizarse en topografía, sin embargo surgió la idea en terreno de implementarlo en la grúa para colocar coraza en conjunto con la excavadora. A diferencia del sistema XPM, el Rover no tiene una visualización del terreno ni del talud, tampoco puede verificar el trabajo realizado porque no tiene posibilidad de identificar la cota en la cual se encuentran las rocas puestas. Sin embargo, tiene una vista en planta que permite visualizar la posición geográfica de la proyección vertical de la carga, una grilla que indica la posición donde colocar roca y los registros de los lugares donde ya se colocó la coraza. Además, guarda un registro del número, las coordenadas y la hora de cada roca puesta.

El sistema XPM es más elaborado pues emplea además un conjunto de sensores y programas que permiten reproducir los movimientos de la excavadora y visualizar el terreno, permitiendo un mejor control y monitoreo de las operaciones realizadas bajo agua. Tanto la grúa como la excavadora pueden realizar otros tipos de trabajos gracias al control de su posición en tiempo real. La excavadora se utilizará en el enrazado de las bases de apoyo, excavaciones, armado de talud, y verificación submarina.

Comparando los resultados de las Tablas 3.1 y 3.2 de la sección 3.2, se concluye que la excavadora es 3.9 veces más rápida que la grúa. Esto se debe a que el tiempo de ciclo de una excavadora, en general, es superior al de una grúa. En relación a la operación de los equipos, el Rover debe ser manipulado por una persona que conozca su funcionamiento y que además se encuentre fuera de la grúa, pues la pluma y la cabina generan interferencia a la señal del receptor y la libreta electrónica no recibe la información. Por lo mismo, la persona que maneje la libreta debe ser un

ayudante de topografía y debe situarse fuera de la excavadora y a menos de 50m del receptor. Se requiere además de un rigger que dirija la maniobra y del operador, requiriendo un total de tres personas, mientras que la excavadora requiere sólo del operador.

4 Contingencias

4.1 Descripción de problemas y soluciones

En esta sección se describirán los problemas más importantes que se tuvieron en obra con la excavadora PC-800, los cuales fueron mecánicos y otros relacionados con el sistema XPM.

i. Problemas mecánicos generales

Durante el desarrollo del primer semestre del 2012 la excavadora PC-800 experimentó diferentes problemas mecánicos, causando grandes pérdidas de tiempo por reparaciones. Dentro de los problemas que causaron mayores pérdidas de tiempo se encuentran los siguientes:

- a) Falla del vástago¹³ del cilindro hidráulico del stick original. Esto ocurrió debido a que la separación de las orejas del pasador que une el cilindro con el stick era insuficiente, restringiendo el movimiento del vástago. La aplicación del esfuerzo dejó de ser netamente axial, generando esfuerzos de flexión. El daño generado fue irreparable, por ende se compró un nuevo cilindro. Cabe mencionar que el puño¹⁴ del vástago (ojo) no sufrió grandes daños y es posible su reutilización. Para solucionar el problema se rebajaron los bordes de las orejas hasta que el puño del vástago pudiera realizar todo su recorrido sin topar.



Imagen 4.1: Rebaje



Imagen 4.2: Ojo del vástago original

- b) La plancha que conecta al cilindro hidráulico del grapo falló mientras se levantaban rocas. Se debe porque la plancha era muy delgada o por falta de reforzamientos. La solución fue cambiar la plancha por una de mayor espesor y colocar atiesadores para reforzarla.



Imagen 4.3: Plancha flexionada



Imagen 4.4: Cilindro hidráulico del grapo

- c) El pasador que une el stick con la pluma se atoró debido a que la salida de la engrasadora se encontraba bloqueada. Fue necesario retirar el pasador con un Porto Power¹⁵ para poder habilitar el sistema de engrasado.
- d) El ojo del vástago del nuevo cilindro hidráulico se quebró y en consecuencia también falló la rótula de su interior. El daño causado era irreparable, sin embargo se reemplazó con el puño y la rótula¹⁶ del vástago original que estaban intactos.



Imagen 4.5: Ojo de vástago fracturado



Imagen 4.6: Rótula fracturada

- e) Fallaron las soldaduras realizadas para resolver el problema anterior. Se soldó nuevamente de forma más minuciosa y se reubicación las orejas del stick debido a que el diseño estaba exigiendo al cilindro.
- f) El cilindro hidráulico del grapo se dañó al impactar directamente contra la placa de la que cuelga mientras operaba normalmente. Se fabricó un tope que limita el oscilación del grapo, evitando que la botella vuelva a dañarse.
- g) Las soldaduras del refuerzo interno de la pluma fallaron, generando un pandeo global en los vástagos de los cilindros de la pluma. Fue necesario reforzar la zona donde se encuentra el refuerzo interno, para ello se soldaron 4 planchas que atraviesan completamente la pluma (Imagen 4.7).



Imagen 4.7: Refuerzo de la pluma

- ii. Estación base no puede fijar su posición.

No es posible asignarle la posición geográfica a la estación base ya que esta indica que no coincide con su posición actual y se encuentra a 400 metros distante. Por este motivo la estación base no transmite la corrección (autobloqueo). El problema se debe que las coordenadas que se le estaban asignando eran incorrectas y luego de corregirlas la estación base comenzó a transmitir correctamente la información.

- iii. Incomunicación de la estación base con el receptor GPS en la excavadora.

El receptor de la excavadora no estaba recibiendo la señal radial que le comunica la estación base para corregir la posición, sin embargo la estación base indica que si está transmitiendo su información. Lo que sucedió es que la estación base transmitía la señal radial en una frecuencia diferente a la del receptor, de modo que se reconfiguraron a una misma frecuencia y el problema fue solucionado.

iv. Posición geográfica de la excavadora es errónea.

La posición en coordenadas UTM indicadas en el sistema XPM es incorrecta, sin embargo las coordenadas geográficas (latitud, longitud) indicadas por el receptor GPS de la excavadora si corresponden y se encuentra recibiendo efectivamente la corrección de la estación base. El origen del problema radica en la transformación de coordenadas del sistema geográfico al sistema coordenado UTM que realiza internamente el software del sistema XPM, por ende los parámetros geodésicos o los de proyección cartográfica están mal definidos en la configuración interna del programa. Se revisaron los valores uno por uno hasta encontrar que el origen de la proyección cartográfica no se encontraba bien definido ya que la coordenada Oeste se define en forma negativa en el programa y se estaban ingresando inicialmente con un valor positivo correspondiente a las coordenadas Este. Cabe destacar que esto se realiza en el "Project Configurator".

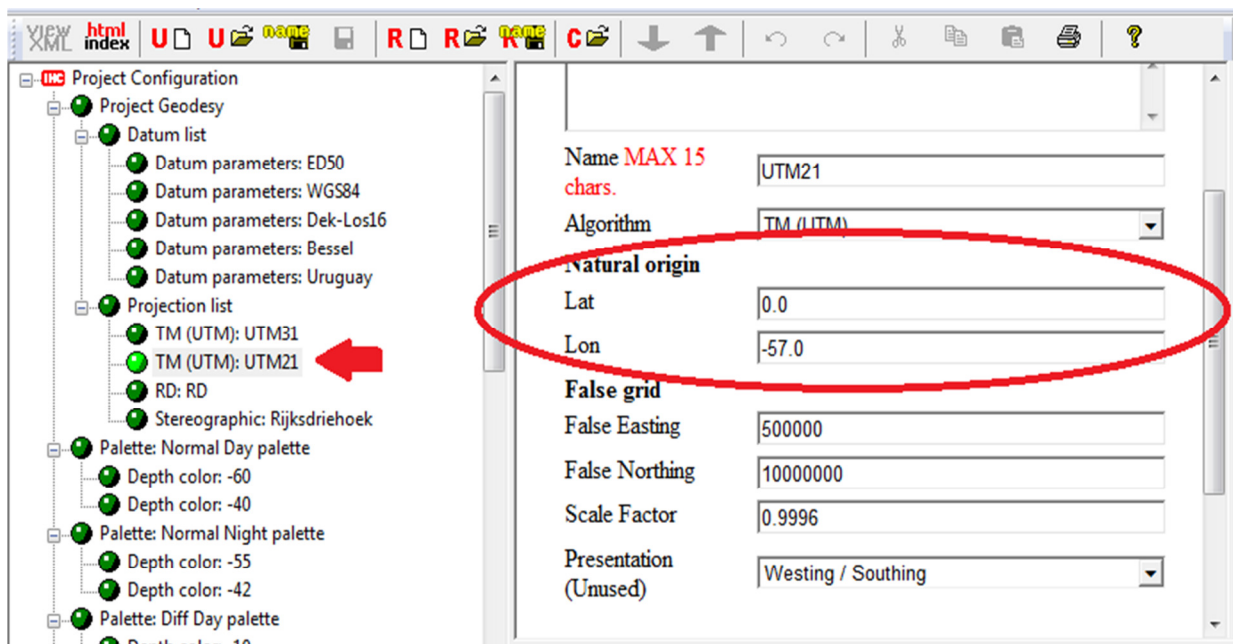


Imagen 4.8: Modificación de coordenadas del origen del sistema coordenado

v. Configuración incorrecta de las antenas en el Tool Configurator.

Cuando la cabina gira en torno a las orugas, se muestra en pantalla a las orugas girando junto a ella. Esto ocurrió debido a que las antenas se encontraban configuradas solidarias a las orugas y no a la cabina. Por lo tanto, el programa procesa la información del rumbo obtenido por las antenas receptoras instaladas en la cabina y lo considera como si fuera el rumbo de las orugas. De modo que cuando la cabina giraba, el programa interpretaba que lo estaban haciendo las orugas. Cabe indicar que la tasa de giro de la cabina era superior al de las orugas, pues se suma además el efecto de la rotación que tienen entre ambas. Para solucionar el problema es necesario cambiar la configuración del rumbo en el "Tool Configurator", asociándolo a la cabina.

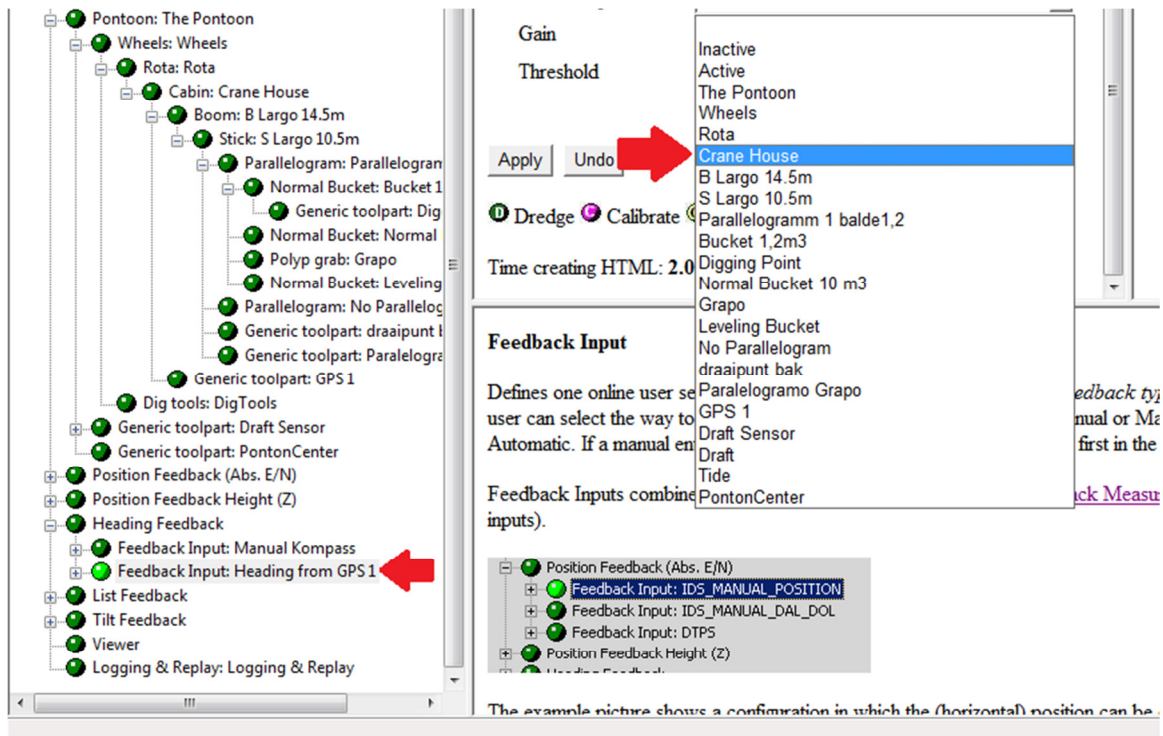


Imagen 4.9: Modificación de configuración del rumbo

vi. Configuración incorrecta de las distancias de las antenas al CRP

Cuando la cabina gira en torno al centro de rotación sin desplazar la excavadora, el centro de rotación no debe desplazarse, sin embargo este se trasladaba en forma circunferencial en la pantalla cuando se realizó una rotación completa. Inicialmente se identificó visualmente un traslado del centro de rotación cada vez se giraba la cabina, posteriormente se registraron sus coordenadas cada 90° para luego dibujarlas en Autocad y

visualizar con mayor claridad la trayectoria de su desplazamiento, formando una circunferencia casi perfecta.

El problema ocurre debido a que la posición del centro de rotación calculada por el sistema XPM no coincide con la del centro de rotación real de la excavadora, por lo tanto cuando la excavadora realiza una rotación, el centro de rotación (CRP) calculado comienza a girar con respecto al real. El cálculo de la posición realizado internamente por el sistema está relacionado con las distancias de las antenas al centro de rotación real. Ya que el centro de rotación se encuentra cubierto por la cabina y la pluma es difícil identificar y medir precisamente esas distancias, generando errores significativos y afectando directamente la precisión del sistema.

Para solucionar el problema, se tuvieron que ajustar en forma iterativa las distancias de las antenas hasta que el centro de rotación calculado coincidiera con el real. Esto se hace en el "Tool Configurator", editando las distancias entre la antena y el centro de rotación en el elemento asociado a la antena.

vii. Posible mala conexión de la antena del rumbo.

Cuando la excavadora se traslada de posición, el sistema no reconoce los cambios de dirección, pero si la reubicación. Esto ocurrió porque el rumbo de la excavadora dejó de operar correctamente, de modo que los cambios de dirección de las orugas no eran replicados por el sistema. La posición geográfica de la excavadora funcionaba correctamente, pero con un norte errado. Por lo tanto el problema se encontraba en la antena que obtiene el rumbo y no la de posición. Cabe destacar que esto fue corroborado en el receptor GPS de la excavadora, la cual identificaba correctamente la lectura de la antena de posición y en la de rumbo mostraba un mensaje "rumbo inválido".

viii. Mala conexión de la antena de posición.

El terreno presentado en pantalla desapareció (sólo es visible la excavadora) y surgió repentinamente el error "GPS está por debajo de la calidad mínima" (Figura 4.1). Esto ocurre cuando la comunicación con la estación base fue perdida, o bien cuando el GPS no capta la señal de los satélites y se pierde la ubicación geográfica de la excavadora. En este caso, el GPS indicaba que estaba recibiendo la información de la estación base, sin embargo no captaba la señal de ningún satélite y por ende no obtenía la posición geográfica. Se

concluyó que las conexiones de la antena receptora estaban sueltas, pues al mover levemente los cables, el GPS captó nuevamente los satélites, determinó su posición y posteriormente el mensaje de error desapareció. El problema fue solucionado, ajustando las conexiones del cable a las antenas y también a las del receptor.

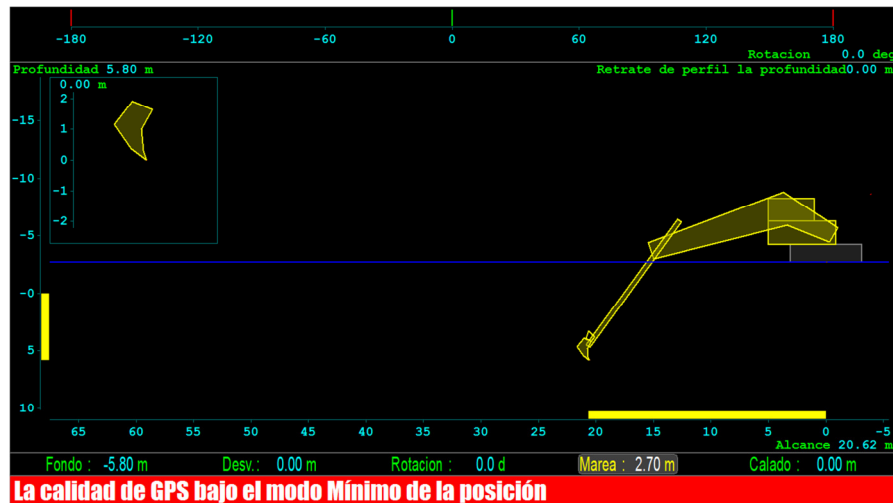


Figura 4.1: de advertencia de pérdida de señal del GPS

ix. Tarjetas internas del computador defectuosas.

Todos los sensores de ángulos (balde, stick, pluma y rotación) presentaron movimientos descontrolados en forma repentina, la posición de los elementos cambiaba a una que no correspondía de forma intermitente, retornando a la posición correcta de vez en cuando. El sistema mostró mensajes de advertencia de nuevos valores de los sensores también de manera intermitente. Debido a que todos los sensores de ángulo se encuentran asociados a un mismo conector (X4) se decidió revisarlo y se descubrieron varios cables dañados que generaron un corto circuito, dañando la tarjeta interna del computador (módulos M027 y M047). Cabe destacar que los sensores de inclinación, el botón de vertido y la posición del GPS se encontraban funcionando correctamente y debido a que sus conexiones están asociadas a una tarjeta diferente al de los sensores de ángulo, no presentaron daño.

Para resolver el problema se cambió la tarjeta por nueva, la cual estabilizó los movimientos descontrolados y los mensajes de advertencia desaparecieron. En la Imagen 4.10 se presentan los mensajes en la parte inferior de la pantalla, los cuales indican que los errores se producen en los módulos SSI, en los canales: Ch0, Ch1, Ch2 y Ch3 y que están entregando nuevos valores de bits (Nw). En la Imagen 4.11 se muestran los cables

dañados en el interior del conector X4 y en la Imagen 4.12 la tarjeta defectuosa con la de repuesto. Cabe destacar que los módulos M027 y M047 se encuentran incorporados en la misma tarjeta.

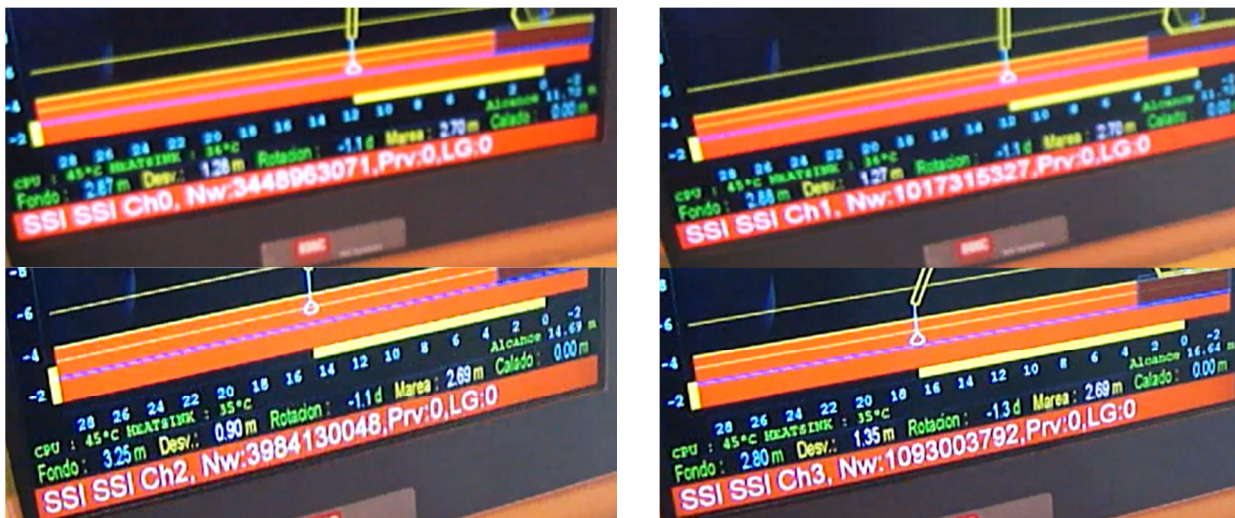


Imagen 4.10: Mensajes de advertencia de los sensores de ángulo

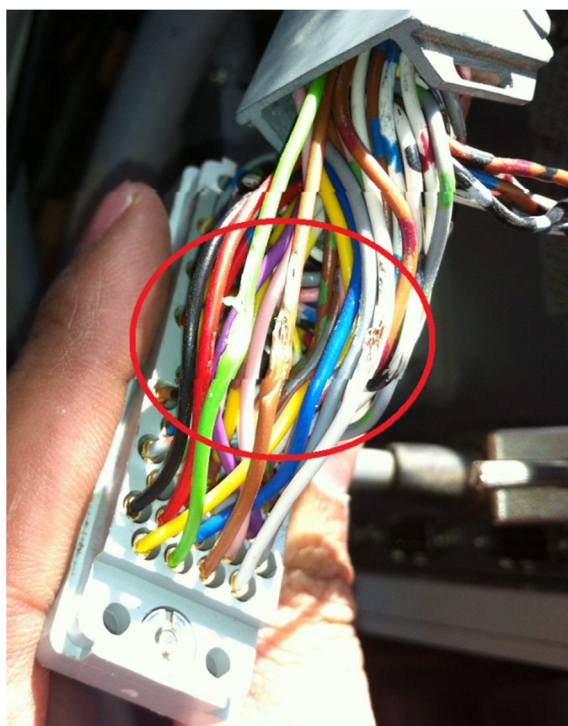


Imagen 4.11: Conector X4 dañado



Imagen 4.12: Tarjetas internas (Módulos M027 y M047)

5 Análisis económico

En esta sección se presentan los costos de los equipos de colocación de rocas correspondientes a la excavadora Komatsu PC-800 implementada con el sistema XPM y también los de una grúa Link-Belt LS-518 implementada con un Rover. Estos costos fueron proveídos por la empresa Belfi-Techint y están relacionados con la de operación de los equipos en Uruguay. En base a esta información es posible tener una referencia de cuánto vale el sistema XPM y poder compararlo con otro método de colocación de enrocado.

Para permitir la comparación se utilizarán los costos por hora de los equipos con sus respectivos sistemas. Debido a que el sistema XPM y el Rover no tienen un valor de arriendo pues fueron comprados, se considerará que su tiempo de uso coincide con la de la maquina que lo está implementando. Para efectos de cálculos se considera un valor del dólar de quinientos pesos chilenos.

5.1 Costo de la excavadora implementada con el sistema XPM

El XPM es un sistema que trabaja en forma paralela con la excavadora y por el mismo motivo se compra por separado. Debido a que es un accesorio complementario de la excavadora, es posible reutilizarlo en otras. Sin embargo, se considerará que el sistema está ligado a una sola excavadora y por lo tanto está condicionado al tiempo de utilización de la maquinaria. De modo que se considerarán las mismas horas de la excavadora para su amortización. La idea es asociarle un costo al conjunto, como un equipo

destinado a las tareas específicas de colocación de coraza, enrazado de bases y armado de talud. Para el cálculo de los costos por hora, se considera un valor residual del 20% y un total de 8000 horas para la amortización. Cabe destacar que el trabajo en rocas exige al equipo, por lo tanto se consideró un 25% adicional en los costos de reparaciones y repuestos.

A continuación se presenta en la Tabla 5.1, un resumen de los costos del sistema XPM sin considerar la excavadora. En la Tabla 5.2, se presentan los costos de la excavadora implementando el sistema XPM en pesos chilenos.

COSTO SISTEMA XPM		
	US\$	\$
XPM (sin DGPS)	180,000	90,000,000
Sistema DGPS-RTK	60,000	30,000,000
Capacitación y Start-Up	35,000	17,500,000
	\$275,000	\$137,500,000

Tabla 5.1: Costo de compra del sistema XPM

	V.COMPR \$	V.INTERNADO \$	AMORTIZ. \$/HR.	C.POSESION \$/HR.	C.OPERACION \$/HR.	TARIFA \$/HR.
RETRO.PC800 (Roca+GPS)	\$285,000,000	\$290,700,000	29070	92475	26073	118,548

Tabla 5.2: Costo excavadora implementando el sistema XPM

El valor internado de la excavadora considera el arancel aduanero, los gastos de internación y el impuesto al valor agregado. Para calcular la amortización se utilizó el 80% del valor internado, considerando que se tiene 20% de valor residual y luego se dividió por la cantidad total de horas de uso destinados a la excavadora. El costo de posesión se calcula utilizando al costo de amortización, los efectos del interés de capital anual, seguros, reparaciones y respuestos. Mientras que los costos de operación incluyen los gastos de combustible, lubricantes y del operador. Finalmente la Tarifa es calculada sumando los costos de posesión y operación.

5.2 Costo de la grúa implementada con sistema Rover

De forma similar a lo explicado en la sección 5.1, el Rover es un DGPS-RTK que trabaja en forma paralela a la grúa y también se compra por separado. De hecho, es un instrumento que se utiliza para otras labores de topografía y que se está implementando en forma improvisada para la colocación de

rocas. También se considerará al conjunto grúa-Rover como un equipo destinado a la tarea específica de colocación de coraza, por ende se considerará la duración del sistema GPS está asociado con el total de horas de uso de la maquinaria. En consecuencia se considerarán la misma cantidad de horas para su amortización. Para los cálculos se considerará un valor residual del 20% y un uso del equipo de un total de 18.000 horas.

El sistema Rover de la grúa (receptor GPS y estación base) cuesta US\$25.000.

Se presentan en la Tabla 5.3 los costos del conjunto grúa y sistema GPS (Rover y estación base).

	V.COMPRA \$	V.INTERNADO \$	AMORTIZ. \$/HR.	C.POSESION \$/HR.	C.OPERACION \$/HR.	TARIFA \$/HR.
GRUA LINK BELT LS-518 (GPS)	\$362,500,000	\$369,750,000	16433	47310	31533	78,844

Tabla 5.3: Costo grúa implementando el sistema GPS

Los costos de la grúa fueron calculados con las mismas consideraciones que para la excavadora presentada previamente en la sección 5.1.

5.3 Comparación de costos

Comparando solamente los costos de ambos modos de control de colocación de enrocados (sin considerar maquinarias) se observa que el sistema XPM cuesta 11 veces más que el Rover. Considerando que estos sistemas están asociados a las maquinarias como un solo equipo destinado a la colocación de rocas, los costos del sistema XPM implementado en la excavadora son 1.5 veces mayores que los de la grúa. Sin embargo, aún no se ha considerado el rendimiento que tienen ambos equipos, los cuales son de vital importancia pues determinan la cantidad de horas que se requieren utilizarlos.

Teniendo en cuenta que el rendimiento de la excavadora es aproximadamente cuatro veces superior al de la grúa, esta última requiere de cuatro veces más horas que la excavadora para poder realizar el mismo trabajo. Bajo el argumento de que ambos equipos tienen una misma cantidad de trabajo por realizar, el costo de la grúa debe ser amplificado por

cuatro para poder hacer una comparación considerando el rendimiento de los equipos. En dicho caso se concluye que la grúa implementada con el Rover tiene un costo 2.7 veces mayor que la excavadora con el sistema XPM.

6 Conclusiones y Comentarios

Los modelos y sistemas de posicionamiento de maquinarias se están volviendo cada vez más comunes en el rubro de la construcción ya que permiten controlar y mejorar la productividad de los trabajos realizados. Existen varias empresas que proveen estos modelos y sistemas de posicionamiento, los cuales se diseñan para distintas maquinarias y funciones. Todos estos sistemas emplean el uso del GPS y sensores para posicionar y modelar con gran precisión al equipo, de esta manera pueden realizar trabajos de gran extensión, independiente de topografía y en forma eficiente pues se puede trabajar con tolerancias bajas.

Se encuentran disponibles varios sistemas de posicionamiento para excavadoras, los cuales funcionan en forma similar, pero que están orientados a realizar distintos trabajos terrestres. Debido al control y a la precisión de los sistemas de posicionamiento, los equipos pueden realizar otros trabajos para los cuales no están diseñados inicialmente. Siempre es posible adaptar los sistemas de posicionamiento con nuevos sensores e instrumentos, de este modo es posible ampliar las funciones que se requieran.

En particular, el XPM (eXcavator Position Monitor) es un sistema de posicionamiento de una excavadora que está diseñado específicamente para labores de dragado, permitiendo trabajar con tolerancias bajas, evitando tener que hacerlo en base a estimaciones o realizar extensivas inspecciones o actividades de verificación. La capacidad de control y precisión del sistema XPM permite que pueda utilizarse en otros trabajos submarinos como la colocación de corazas, enrazado de bases granulares, armado de talúd de un rompeolas y en actividades de verificación.

6.1 Aplicación del sistema XPM según la metodología de construcción empleada.

6.1.1 Enrazamiento de bases de apoyo

El sistema XPM está diseñado para realizar excavaciones bajo el mar, sin embargo también permite dirigir con exactitud el enrazado del material que se encuentra bajo agua y sin visibilidad. Para ello el sistema visualiza la posición del balde, el terreno de fondo y la cota a la cual se desea enrazar, permitiendo al operador tener un control de los movimientos de la excavadora y poder visualizar el terreno del fondo sin necesidad de tener guías externas ni de una verificación constante del trabajo realizado. En las pruebas realizadas en terreno el equipo demostró poder enrazar correctamente, sin embargo es posible mejorar las metodologías empleadas para mejorar rendimientos y precisión. El sistema XPM permite que la excavadora trabaje en cualquier posición pues tiene un control completo de la excavadora y no es necesario que se trabaje según el procedimiento explicado en la sección 3.1.5, el cual consiste en un enrazado en base a un traslado de la excavadora.

6.1.2 Colocación de coraza

Con respecto a la colocación de protecciones costeras (coraza), el sistema XPM demuestra ser fundamental en el desarrollo del proyecto pues permite una colocación rápida, segura y precisa de las rocas. Gracias a que el sistema permite realizar actividades de verificación y guardar registros del trabajo realizado, es posible determinar en forma segura si la colocación de material se hizo correctamente.

Según el comportamiento observado en terreno, la excavadora implementada con el sistema XPM es capaz de colocar 50ton/hr con una precisión de 20cm en el plano horizontal y de 1cm en la vertical requiriendo solo del operador para realizar el trabajo. El rendimiento obtenido es solamente un indicador, pues los datos fueron registrados cuando se estaba implementando en terreno por primera vez. Es posible que las metodologías sean mejoradas en el transcurso del tiempo y en consecuencia los rendimientos cambien.

Comparando los costos del sistema con un método de colocación de coraza tradicional, se aprecia que el costo por hora de la excavadora con el sistema XPM es mayor que la de una grúa con GPS. Sin embargo, considerando que la grúa tiene un rendimiento menor y que no cuenta con la capacidad de verificación, el costo para realizar un mismo trabajo es casi tres veces superior al de la excavadora implementada con el XPM. Estos costos son a modo de referencia, pues existe un gran rango de precios de grúas y

excavadoras y los costos presentados se limitan en forma particular a los valores obtenidos de la construcción del terminal portuario en Punta Pereira.

6.2 Consejos y Recomendaciones

- i. Se recomienda tener una persona en terreno que tenga los conocimientos del software del sistema XPM y del GPS. Debe ser capaz de configurar y calibrar el sistema e identificar y resolver los posibles problemas relacionados con la configuración y funcionamiento del equipo.
- ii. Disponer de una persona con experiencia en electrónica para determinar con exactitud los problemas relacionados específicamente con los sensores y del funcionamiento eléctrico.
- iii. El operador de la excavadora no es necesario que tenga conocimientos de computación, sin embargo, un conocimiento básico le facilitaría el uso del programa (circular por las opciones, calibración y realizar respaldos).
- iv. Se recomienda utilizar instrumentos de precisión para realizar las mediciones de las longitudes y distancias de las partes de la excavadora.
- v. Localizar las pantallas donde se tenga completa visibilidad y configurar correctamente los colores de la visualización para que se distingan unos de otros y evitar confusiones.
- vi. Para efectos de calibración y verificación, el uso de un GPS móvil es de gran ayuda debido a que permite comparar las coordenadas calculadas por el sistema XPM y compararlas con las del GPS móvil.
- vii. Se recomienda diseñar el proyecto de manera eficiente en el programa de diseño del sistema XPM ya que el computador tiene pocos recursos y el tiempo de procesamiento puede ser de varios minutos.

6.3 Evaluación de su uso en Chile

El sistema XPM ha demostrado ser una herramienta fundamental durante su aplicación en la construcción del muelle de la planta de celulosa. En comparación con los otros equipos presentes, la colocación de protecciones costeras es significativamente más rápida y eficiente utilizando la excavadora con el sistema XPM implementado.

Las condiciones de turbiedad y la escasa visibilidad del Río de la Plata hacen conveniente el uso del sistema XPM, pues este tiene la capacidad de visualizar el entorno de trabajo y de verificar y registrar el trabajo realizado sin visión directa del equipo. En Chile son casos puntuales en los cuales se tienen condiciones similares de turbiedad, sobretodo en la zona sur de Chile debido a que los ríos transportan gran cantidad de material en suspensión. En estos casos el sistema XPM resulta ser un equipo de gran ayuda pues es una solución para el trabajo sin visión y además asegurar que el trabajo esté bien hecho. En la zona Norte la situación es diferente por la falta de ríos y la colocación del enrocado es posible realizarla sin el sistema XPM pues se tiene visibilidad de las rocas, sin embargo la eficiencia del sistema es superior a la de los métodos utilizados convencionalmente y no requiere de una supervisión constante de buzos para verificar el trabajo realizado.

La topografía de las costas chilenas, en general, hace que se requiera poco dragado en las obras marítimas ya que basta con adentrarse pocos metros para alcanzar una gran profundidad y, en consecuencia, la aplicación del sistema XPM puede ser cuestionada. Sin embargo, la sedimentación en la mayoría de los muelles resulta un problema habitual y se deben estar realizando dragados de mantención en forma constante. El hecho de que la excavadora puede situarse sobre el muelle ya construido hace indicado el uso de este equipo implementado con el sistema XPM para realizar dragados de mantención, especialmente en nuestro país donde tenemos gran cantidad de puertos.

Las funciones que desempeñan los sistemas de posicionamiento para maquinarias de construcción pueden ser ampliadas y es posible utilizarlo en distintos rubros donde se tenga interés. En la minería interesa utilizar estos sistemas pues permiten posicionar con gran precisión la maquinaria y sus herramientas de su trabajo. Estos sistemas son de gran ayuda para poder controlar en forma remota el trabajo de los equipos bajo tierra. Ya que el GPS no puede funcionar bajo tierra debido a que la comunicación con los satélites es interferida por el terreno, se han desarrollado otros sistemas de posicionamientos diseñados específicamente para trabajos bajo tierra y de minería como el UGPS (Underground GPS) o el UPS (Underground Positioning Systems). Sin duda los modelos y sistemas de posicionamiento para maquinarias expandirán su funcionalidad para poder ser utilizados en forma remota y emplearlos en la minería chilena.

7 Glosario

- 1) Rover: Se le llama al conjunto receptor GPS y libreta electrónica. Permite recibir y procesar la información de los satélites para determinar la posición. Si se encuentra conectado a una estación base puede obtener su posición en base a DGPS-RTK.
- 2) DGPS-RTK (Differential Global Positioning System – Real Time Kinematic): Es una mejora del sistema de posicionamiento global (GPS) que ofrece una mayor precisión de la posición. También se le conoce como GPS diferencial. Se le llama RTK, porque las correcciones las efectúan en tiempo real, a diferencia del post-proceso.
- 3) Grapo (Grapple): Herramienta de la excavadora con forma de garra que permite coger y depositar rocas (Figura 7.1).



Imagen 7.1: Grapo

- 4) DTM (Digital Terrain Model): Es un modelo topográfico de la superficie del terreno sin considerar otros elementos como vegetación o estructuras, el cual puede ser manipulado por programas computacionales. Los archivos contienen información de la elevación del terreno en un formato digital, que usualmente es presentado como una grilla rectangular.
- 5) CRP (Center Rotation Point): El centro de rotación es un punto teórico ubicado justo en el centro del eje de rotación de la excavadora (Figura 7.1)
- 6) Stick: El stick es parte del brazo de la excavadora, el cual está conectado en un extremo con la pluma y el otro con el balde. En Chile también se le conoce como "Ataque" (Figura 7.1).
- 7) Transductores: Un transductor es un dispositivo capaz de transformar o convertir un determinado tipo de energía de entrada a otra diferente de

salida, Un sensor por definición es un transductor que transforma un tipo de energía de entrada a corriente eléctrica.

8) Cabina: Estructura superior de la excavadora (Figura 7.1).

9) Encoder: Sensor que detecta giro.

10) Paralelogramo: Conjunto entre las varillas de acero del sensor de giro del balde y la biela que es empujada el cilindro hidráulico, los cuales conforman un paralelogramo (Imagen 7.2).



Imagen 7.2: Paralelogramo

11) Cuerpo central (carbody): Corresponde a la estructura inferior de la excavadora, a la cual se conectan las orugas (Figura 7.1) y en su parte superior la cabina.

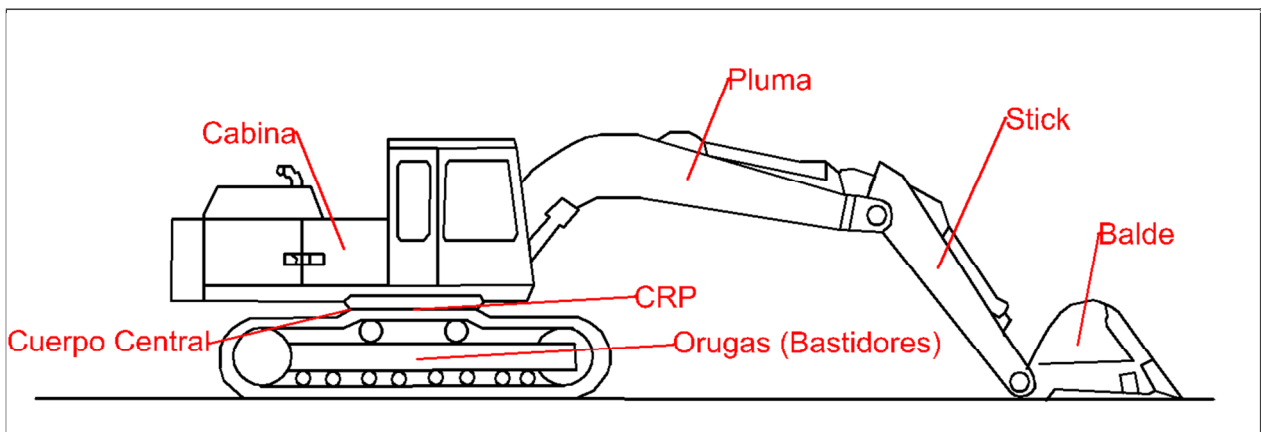


Figura 7.1: Partes de una excavadora

- 12) Pasador: Se referirá al pasador como el elemento de acero que se encuentra en las articulaciones del brazo de la excavadora que impide la separación de los elementos, pero que permite su giro.



Imagen 7.3: Pasadores

- 13) Vástago: Elemento de un cilindro hidráulico que le transfiere la fuerza al pistón. (Figura 7.2).
- 14) Puño (ojo) del vástago: Parte del vástago que se conecta con el elemento que realiza la fuerza (Figura 7.2).
- 15) Porta Power: herramienta que cumple un rol similar al de una gata hidráulica.
- 16) Rótula: Elemento interno del ojo del vástago que permite la transferencia de esfuerzos axiales del pasador al cilindro hidráulico. Además permite leves movimientos del pasador en el sentido transversal, para no dañar directamente el vástago. También se conoce como buje (Figura 7.2).

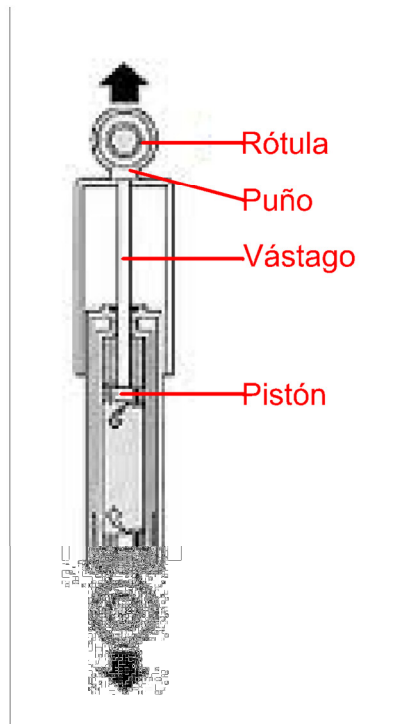


Figura 7.2: Partes del cilindro hidráulico

8 Bibliografía

- i. Sistema de Posicionamiento Global (GPS).
http://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_posicionamiento_global
- ii. José Antonio E. García Álvarez. GPS diferencial (DGPS).
http://www.asifunciona.com/electronica/af_gps/af_gps_13.htm
- iii. IHC Merwede. IHC Systems, "Dedicated to Efficient Dredging".
 Información general del producto (XPM system).
- iv. IHC Merwede (2004). "Manual for IHC SYSTEMS' XPM (NG), Excavator
 Position Monitor (New Generation)".
- v. Jorge Gorriti Rey(2006) "Manual del Estudiante, Instrucción Técnica
 Excavadora 320C".

Anexo A: Explicación general del sistema GPS

El GPS es un sistema que permite conocer la posición geográfica de un punto y consta de tres elementos principales: los satélites, los receptores y el control terrestre. Para su funcionamiento, existe una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta Tierra mediante los cuales el receptor triangula su posición, calculando las distancias a los satélites. Se requieren al menos cuatro satélites para conocer la posición, ya que con un satélite el receptor interpreta que puede estar en cualquier posición alrededor de él, conformando una esfera. Con la información de dos satélites el receptor interpreta que se puede encontrar en cualquier posición de la intersección entre ambas esferas (anillo). Con la información de un tercer satélite el GPS puede determinar la posición de uno o dos puntos. Por este motivo se requiere un cuarto satélite para poder determinar finalmente cual punto es el correcto. En las Figuras 1, 2 y 3 se puede observar en forma gráfica la triangulación de la posición.

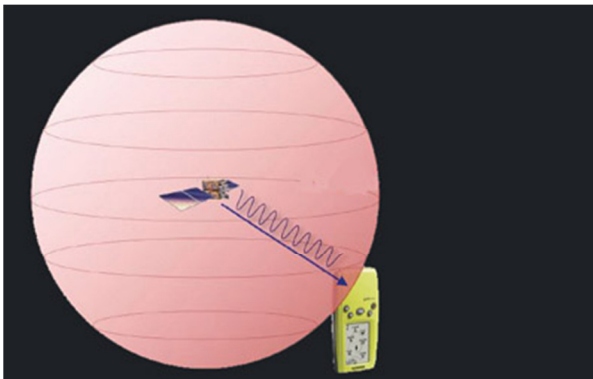


Figura 1: Información de un satélite

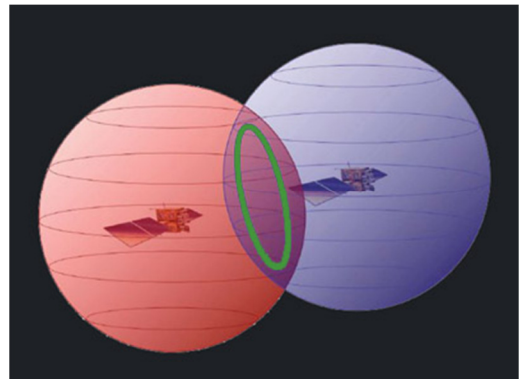


Figura 2: Información de dos satélites

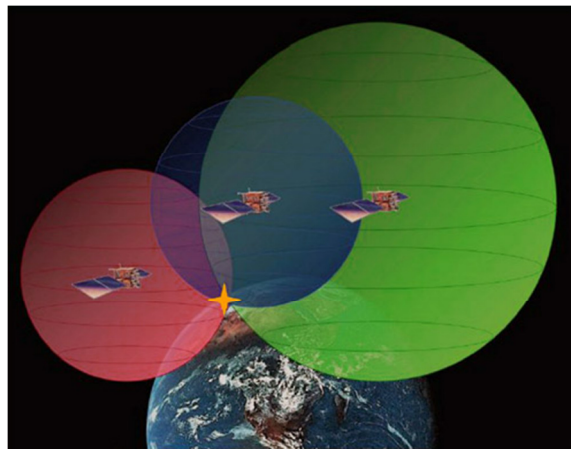


Figura 3: información de tres satélites y determinación de posición final

En la práctica los receptores trabajan con la información de 8 o 10 satélites para obtener precisiones del orden de 15 metros. El error en el cálculo de la posición debido a factores externos, entre los más importantes se encuentra la Ionósfera, Efemérides y los errores locales del reloj del GPS.

Debido a que en muchas actividades se requiere una precisión sub-métrica, se han buscado métodos para mejorar la precisión. Uno de esos es el sistema GPS diferencial (DGPS), el cual consiste en instalar otro GPS (estación base) en una coordenada previamente identificada para determinar el error que tiene el cálculo de la posición del sistema GPS con respecto a la coordenada conocida. De manera que puede corregir la posición de cualquier otro equipo GPS que se encuentre en la cercanía. No es recomendable que la estación base y el receptor GPS no deben encontrarse separados por mucha distancia ya que deben captar los mismos satélites para que la corrección sea efectiva.

La corrección del sistema DGPS se puede hacer en tiempo real, a través de comunicación por radio. A este método se le conoce como RTK (Real Time Kinematic). También es posible realizar las correcciones en tiempo diferido, procesando la información posteriormente, llamado Post-proceso.

Anexo B: Manual del Operador

Uso del sistema XPM (eXcavator Position Monitor)

Manual Básico del Operador



Autor:	Renato Humberto Vargas Diaz
Revisión	A
Última modificación	12/07/2012

Índice

1	Encender y apagar el sistema XPM.	108
1.1	Encendido y ejecución del sistema XPM.....	108
1.2	Apagado del sistema XPM.....	111
1.3	Problemas y Soluciones.....	115
2	Cargar y respaldar un proyecto	117
2.1	Cargar un proyecto.....	117
2.1.1	Cargar un proyecto nuevo	117
2.1.2	Cargar el respaldo de un proyecto	122
2.2	Respaldar un proyecto	124
3	Calibración operacional	125
4	Selección de herramientas	129

1 Encender y apagar el sistema XPM.

1.1 Encendido y ejecución del sistema XPM.

Se presenta a continuación el procedimiento de encendido del sistema XPM (eXcavator Position Monitor). Cualquier problema que se tenga en alguno de estos pasos, ver el capítulo 1.3 de Problemas y Soluciones de este mismo manual.

- a) Encender el motor de la excavadora.
- b) Encender la fuente de poder del sistema girando la perilla en sentido anti-horario de "0" (Off/Apagado) a "1" (On/Encendido). (Ver Imagen 1.1).



Imagen 1.1

- c) Encender el inversor colocando el switch en "On" (Encendido) y verificar que la luz de la opción "inverter on" (Inversor encendido) esté prendida. Confirmar que el inversor no tenga encendida ninguna otra luz (Ver Imagen 1.2 y 1.3). En caso de que se enciendan las otras luces, ver sección 1.3.a.



Imagen 1.2



Imagen 1.3

d) Conectar la llave (dongle) al computador. (Ver Imagen 1.4). Este paso puede omitirse si ya está conectada.



Imagen 1.4

- e) El computador debería comenzar en forma automática. En caso de que este no sea el caso, encender el sistema XPM presionando el botón de encendido/apagado (Ver Imagen 1.5). Si el sistema todavía no arranca, ver la sección 1.3.b.

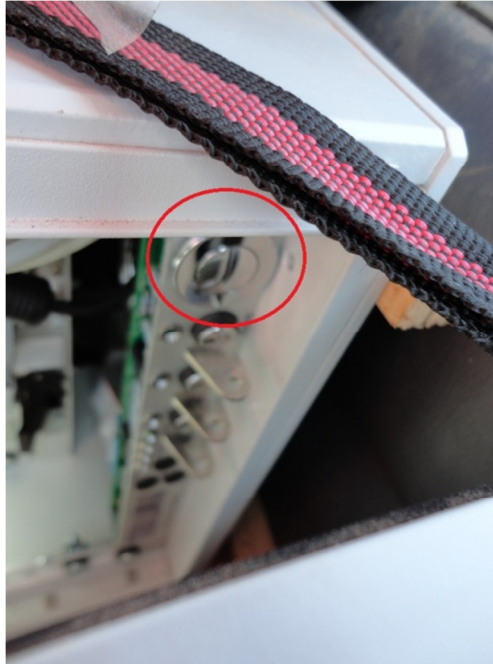


Imagen 1.5

- f) Las pantallas se prenderán en forma automática al encender el inversor, las luces verdes indican que están encendidas. En caso de que no se encienda en forma automática presionar el botón de encendido/apagado de las pantallas (Ver Imagen 1.6 y 1.7). Si todavía no aparece iluminada la luz verde ver la sección 1.3.c.



Imagen 1.6



Imagen 1.7

- g) Esperar a que cargue el programa en forma automática. En caso contrario, revisar la sección 1.3.d.

1.2 Apagado del sistema XPM.

Se presenta a continuación el procedimiento a seguir para poder apagar en forma segura el sistema XPM.

- a) Presionar la tecla "Esc" (Escape) en cualquiera de los dos teclados (Ver Imagen 1.8 y 1.9).



Imagen 1.8



Imagen 1.9

- b) Aparecerá una ventana que dice "Terminate application" (Terminar Aplicación) como se muestra en la Imagen 1.10.

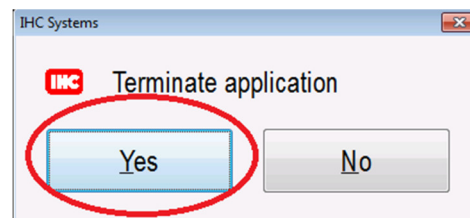


Imagen 1.10

Para circular a través de las opciones, se pueden utilizar cualquiera de los dos teclados o el mouse (ratón). En el caso de los teclados presionar

los botones direccionales (flechitas) indicados en las imágenes 1.11 y 1.12 para seleccionar las opciones.



Imagen 1.11

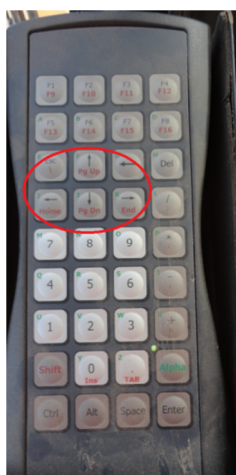


Imagen 1.12

Seleccionar la opción "Yes" (Si) mostrada en pantalla y presionar el botón "Enter" (Ver Imagen 1.13 y 1.14).



Imagen 1.13



Imagen 1.14

En forma alternativa se puede colocar el cursor del mouse sobre la opción "Yes" (Ver Imagen 1.15) y presionar el click izquierdo (Ver Imagen 1.16). Si no aparece la Imagen 10 al presionar la tecla "Esc" (Escape), consultar la sección 1.3.e.

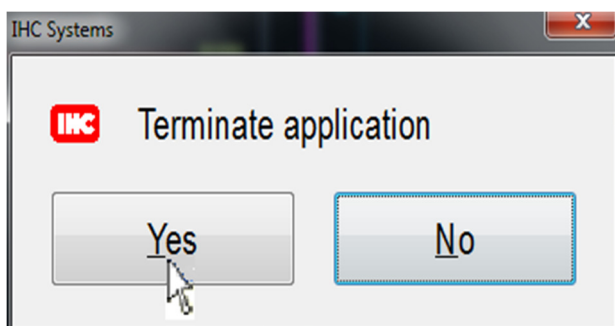


Imagen 1.15



Imagen 1.16

c) Aparecerá una nueva ventana que dice "Also Shutdown Windows?" (¿También cerrar Windows?). Seleccionar la opción "Yes" (Si) (Ver Imagen 17).

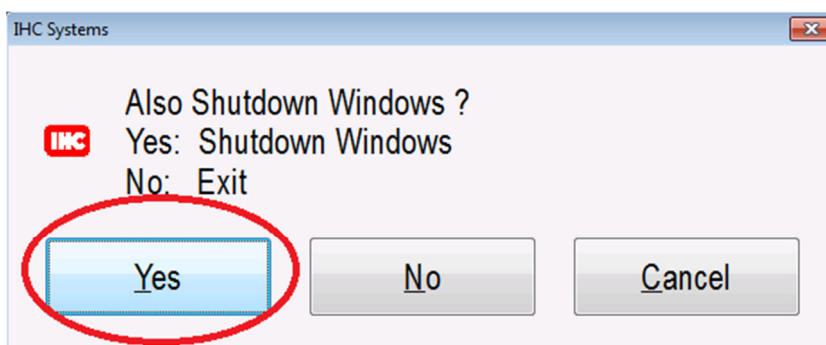


Imagen 1.17

- d) Esperar a que el sistema esté listo para apagarse (Ver Imagen 18) y luego Apagar la fuente de poder girando la perilla en sentido horario de "1" (On/Encendido) a "0" (Off/Apagado) (Ver imagen 1.19).



Imagen 1.18



Imagen 1.19

- e) Apagar el inversor colocando el switch en "Off" (Apagado). (Ver Imagen 1.20 y 1.21).



Imagen 1.20



Imagen 1.21

f) Apagar el motor de la excavadora.

1.3 Problemas y Soluciones

A continuación se presentan los principales problemas y soluciones que puedan surgir al iniciar y finalizar el sistema XPM.

- a) Se encienden otras luces en el inversor: "overload", "low battery" o "high temperature". Cualquier otra luz diferente a la del "inverter on" es una señal de advertencia y en ningún caso se debe encender el sistema XPM. Si está encendida la luz "overload" (Sobrecarga eléctrica) debe verificarse que la energía de entrada sea de 24V. La luz "low battery" (Batería baja) indica que está por acabarse la energía de la batería de la excavadora, se debe recargar para poder continuar. La luz "high temperature" (alta temperatura) indica que el inversor está muy caliente, se debe esperar a que se enfríe.
- b) El sistema XPM no enciende al presionar el botón de encendido/apagado. Debe verificarse que tanto el motor (sección 1.1), la fuente de poder (sección 1.2) y el inversor (sección 1.3) estén encendidos. En caso de que estén apagados, se deben encender en el mismo orden indicado en el procedimiento.
- c) Las pantallas no encienden y no muestran imagen. Verificar que el sistema XPM esté encendido. En caso de que el sistema XPM esté funcionando, verificar que los cables estén bien conectados a las pantallas y a la parte trasera del sistema XPM.

- d) El sistema no comienza automáticamente. Si el sistema no comienza y la pantalla se muestra como en la Imagen 16, se debe arrastrar el cursor con el ratón y hacer dos clicks en el ícono que dice "Digisys Digiviewer" (Ver Imagen 17) y esperar a que el sistema comience.



Imagen 1.22

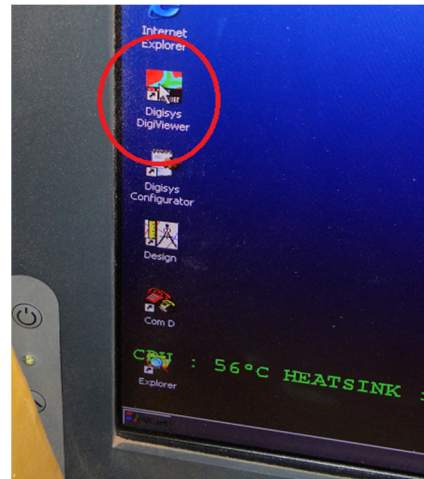


Imagen 1.23

- e) Al presionar la tecla "Esc" (Escape) no aparece la ventana para salir del programa. Verificar que ambos teclados estén bien conectados. Si el teclado numérico no está respondiendo, ver que el botón "alpha" no esté activado y que su luz esté apagada (Ver imagen 18 y 19).



Imagen 1.24

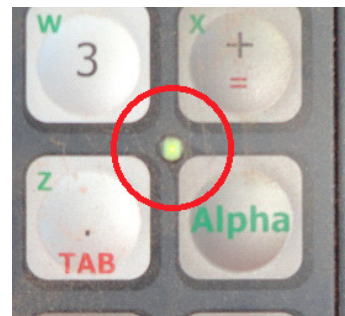


Imagen 1.25

2 Cargar y respaldar un proyecto

El proyecto en el sistema XPM está relacionado con todo lo que son los dibujos y representaciones del terreno. Tanto las excavaciones hechas, el estado actual del terreno, el perfil teórico y las marcas de vertido están relacionadas con el proyecto en sí. Las configuraciones de los distintos elementos (boom, stick, baldes, grapos, etc....) se encuentran relacionados con las "configuraciones" y es algo totalmente a parte. Es por esta misma razón que se tienen que hacer dos respaldos diferentes, uno para proyecto y otro para configuración. Los respaldos de Proyecto se llaman "Project" y los de configuración "XPM".

Hacer un respaldo del proyecto es fundamental debido a que queda guardado el trabajo realizado durante el día ante cualquier eventualidad que pueda ocurrirle al programa y perder información. Por este motivo se aconseja a realizar uno o dos respaldos diarios para que la pérdida de información no sea muy grande, pero tampoco es bueno hacer demasiados respaldos, pues se genera mucha información innecesaria. Se presenta a continuación una explicación básica e ilustrativa de cómo debe cargarse un proyecto y hacer un respaldo.

2.1 Cargar un proyecto

Se pueden cargar de dos maneras diferentes un proyecto, la primera es cargar uno nuevo y la segunda es cargar un proyecto respaldado. Ambas maneras se hacen de forma diferente, en esta sección se explicará paso a paso como debe hacerse.

2.1.1 Cargar un proyecto nuevo

- a) Presionar la tecla "F1" en cualquiera de los dos teclados.
- b) Ubicar el puntero del ratón en la opción "Proyecto" y presionar un click. También es posible hacerlo seleccionando la opción con las flechas del teclado hasta que la opción "Proyecto" se encuentre remarcada (Imagen 2.1).

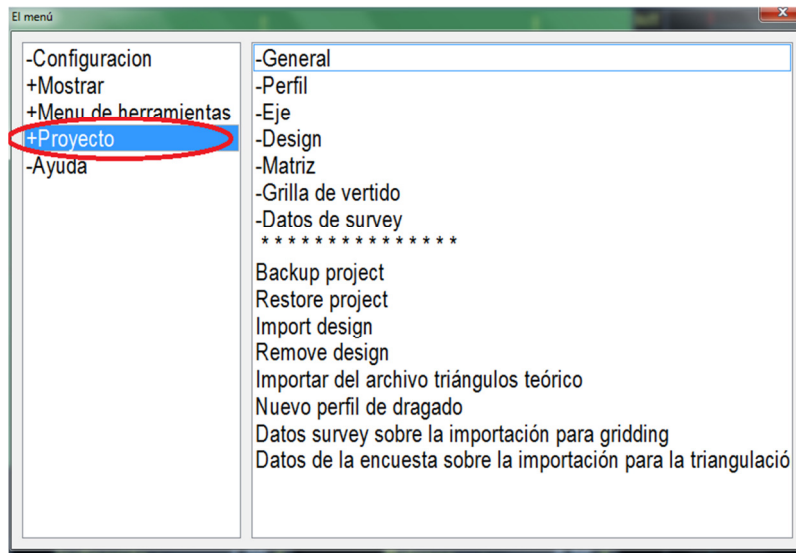


Imagen 2.1

- c) Utilizar el ratón (mouse) o el teclado y hacer dos clicks en “Importar del archivo triángulos teóricos” (Imagen 2.2).

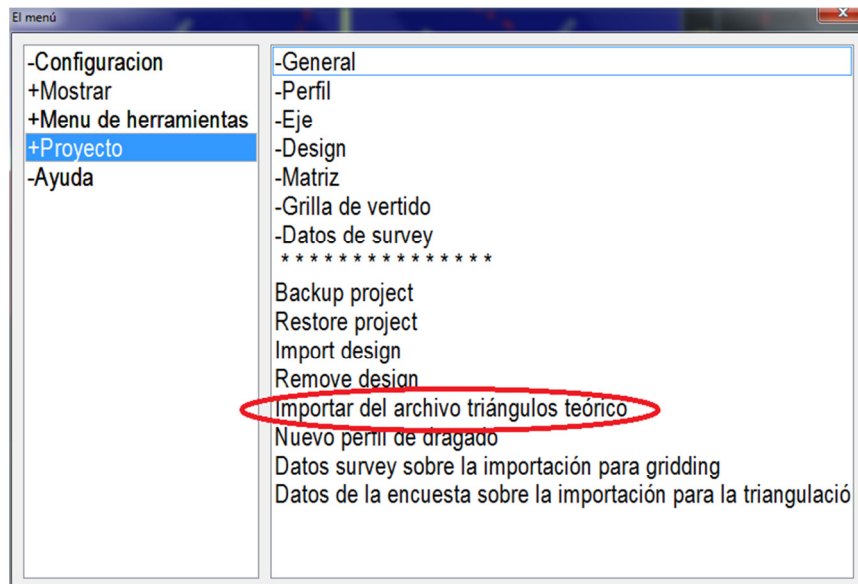


Imagen 2.2

- d) Seleccionar el archivo correspondiente y luego hacer click en “Abrir” (Open) (Imagen 2.3). Aparecerá una nueva ventana, presionar “Si” (Yes) (Imagen 2.4). Los archivos se encuentran guardados en el disco D: en la carpeta Coraza en caso de colocar coraza o armar taludes de filtro y núcleo, o bien en la carpeta de Rip Rap si se desea armar el talud de Rip-

Rap. En la Imagen 2.3 se escogió a modo de ejemplo el archivo "Coraza3.raw"

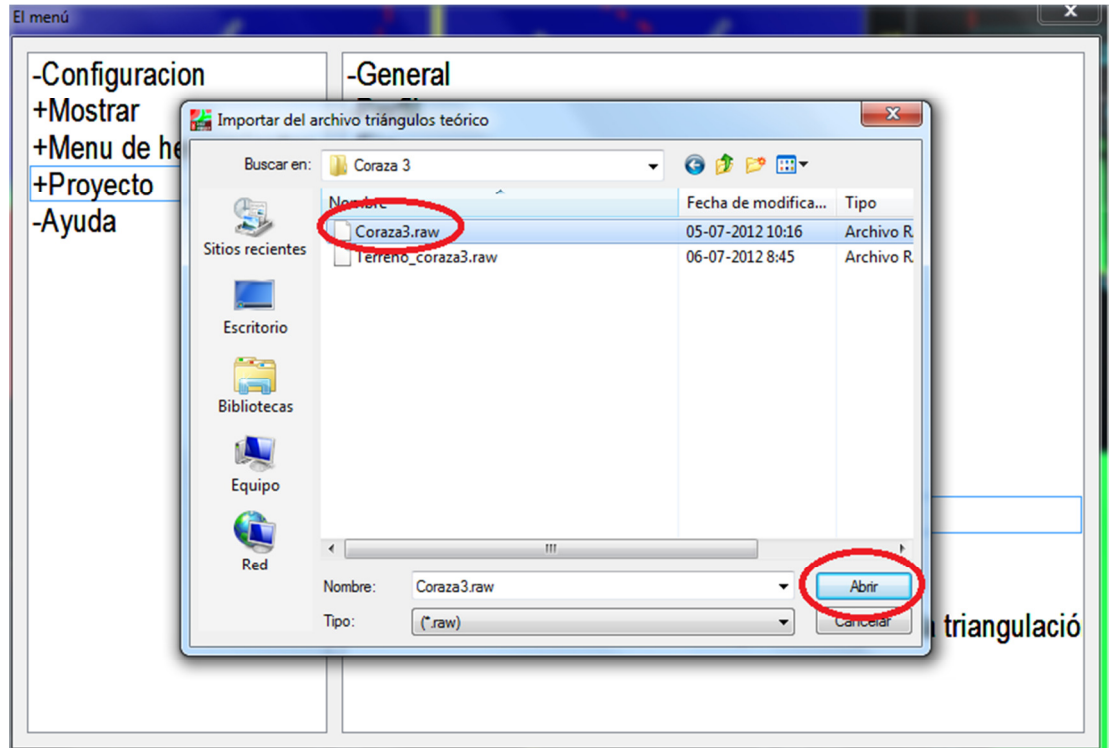


Imagen 2.3

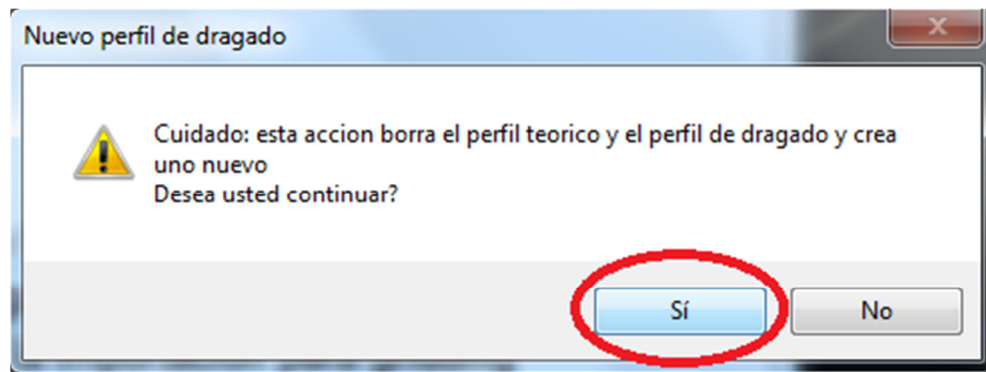


Imagen 2.4

e) Para que el proyecto sea visible debe cargarse el perfil de dragado. Presionar la tecla "F1", hacer un click en Proyecto (Imagen 2.5) y luego hacer dos click en "nuevo perfil de dragado" (Imagen 2.6). Aparecerá una nueva ventana, presionar "Si" (Imagen 2.7).

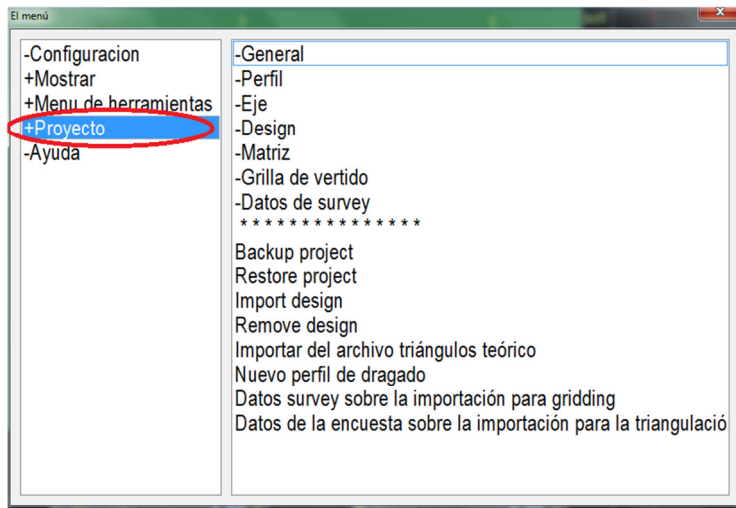


Imagen 2.5

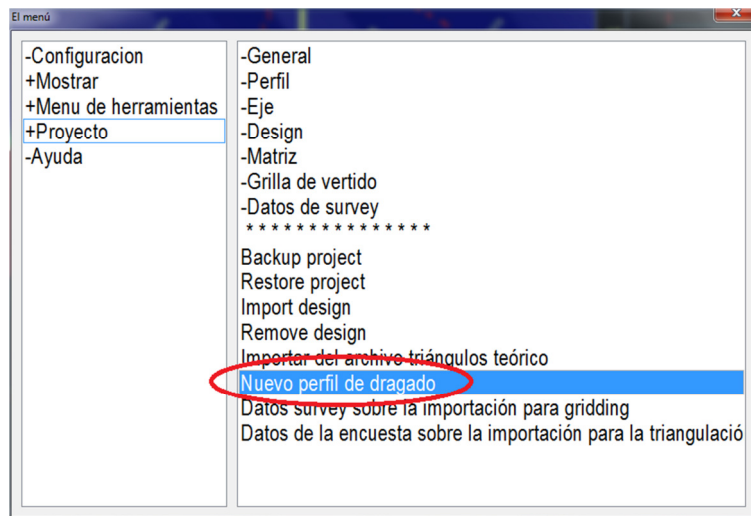


Imagen 2.6

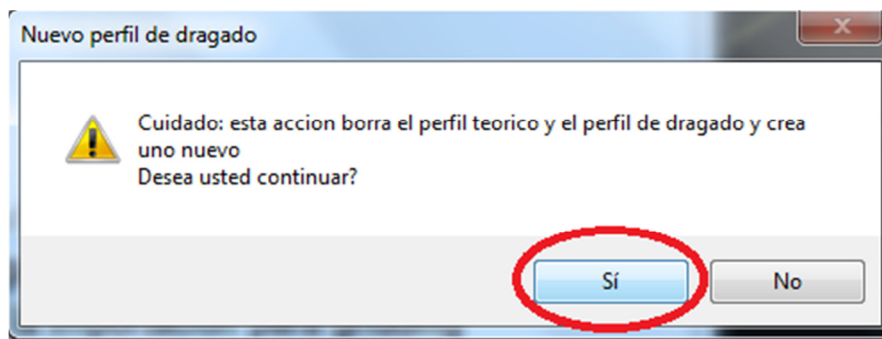


Imagen 2.7

f) Si se desea colocar rocas se debe cargar el perfil de dragado (fondo marino) presionando el botón "F1", click en Proyecto (Imagen 2.8) y luego dos clicks en "Datos survey sobre la importación para gridding" (Imagen

2.9), luego seleccionar el nombre del archivo que se encuentra en el disco D:, tal como se muestra en la Imagen 2.10 (por ejemplo Terreno_coraza3.xyz), seleccionar "Abrir (Open)" y luego seleccionar "NO" en la ventana surgente (Imagen 2.11). Cabe destacar que los perfiles para la coraza, núcleo y filtro se encuentran dentro de la carpeta "Coraza" en el disco D: En el caso de Rip Rap, los perfiles se encontrarán en la carpeta Rip-Rap.

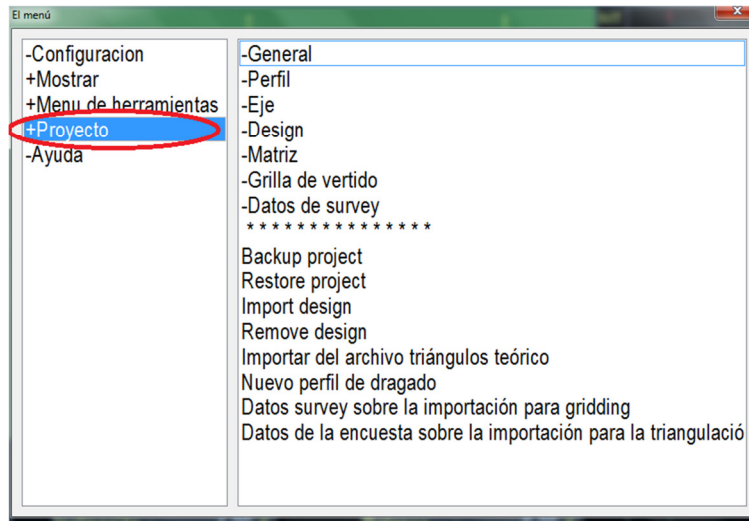


Imagen 2.8

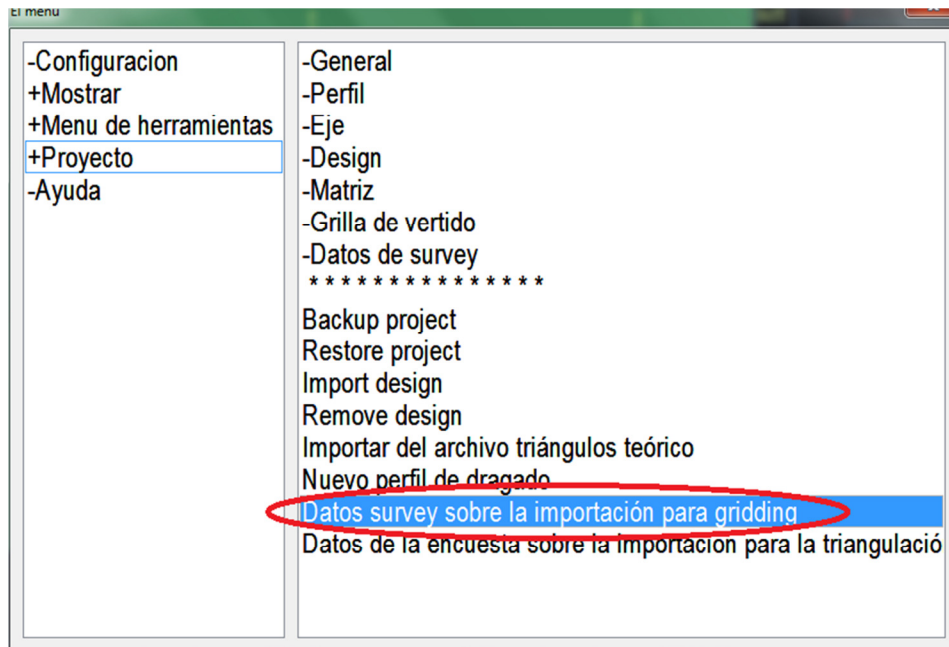


Imagen 2.9

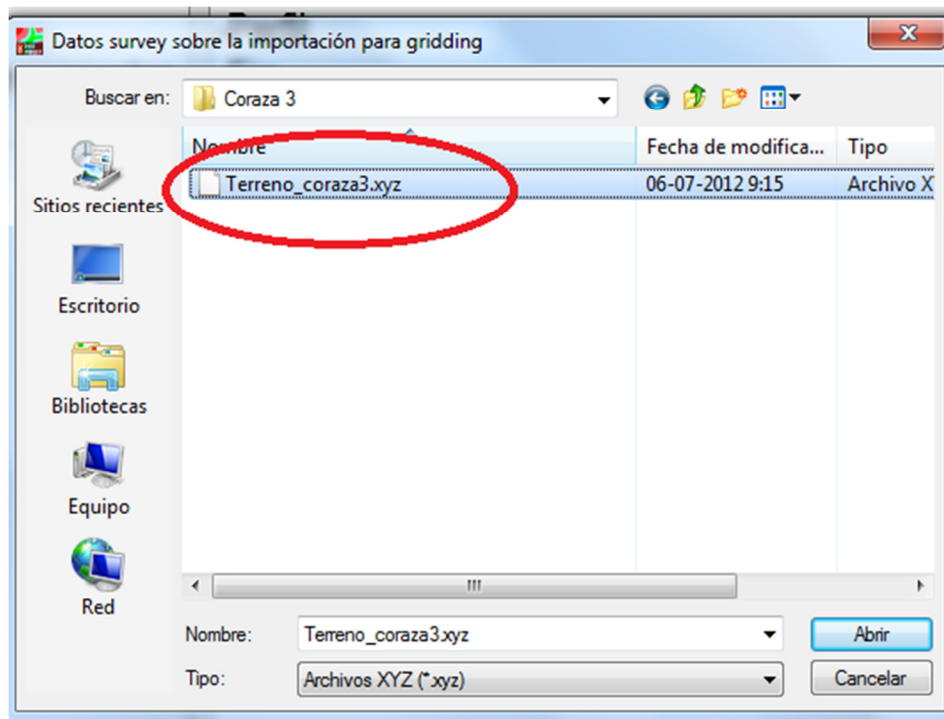


Imagen 2.10

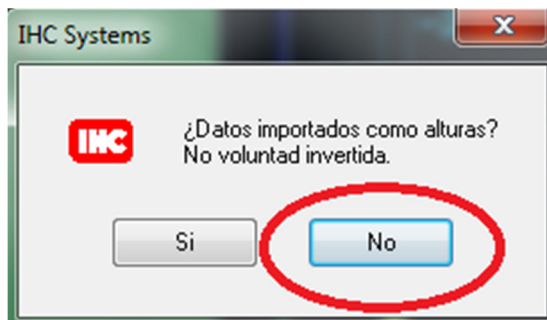


Imagen 2.11

2.1.2 Cargar el respaldo de un proyecto

- Presionar la tecla "F1" en cualquiera de los dos teclados (Ver imagen 1).
- Ubicar el puntero del ratón en la opción "Proyecto" y presionar un click. (Imagen 2.12).

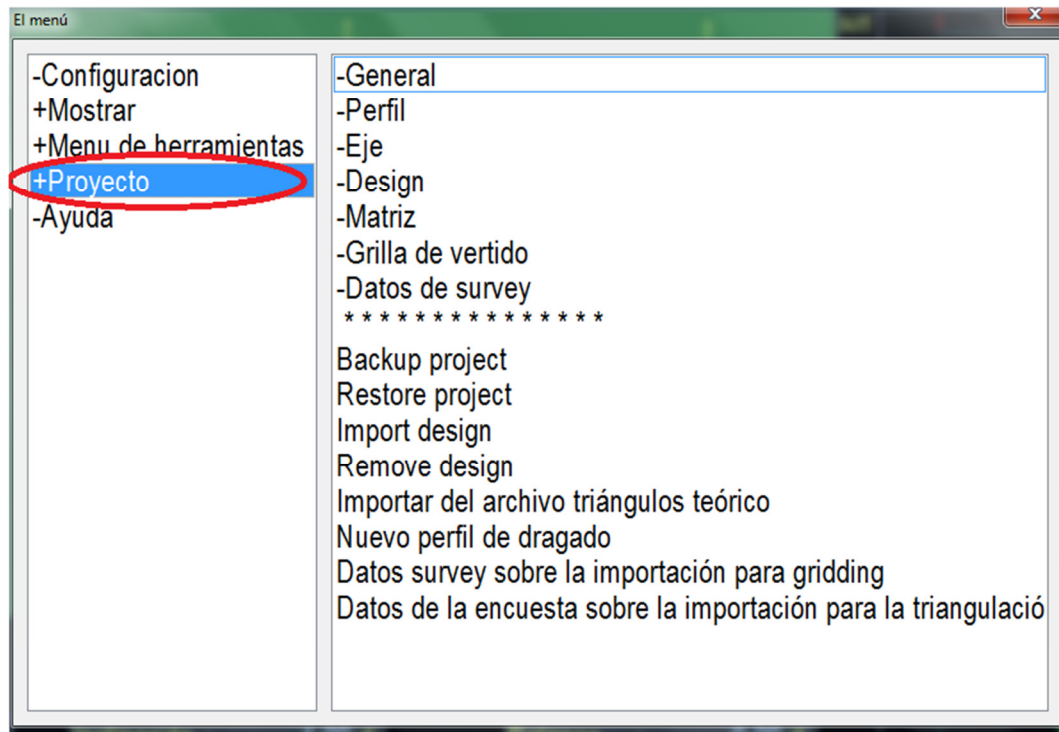


Imagen 2.12

c) Utilizar el ratón (mouse) o el teclado y hacer dos clicks en "Restore Project" ("Restaurar proyecto") (Imagen 2.13).

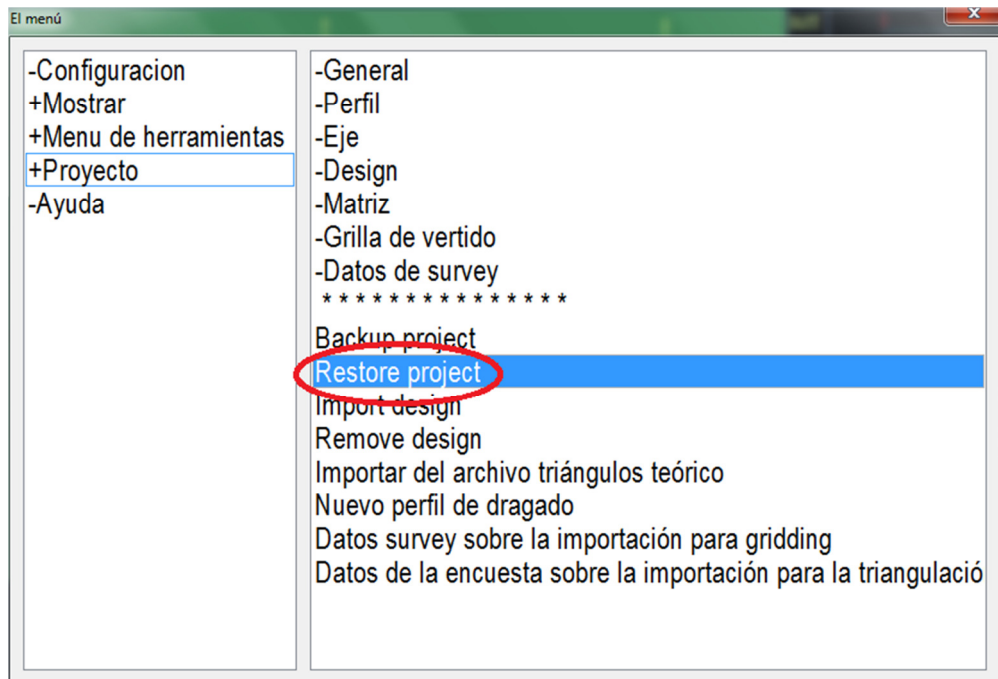


Imagen 2.13

- d) Seleccionar la ubicación en donde se desea cargarse el proyecto, escoger solamente la carpeta del respaldo que desea cargarse y presionar "OK".

NOTA: Los archivos de respaldo se guardan automáticamente con un nombre definido por el programa. Los respaldos tienen una serie de números que identifican la fecha y la hora con la que se guardó. Los respaldos se guardan con el siguiente formato: `Proyect_año/mes/día_hora/minutos/segundos`. (Por ejemplo, el respaldo llamado `Project_120616_111324`, el cual significa que se realizó el 16 de Junio del 2012 a las 11:13:24).

2.2 Respaldar un proyecto

- a) Presionar la tecla "F1" en cualquiera de los dos teclados.
- b) Ubicar el puntero del ratón en la opción "Proyecto" y presionar un click. (Imagen 2.14).

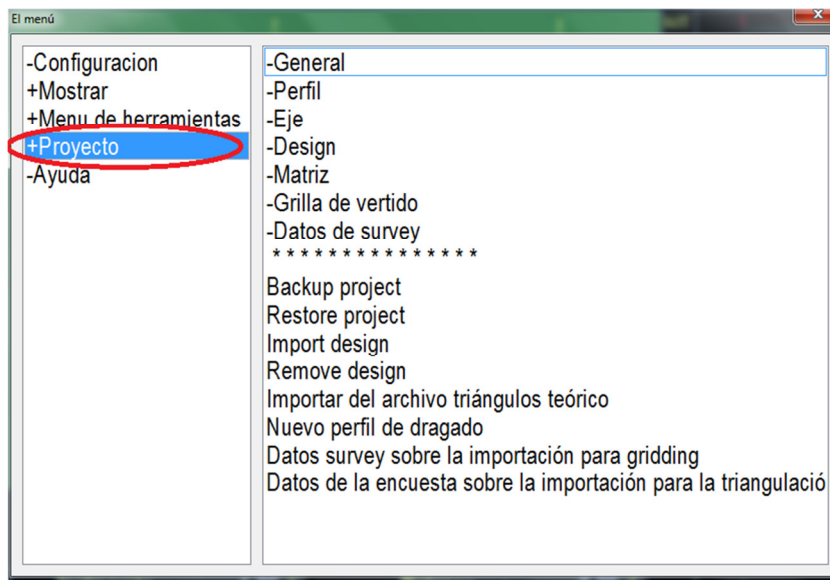


Imagen 2.14

- c) Utilizar el ratón (mouse) o el teclado y hacer dos clicks en "Backup" ("Proyecto de seguridad") (Figura 2.15).

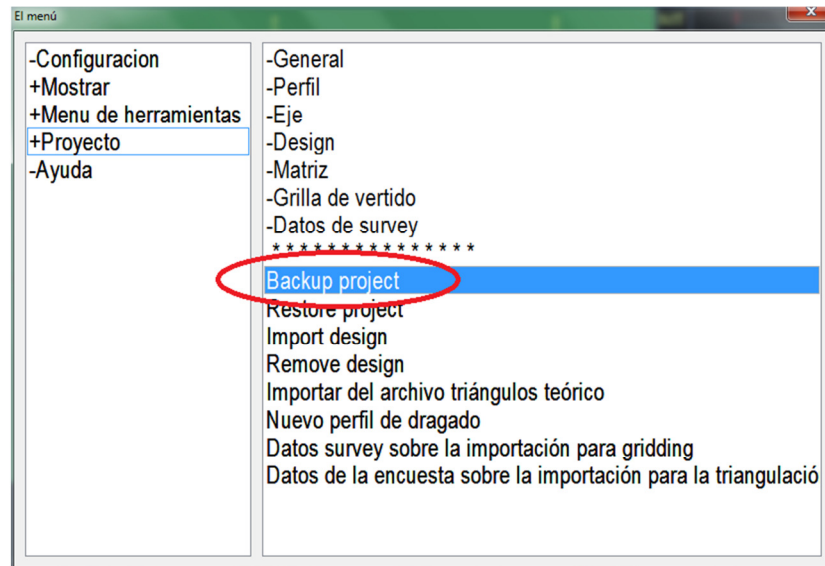


Imagen 2.15

- d) Seleccionar la ubicación en donde se desea guardar el proyecto. Los respaldos se encuentran guardados en el disco D: dentro de la carpeta "Respaldos de proyecto", seleccionar el respaldo que se quiere cargar y presionar "OK".

3 Calibración operacional

Existen dos tipos de calibraciones, la ingenieril y la operacional. La calibración operacional es posible hacerla en forma constante pues es sencilla de realizar, a diferencia de la calibración ingenieril que se deben hacer mediciones con instrumentos topográficos o con la marea. La calibración debe hacerse al comenzar con el trabajo, pues los sensores se descalibran levemente con el uso repetido del equipo. A continuación se presenta un breve procedimiento para poder realizar la calibración operacional. En base a la experiencia, la calibración deberá hacerse una vez diaria, después de encender el XPM.

- a) Presionar la tecla "F1" en cualquiera de los teclados.
- b) Hacer un click en "Configuración" o seleccionarlo utilizando el teclado. (Imagen 3.1).

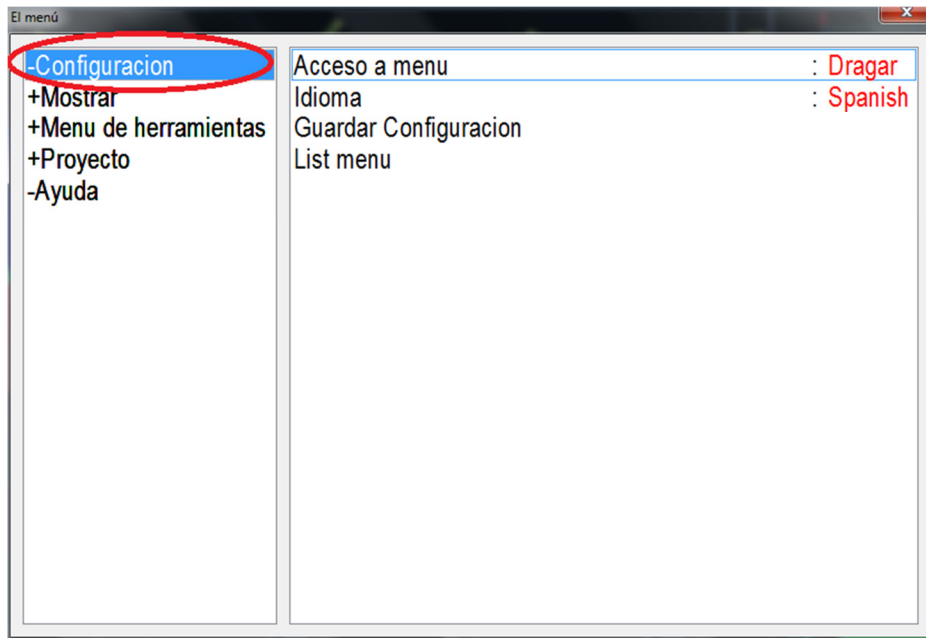


Imagen 3.1

c) Hacer dos clicks en "Acceso a Menú" (Imagen 3.2).

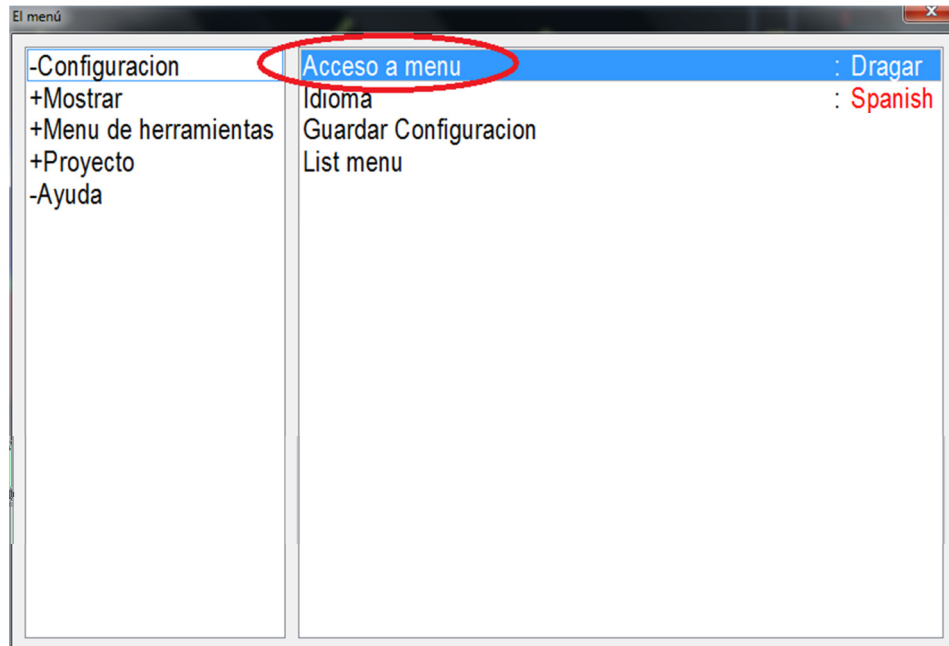


Imagen 3.2

d) Hacer dos clicks en "Calibración" (Imagen 3.3).

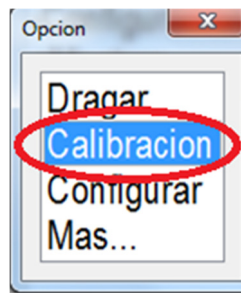


Imagen 3.3

e) Introducir el código "1234" y presionar OK (Imagen 3.4).

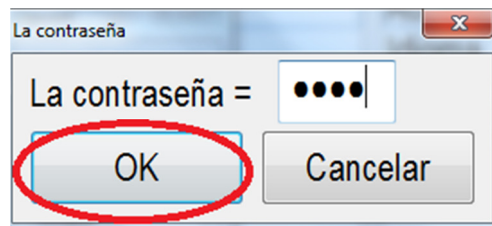


Imagen 3.4

f) Presionar nuevamente la tecla "F1"

g) Hacer un click en "Menú de Herramientas" (Imagen 3.5).

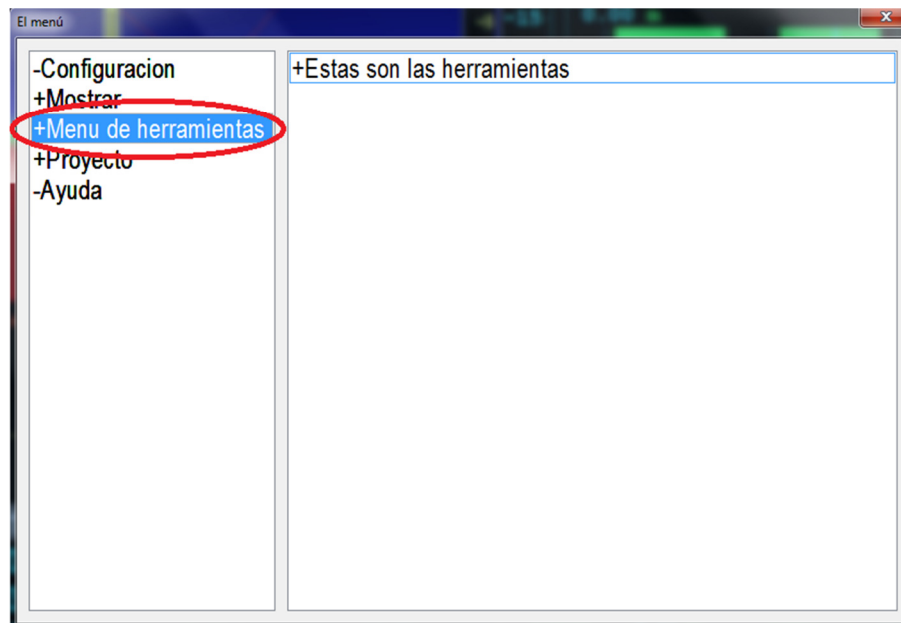


Imagen 3.5

h) Hacer dos clicks en "Estas son las herramientas (Imagen 3.6).

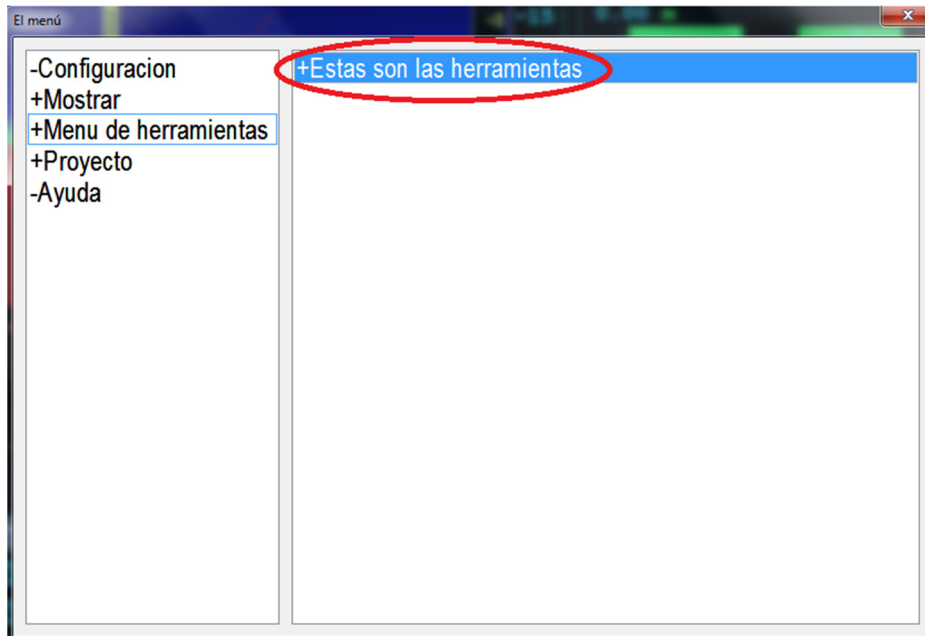


Imagen 3.6

i) Hacer dos clicks en "Visualización" (Imagen 3.7).

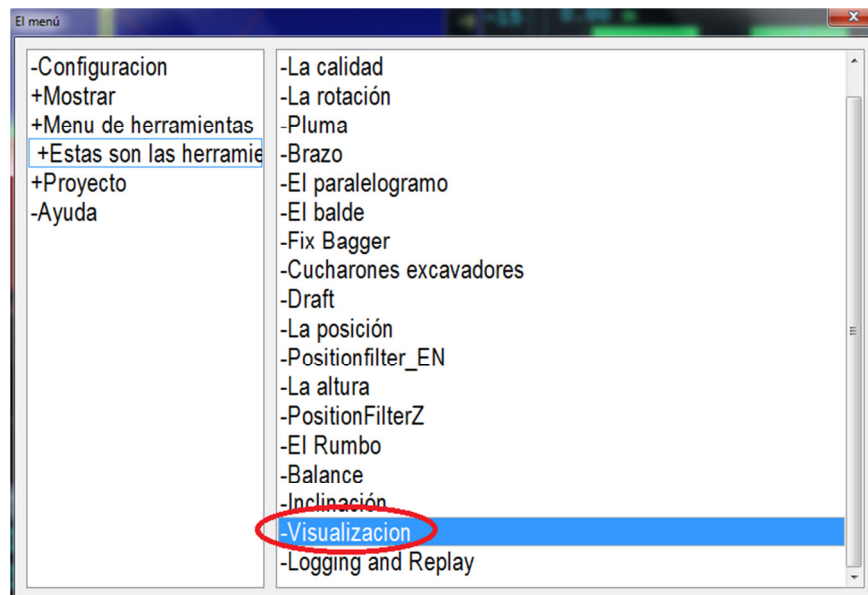


Imagen 3.7

j) Hacer dos clicks en "Calibrar transductores de ángulo" (Imagen 3.8).

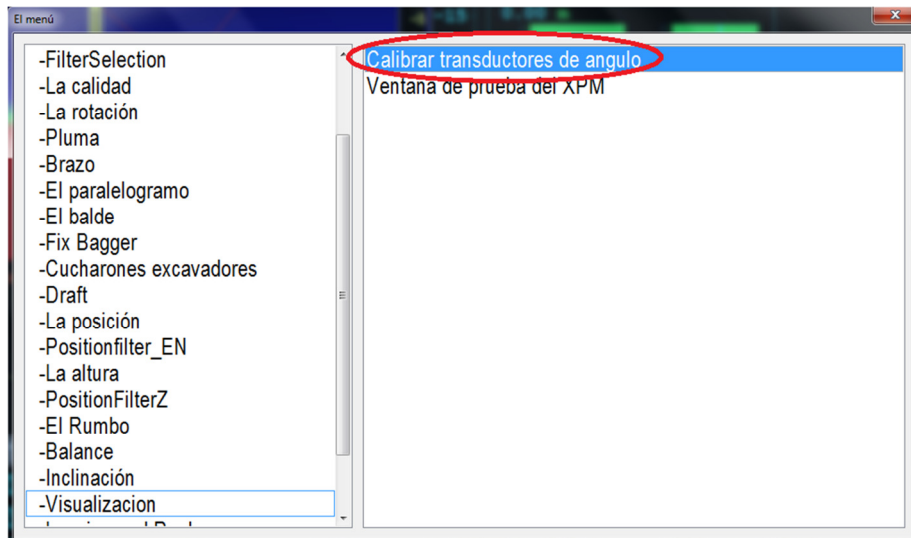


Imagen 3.8

- k) Abrir el balde completamente y elevar la pluma (boom) y el stick al máximo.
- l) Hacer un click en "Aceptar (Imagen 3.9), este último paso se tiene que hacer con mayor rapidez pues tanto el boom con el stick descienden por peso propio y la idea es que se encuentren en la posición de máxima apertura.

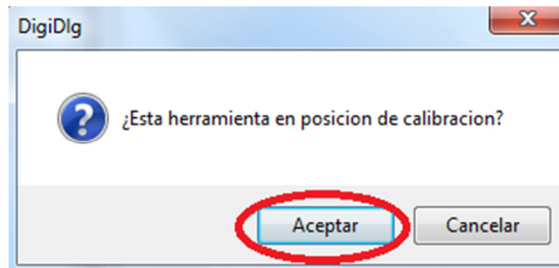


Imagen 3.9

El dibujo de la excavadora en la pantalla debería verse muy similar al de la condición actual de la excavadora (balde completamente abierto, boom y stick elevados al máximo). En caso de calibrar con el grapo puesto, no es necesario abrir completamente el balde, basta con elevar totalmente el boom y el stick.

4 Selección de herramientas

En este capítulo se verá como escoger las distintas herramientas de trabajo (baldes y paralelogramos).

- a) Presionar la tecla "F1" en cualquiera de los dos teclados.
- b) Hacer un click en "Menú de Herramientas" (Imagen 4.1).

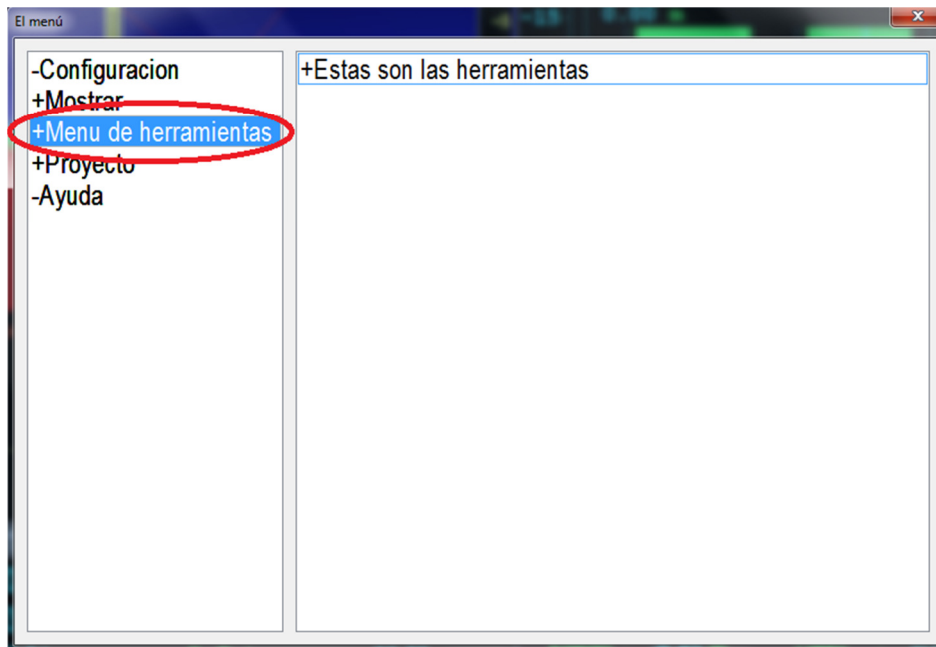


Imagen 4.1

- c) Hacer dos clicks en "Estas son las herramientas" (Imagen 4.2).

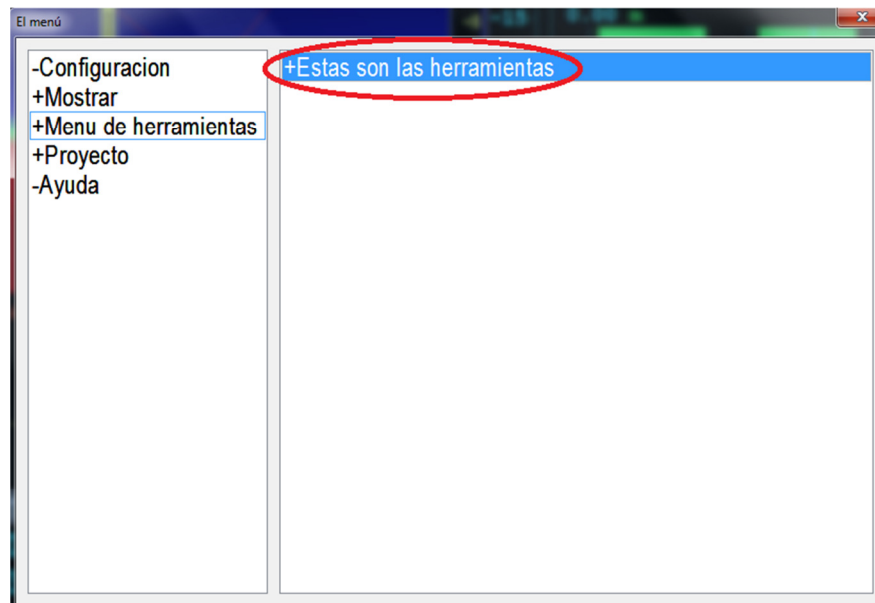


Imagen 4.2

- d) Hacer dos clicks en la opción "El balde" (Imagen 4.3).

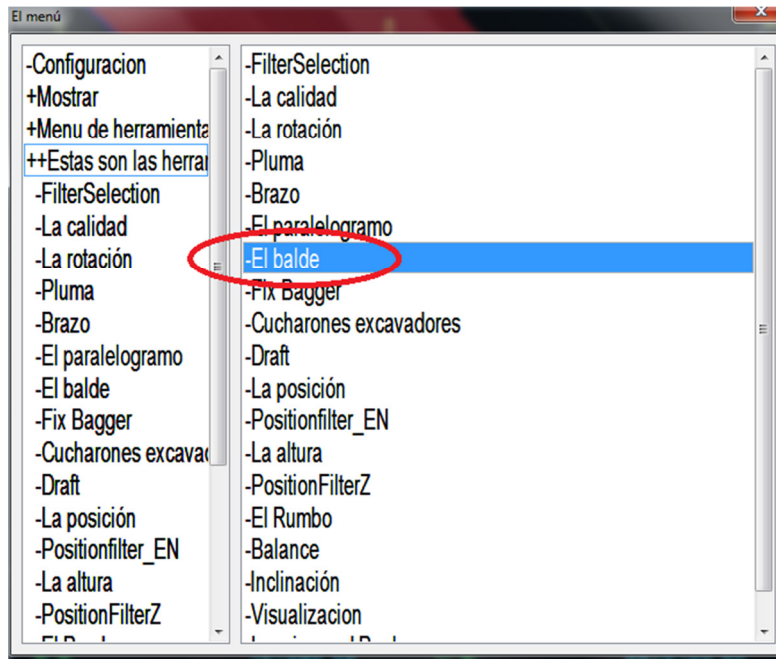


Imagen 4.3

e) Hacer dos clicks en "El tipo" (Imagen 4.4).

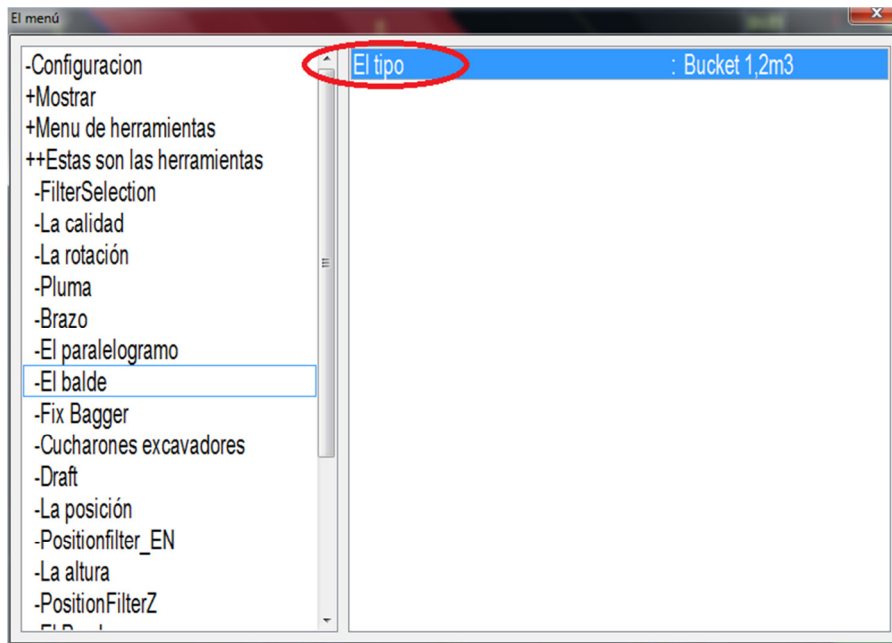


Imagen 4.4

f) Hacer dos clicks en "Bucket 1.2m" o "Grapo" dependiendo de lo que se necesite en el momento. (Imagen 4.5).

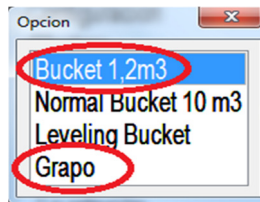


Imagen 4.5

Hacer un click en "El paralelogramo" (Imagen 4.6).

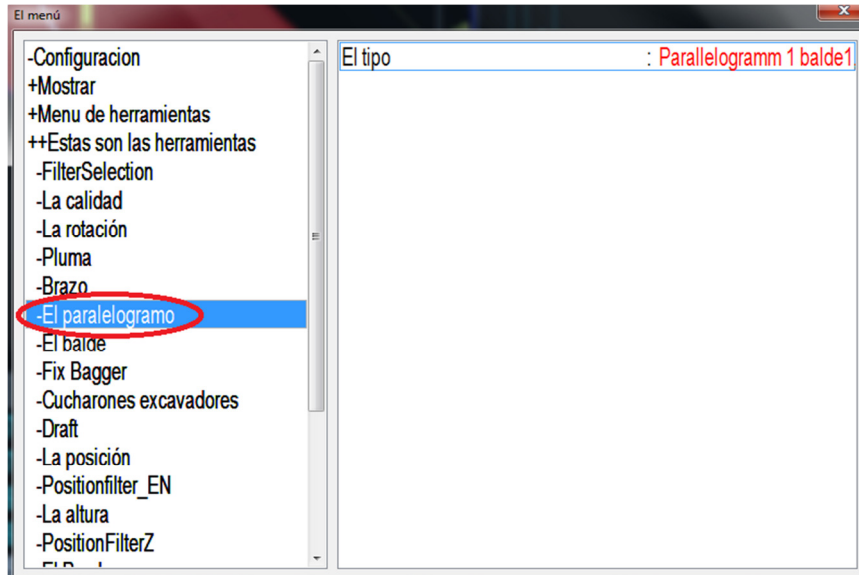


Imagen 4.6

g) Hacer dos clicks en "El tipo" (Imagen 4.7).

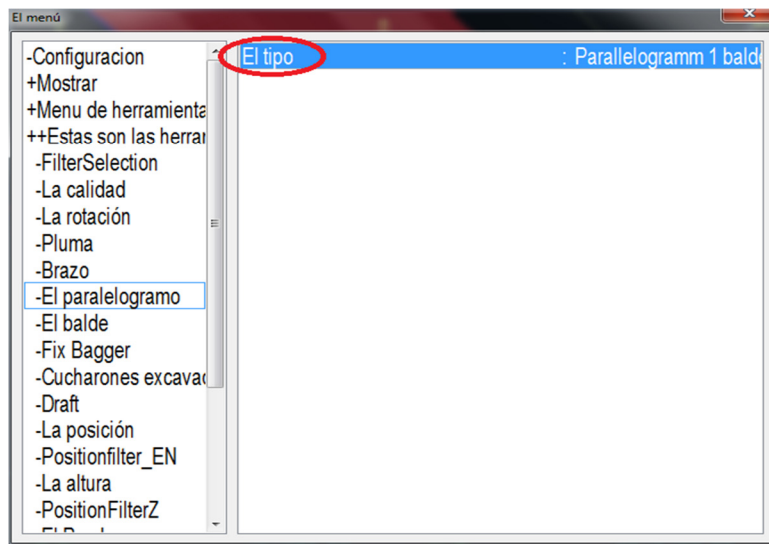


Imagen 4.7

- h) Hacer dos clicks en "Parallelogramm 1 balde 1.2" o "Paralelogramo del Grapo" depende de lo que se requiera (Imagen 4.8).
NOTA: Utilizar siempre la herramienta correspondiente, es decir, utilizar grapo con el Paralelogramo del Grapo y no con el Paralelogramo del balde.

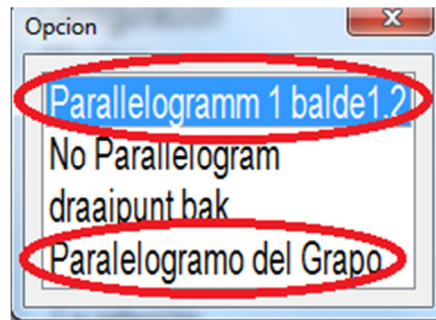


Imagen 4.8

- i) Presionar F1 para cerrar la ventana.

Anexo C: Registro y cálculo de rendimientos

1. Grúa Link-Belt LS-518 (150ton) implementada con sistema Rover.

Grúa Link-Belt LS518			
Nº Roca	Tiempo	Nº Roca	Tiempo
1	0:04:51	26	0:03:22
2	0:03:23	27	0:08:58
3	0:04:03	28	0:04:21
4	0:05:49	29	0:03:21
5	0:06:19	30	0:03:46
6	0:03:51	31	0:04:01
7	0:03:57	32	0:03:32
8	0:04:11	33	0:05:21
9	0:06:03	34	0:04:42
10	0:04:00	35	0:03:14
11	0:03:55	36	0:03:57
12	0:07:03	37	0:04:12
13	0:03:04	38	0:05:19
14	0:03:23	39	0:03:35
15	0:04:13	40	0:04:24
16	0:07:51	41	0:04:37
17	0:03:23	42	0:03:58
18	0:06:01	43	0:05:12
19	0:03:31	44	0:04:02
20	0:02:53	45	0:04:10
21	0:03:23	46	0:05:12
22	0:06:01	47	0:03:50
23	0:04:20	48	0:06:12
24	0:03:31	49	0:04:32
25	0:02:53	50	0:04:25
Promedio	0:04:29		
Rendimiento	13.4 21.4	rocas/hora ton/hora	

2. Excavadora PC-800 implementada con sistema XPM

Excavadora PC-800			
Nº Roca	Tiempo	Nº Roca	Tiempo
1	0:01:00	26	0:01:44
2	0:00:40	27	0:01:28
3	0:01:07	28	0:01:00
4	0:00:40	29	0:01:17
5	0:00:55	30	0:01:08
6	0:01:10	31	0:01:02
7	0:01:00	32	0:01:05
8	0:00:50	33	0:01:00
9	0:00:50	34	0:01:20
10	0:00:50	35	0:01:13
11	0:00:57	36	0:01:35
12	0:01:37	37	0:01:18
13	0:01:02	38	0:01:12
14	0:00:45	39	0:01:25
15	0:00:50	40	0:01:22
16	0:01:55	41	0:01:13
17	0:00:45	42	0:01:18
18	0:01:12	43	0:01:24
19	0:01:40	44	0:01:02
20	0:01:10	45	0:01:12
21	0:01:01	46	0:01:14
22	0:00:40	47	0:01:26
23	0:00:55	48	0:01:20
24	0:00:55	49	0:01:18
25	0:01:10	50	0:01:25
Promedio	0:01:09		
Rendimiento	52.2 83.5	rocas/hora ton/hora	

