



Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2026,
Volumen 10, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i4

INGENIERÍA INVERSA Y ANÁLISIS DE VIABILIDAD PARA EL RETROFITTING DE UN CENTRO DE MAQUINADO CNC BOXFORD 190 VMC

**REVERSE ENGINEERING AND FEASIBILITY ANALYSIS
FOR THE RETROFIT OF A BOXFORD 190 VMC CNC
MACHINING CENTER**

Randy Delgado González

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Roberto Cristian Delgado Arcos

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Carol Elissett Colin Velázquez

Universidad Politécnica del Valle de Toluca

Maythe Joseline Erasto González

Universidad Politécnica del Valle de Toluca

Cristian Jesus Ortiz Reyes

Universidad Politécnica del Valle de Toluca

Diego Rodríguez Centeno

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Erik Juárez Cortes

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Dr. Manuel González Pérez

Universidad Tecnológica de Tecamachalco

Ingeniería inversa y análisis de viabilidad para el retrofitting de un centro de maquinado CNC Boxford 190 VMC

Randy Delgado González¹r.delgado@personal.uttecarn.edu.mx
<https://orcid.org/0009-0003-4295-5841>Universidad Tecnológica de Tecamachalco,
Tecamachalco, Puebla, México**Roberto Cristian Delgado Arcos**roberto.da@personal.uttecarn.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-7127-4696>Universidad Tecnológica de Tecamachalco,
Tecamachalco, Puebla, México**Carol Elissett Colin Velázquez**carolcolinv@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0008-1212-1439>Universidad Politécnica del Valle de Toluca,
Almoloya de Juárez, Estado de México,
México.
Programa Delfín 2026.**Maythe Joseline Erasto González**maythejoselineerasto@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-8722-218X>Universidad Politécnica del Valle de Toluca,
Almoloya de Juárez, Estado de México,
México.
Programa Delfín 2026.**Cristian Jesus Ortiz Reyes**cristianreyesortiz13@gmail.com
<https://orcid.org/0009-0004-5289-5173>Universidad Politécnica del Valle de Toluca,
Almoloya de Juárez, Estado de México,
México.
Programa Delfín 2026.**Diego Rodríguez Centeno**diego.rc@personal.uttecarn.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0003-0772-4899>Universidad Tecnológica de Tecamachalco,
Tecamachalco, Puebla, México**Erik Juárez Cortes**erik.jc@personal.uttecarn.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0002-4478-0825>Universidad Tecnológica de Tecamachalco,
Tecamachalco, Puebla, México**Dr. Manuel González Pérez**m.gonzalez.perez@personal.uttecarn.edu.mx
<https://orcid.org/0000-0001-8700-2866>Universidad Tecnológica de Tecamachalco
Enlace SECIHTI
Programa Delfín 2026
México

RESUMEN

La obsolescencia del software de control es una causa frecuente de pérdida funcional en equipos didácticos de manufactura, aun cuando su estructura mecánica permanece en condiciones de servicio. El objetivo de este trabajo fue documentar, mediante ingeniería inversa, los componentes mecánicos, eléctricos y de control de un centro de maquinado CNC Boxford 190 VMC y desarrollar una propuesta técnicamente fundamentada de retrofitting. Se adoptó un enfoque mixto con predominio cualitativo, mediante un estudio de caso instrumental con una fase de *Design Science Research*, combinando observación directa, desarmado sistemático con registro fotográfico, metrología de recorridos y *backlash*, análisis documental y el desarrollo de un gemelo digital en SolidWorks. Los resultados evidenciaron que la estructura mecánica permanece en condiciones de servicio y que la obsolescencia se concentra en el sistema de control. Asimismo, el mantenimiento correctivo y el ajuste de tolerancias redujeron sustancialmente el *backlash*, confirmando el origen mecánico de parte de la pérdida de precisión. En conjunto con antecedentes de conversiones mediante LinuxCNC y tarjetas Mesa, estos hallazgos sustentan la viabilidad técnica del retrofitting como alternativa para extender la vida útil del equipo y fortalecer la formación práctica de estudiantes mediante proyectos de ingeniería inversa e innovación tecnológica.

Palabras clave: retrofitting; ingeniería inversa; gemelo digital; backlash; centro de maquinado CNC

¹ Autor principal

Correspondencia: r.delgado@personal.uttecarn.edu.mx

Reverse Engineering and Feasibility Analysis for the Retrofit of a Boxford 190 VMC CNC Machining Center

ABSTRACT

Reverse Engineering and Feasibility Analysis for the Retrofitting of a Boxford 190 VMC CNC Machining Center Control software obsolescence is a frequent cause of functional loss in educational manufacturing equipment, even when its mechanical structure remains in serviceable condition. The objective of this study was to document, through reverse engineering, the mechanical, electrical, and control components of a Boxford 190 VMC CNC machining center and to develop a technically grounded retrofitting proposal. A mixed-methods approach with qualitative predominance was adopted through an instrumental case study incorporating a Design Science Research phase. The methodology combined direct observation, systematic disassembly with photographic documentation, travel and backlash metrology, documentary analysis, and the development of a digital twin in SolidWorks. The results showed that the machine's mechanical structure remains in serviceable condition and that obsolescence is concentrated in the control system. Furthermore, corrective maintenance and tolerance adjustment substantially reduced backlash, confirming that part of the loss of precision had a mechanical origin. Together with documented precedents of conversions based on LinuxCNC and Mesa interface boards, these findings support the technical feasibility of retrofitting as an alternative for extending the equipment's service life while strengthening students' practical training through reverse engineering and technological innovation projects.

Keywords: retrofitting; reverse engineering; digital twin; backlash; CNC machining center.

Artículo recibido 20 mayo 2026

Aceptado para publicación: 20 junio 2026



INTRODUCCIÓN

Las universidades que forman ingenieros en manufactura suelen conservar equipos de control numérico computarizado (CNC) adquiridos hace décadas, cuyo valor pedagógico depende de que puedan operar bajo control programado. Con el paso del tiempo, un problema recurrente no es el deterioro mecánico de estas máquinas, sino la obsolescencia de su software y su electrónica de control, que deja de ser compatible con los sistemas operativos y las computadoras actuales (Niemeyer et al., 2020). Esta situación reduce el equipo a una condición de operación manual, disminuyendo drásticamente su utilidad formativa e industrial, aun cuando su estructura mecánica conserva capacidad de trabajo.

Este es el caso del centro de maquinado CNC Boxford 190 VMC que se aborda en el presente trabajo, ubicado en un laboratorio universitario. Tras una revisión de su software de control original, se confirmó que ya no es funcional en el equipo de cómputo disponible, por lo que la máquina opera actualmente únicamente mediante sus controles manuales, lo que limita su aprovechamiento como recurso didáctico para asignaturas relacionadas con manufactura y control numérico.

Frente a este tipo de problema, la literatura especializada distingue dos rutas: el reemplazo del equipo por una máquina nueva, o su retrofitting, entendido como la incorporación de sensores, controladores y capacidades de comunicación a máquinas existentes, con el fin de extender sus capacidades y su vida útil a un costo y tiempo acotados (Niemeyer et al., 2020). El retrofitting es particularmente pertinente cuando, como ocurre en este caso, la limitación se concentra en el control y no en la mecánica, y cuando el reemplazo total no es una opción viable por su costo (Niemeyer et al., 2020; Ilari et al., 2021).

Desde una perspectiva de sostenibilidad, este proyecto se vincula directamente con el ODS 9 (Industria, Innovación e Infraestructura), al promover la modernización tecnológica de infraestructura existente mediante soluciones de bajo costo; con el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables), al extender la vida útil del equipo y evitar su disposición prematura; y con el ODS 4 (Educación de Calidad), al fortalecer las capacidades formativas de los estudiantes mediante experiencias reales de ingeniería inversa e innovación aplicada, en concordancia con los objetivos establecidos por las Naciones Unidas para el desarrollo sostenible (Naciones Unidas, 2015).

Antes de diseñar cualquier propuesta de modernización, es necesario comprender en profundidad cómo está construida la máquina: qué componentes la integran, en qué condiciones se encuentran y cómo se

relacionan entre sí. Ese conocimiento se obtiene mediante ingeniería inversa, un proceso sistemático de análisis de un sistema existente para identificar sus componentes, sus relaciones y los principios de su funcionamiento (Siemens, s. f.), y que en este proyecto se documentó mediante desarmado físico, registro fotográfico exhaustivo y modelado de un gemelo digital.

Este trabajo plantea, por tanto, dos preguntas de investigación: (a) ¿cuáles son los componentes mecánicos, eléctricos y de control que integran el centro de maquinado Boxford 190 VMC, y en qué estado funcional se encuentran?, y (b) ¿es técnicamente viable, a partir de esa documentación, proponer un retrofitting basado en una arquitectura de control abierta? El objetivo general fue documentar, mediante ingeniería inversa, los componentes del centro de maquinado CNC Boxford 190 VMC y desarrollar, a partir de dicha documentación, una propuesta de retrofitting técnicamente viable, como estudio de caso formativo en ingeniería. De manera específica, se buscó: (1) documentar mediante desarmado sistemático y registro fotográfico los subsistemas mecánico, eléctrico y de control de la máquina; (2) desarrollar un gemelo digital en SolidWorks que represente fielmente su geometría y su cinemática; (3) analizar, con apoyo de mediciones directas y de la literatura técnica, la viabilidad de una arquitectura de control abierta (LinuxCNC y tarjeta de interfaz Mesa) como propuesta de modernización; y (4) identificar las competencias de ingeniería desarrolladas por los estudiantes participantes durante el proceso.

El trabajo se enmarca en un proyecto formativo de investigación aplicada, en el que estudiantes documentan, evalúan y proponen —sin ejecutar todavía— la modernización de un activo real de su institución, articulando ingeniería inversa, conocimiento de la industria y capacidad de innovación.

La novedad metodológica de este trabajo radica en integrar, en un solo estudio de caso formativo, la ingeniería inversa documental, la metrología directa del backlash como línea base cuantitativa y el desarrollo de un gemelo digital, aplicados a un modelo de máquina del que no existía documentación académica formal, articulando evidencia de foros técnicos especializados con literatura arbitrada.

Retrofitting de maquinaria industrial

El retrofitting se define como la actualización de maquinaria y equipos existentes mediante la incorporación de sensores, controladores y capacidades de comunicación, con el propósito de ampliar sus capacidades y prolongar su vida útil (Niemeyer et al., 2020). A diferencia del reemplazo, el

retrofitting permite cambios evolutivos, de alcance limitado y bajo costo y tiempo, que facilitan una adaptación gradual y una verificación rápida de su correcto funcionamiento (Niemeyer et al., 2020). Desde una perspectiva de sostenibilidad, Ilari et al. (2021) comparan, bajo un enfoque de triple resultado (económico, social y ambiental), el retrofitting inteligente de máquinas antiguas frente a la compra de máquinas nuevas, concluyendo que el retrofitting resulta una alternativa favorable cuando la estructura mecánica del equipo conserva capacidad de servicio.

En el ámbito industrial, el retrofitting suele describirse en tres capas: una capa sensorica y de comunicación (frecuentemente basada en dispositivos de Internet de las cosas), una capa de almacenamiento y procesamiento en la nube, y una capa de algoritmos —incluyendo técnicas de aprendizaje automático— para la generación de conocimiento a partir de los datos capturados (Słowik & Sierocka, 2023). En el caso de máquinas-herramienta CNC, el retrofitting se ha documentado mediante la incorporación de controladores de arquitectura abierta y componentes electrónicos de bajo costo, en sustitución de sistemas de control propietarios que han quedado obsoletos (Quatrano et al., 2017; Herwan et al., 2019).

Retrofitting frente a mantenimiento y reingeniería

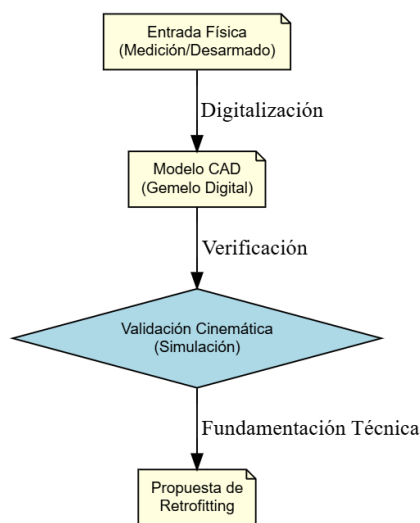
Conviene distinguir el retrofitting de otros conceptos con los que suele confundirse. El mantenimiento preventivo consiste en revisiones periódicas —limpiar, lubricar, ajustar— orientadas a evitar que la máquina falle, mientras que el mantenimiento correctivo es la reparación que se realiza después de que una falla ya ocurrió (Mantenimiento Industrial Saltillo, s. f.; Aeromaquinados, 2025). El retrofitting va más allá de ambos: no solo previene o repara, sino que sustituye subsistemas completos —típicamente de control, sensorica o electrónica— para dotar a la máquina de capacidades que antes no tenía (SD Industrial, 2023). Tampoco debe confundirse con la reingeniería, concepto que, en su origen, se aplica más a los procesos de una organización que a máquinas específicas y que busca rediseñar por completo una forma de trabajar. Sin embargo, retrofitting, mantenimiento, reingeniería e ingeniería inversa comparten una misma lógica de fondo: en lugar de desechar lo que ya existe, se analiza cómo conservarlo y mejorarlo (García-Rodríguez de Guzmán et al., 2004).

Ingeniería inversa como método de documentación técnica

La ingeniería inversa consiste en analizar un producto o sistema existente para identificar sus componentes, sus relaciones funcionales y los principios que rigen su operación, generalmente cuando no se dispone de su documentación técnica original completa (Siemens, s. f.; Serra Ruiz, 2021). García-Rodríguez de Guzmán et al. (2004) ubican la ingeniería inversa, junto con la reingeniería, como procesos complementarios orientados a comprender un sistema existente para, posteriormente, mejorarlo o adaptarlo a nuevos requerimientos. En el contexto de este proyecto, la ingeniería inversa se aplicó mediante metrología directa con instrumentos de medición, registro fotográfico sistemático y modelado geométrico, en un entorno de diseño asistido por computadora, como vía para reconstruir el conocimiento técnico de una máquina para la que no se contaba con documentación de ingeniería completa, como se muestra en la Figura 1.

Figura 1

Flujo de trabajo de la ingeniería inversa aplicada al centro de maquinado Boxford 190 VMC.



Nota. Se muestra el proceso seguido desde la captura de datos físicos, el desarmado y la metrología hasta el modelado CAD y la validación cinemática en SolidWorks, que sirve de base para la propuesta de retrofitting. Elaboración propia.

Gemelos digitales como herramienta de retrofitting

El modelado de un gemelo digital —una representación geométrica y funcional de un activo físico— se ha empleado en proyectos de retrofitting para visualizar el estado de la máquina, planificar intervenciones y validar el comportamiento cinemático antes de intervenir en el equipo real (Al-Maeeni et al., 2020). Esta práctica se ha extendido también a otros equipos de metrología y manufactura en entornos universitarios, como el desarrollo de gemelos digitales para máquinas de medición por coordenadas (Universidad Distrital, s. f.) y su aplicación creciente en máquinas-herramienta industriales (MMS México, 2026). En este trabajo, el gemelo digital desarrollado en SolidWorks cumple una función equivalente: sistematiza la información recabada mediante ingeniería inversa y sirve de base para planificar, en fases posteriores, la integración física de la nueva electrónica de control.

Arquitecturas de control abierto como ruta de modernización

Diversos trabajos han documentado la sustitución de controladores propietarios obsoletos por arquitecturas de control abierto en máquinas CNC. Quatrano et al. (2017) desarrollaron un controlador de lazo abierto basado en la plataforma Arduino para reutilizar una máquina considerada obsoleta por su alto costo de mantenimiento, empleando componentes de bajo costo y software de código abierto. Herwan et al. (2019) retroadaptaron un torno CNC antiguo incorporando un acelerómetro y una arquitectura de monitoreo remoto, orientada a los principios de la Industria 4.0. De forma más específica al caso aquí estudiado, existen reportes técnicos, documentados por usuarios especializados en foros de la comunidad de maquinado CNC, de la conversión de este mismo modelo de máquina —el Boxford 190 VMC— hacia una arquitectura de control basada en LinuxCNC y una tarjeta de interfaz Mesa, lo que constituye un precedente técnico directo para la propuesta que se plantea en este trabajo (MYCNCUK, s. f.-a; LinuxCNC Forum, 2023).

Aprendizaje basado en proyectos e ingeniería inversa

El aprendizaje basado en proyectos desplaza el proceso formativo hacia problemas reales y desarrolla competencias que exigen los marcos de acreditación de ingeniería, articulando el conocimiento técnico, el trabajo en equipo y la toma de decisiones (Misoc et al., 2015; Delgado Arcos et al., 2026). En proyectos de retrofitting e ingeniería inversa sobre activos reales de la institución, este enfoque permite que los estudiantes ejerciten simultáneamente competencias técnicas —medición, modelado, análisis de

sistemas de control— y competencias transversales de innovación y gestión de proyectos, en un contexto en el que el objeto de estudio y el resultado formativo coinciden.

METODOLOGÍA

Enfoque, tipo y diseño

Se adoptó un enfoque mixto de predominio cualitativo, mediante un estudio de caso instrumental único (Stake, 1995), complementado con una fase de investigación en diseño o Design Science Research (Hevner et al., 2004). La primera fase —diagnóstica— documenta el objeto de estudio en su estado y contexto reales, sin manipular variables, e incorpora mediciones directas (recorridos por eje y backlash) que aportan evidencia cuantitativa que respalda la descripción cualitativa del caso. La segunda fase —de diseño— utiliza esa documentación para plantear un artefacto de modernización (la propuesta de retrofitting), cuya justificación técnica constituye, en sí misma, un resultado de la investigación. El estudio no incluyó pruebas de desempeño bajo carga ni cálculos de diseño mecánico o electrónico detallados, los cuales corresponden a una fase posterior de ingeniería de detalle.

Unidad de análisis

La unidad de análisis fue el centro de maquinado CNC Boxford 190 VMC, ubicado en el laboratorio de CNC del programa educativo (PE) de Ingeniería Industrial de la Universidad Tecnológica de Tecamachalco. Se seleccionó este caso por ser representativo de un problema común en instituciones educativas: un activo con inversión de capital significativa, mecánicamente funcional, pero inutilizado en su modalidad de operación programada por la obsolescencia de su software de control.

Participantes y ubicación.

La máquina se ubica en la Universidad Tecnológica de Tecamachalco, en un entorno semiurbano, y el proyecto se desarrolló en el marco del PE de Ingeniería Industrial. Participaron tres estudiantes del Programa Delfín durante el XXXI Verano de la Investigación Científica y Tecnológica del Pacífico (2026), de Ingeniería Mecánica Automotriz, con TSU en Diseño y Manufactura Automotriz, de la Universidad Politécnica del Valle de Toluca.

Materiales e instrumentos empleados

Para el desarrollo del proyecto se emplearon instrumentos de metrología directa, como un indicador de carátula para medir el backlash de los ejes, un vernier para la toma de medidas físicas de las piezas y

una escuadra de precisión de maquinista para verificar la perpendicularidad entre la columna y la mesa. El desarme se apoyó en un juego de llaves Allen y en bolsas herméticas y cajas organizadoras para clasificar la tornillería original por eje, mientras que una cámara fotográfica permitió registrar visualmente cables, conectores y componentes antes del desarme. El software SolidWorks se utilizó para el modelado 3D de las piezas y la construcción del gemelo digital. Finalmente, para la limpieza y el mantenimiento correctivo de las piezas de fundición y los mecanismos de transmisión se emplearon cepillos de cerdas de nylon y latón, solventes desengrasantes y dieléctricos, grasa ligera para husillos de bolas y aceite específico para las guías tipo cola de milano.

Técnicas de recolección de datos

Se combinaron cuatro técnicas complementarias de recolección de datos. En primer lugar, la observación directa no participante permitió inspeccionar el estado general y el comportamiento de la máquina en su operación manual actual. En segundo lugar, se aplicó una ingeniería inversa documental mediante el desarmado sistemático de la máquina, con un registro fotográfico exhaustivo organizado por subsistema (mecánico, eléctrico, de control y neumático), documentado en un archivo de evidencias de 89 registros fotográficos. En tercer lugar, se realizó un análisis documental técnico a partir de la revisión del manual de programación original de la máquina y de reportes técnicos publicados por usuarios especializados que han intervenido en este mismo modelo. Por último, se llevó a cabo un modelado digital mediante el desarrollo de un gemelo digital de la máquina en SolidWorks, como técnica de sistematización, verificación geométrica y simulación de movimiento de los componentes documentados.

Procedimiento de análisis

La información recabada se organizó por subsistemas (mecánico, control/electrónica y sensórica/potencia neumática), siguiendo una lógica de clasificación equiparable a la empleada en la literatura sobre retrofitting para describir los componentes de una máquina modernizable (Słowik & Sierocka, 2023). Se realizó una triangulación entre tres fuentes —la evidencia fotográfica del desarmado, el manual técnico original y el modelo geométrico desarrollado en SolidWorks— para verificar la consistencia de la información y detectar discrepancias o modificaciones no documentadas. Sobre esa base, se efectuó un análisis de brechas (gap analysis) entre el estado actual de la máquina

(operación exclusivamente manual) y los requerimientos funcionales de un centro de maquinado CNC operativo, lo que permitió delimitar el alcance técnico de la propuesta de retrofitting.

Cronograma de trabajo

El proyecto se organizó en siete fases distribuidas en 49 días de trabajo, desde el diagnóstico inicial hasta el cierre de la etapa de ingeniería inversa y ensamble del gemelo digital: (1) diagnóstico inicial y documentación, (2) desarme total y clasificación, (3) ingeniería inversa en SolidWorks, (4) mantenimiento correctivo físico, (5) ajuste mecánico y ensamble CAD, (6) reensamblaje físico total, y (7) calibración, pruebas y cierre.

Criterios de rigor

Siguiendo los criterios de Lincoln y Guba (1985), se atendió a: credibilidad, mediante la triangulación entre el manual original, la observación física y el modelo CAD; transferibilidad, mediante una descripción densa del caso que permita a otras instituciones con maquinaria similar replicar el proceso; dependencia, mediante la documentación sistemática y trazable de cada fase del desarmado conforme al cronograma; y confirmabilidad, mediante el registro fotográfico auditable que respalda cada hallazgo.

Consideraciones éticas

El trabajo se realizó con autorización institucional para el uso del equipo y las instalaciones del laboratorio, con fines exclusivamente académicos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Diagnóstico del estado actual del sistema

El desarmado sistemático permitió documentar la arquitectura de control original de la máquina. El gabinete eléctrico integra tarjetas de control propietarias, cableado extenso identificado y etiquetado, relés y transformadores de la electrónica original, como se presenta en la Figura 2; esta arquitectura resulta incompatible con los sistemas operativos actuales, lo que confirma la causa raíz del problema planteado en la introducción: la antigüedad se concentra en la capa de control, no en la mecánica.

Figura 2

Gabinete de control original del centro de maquinado Boxford 190 VMC.



Nota. Se observan las tarjetas electrónicas propietarias, los transformadores y el cableado correspondientes al sistema de control original de la máquina. Elaboración propia.

La fase de despiece y clasificación (semana 2 del cronograma) incluyó el retiro de guardas de acrílico y cubiertas protectoras, el desmontaje de la mesa, el cabezal y los husillos de bolas con sus guías, y la separación de la tornillería original en bolsas y cajas etiquetadas por eje, como puede observarse en la Figura 3. Este ordenamiento, junto con el etiquetado fotográfico de cables y conectores realizado en la semana 1, redujo, en la práctica, el riesgo de errores de reconexión y facilitó la localización de piezas durante las semanas de ensamble.

Figura 3

Clasificación de tarjetas electrónicas y cableado durante el despiece del gabinete.



Nota. Organización de los componentes electrónicos retirados durante el proceso de ingeniería inversa para facilitar su documentación y posterior reensamblaje. Elaboración propia.

La inspección de los servomotores de eje mostró unidades de la marca GEC ALSTHOM con placa de identificación legible, como puede observarse en la Figura 4, lo que permitió documentar sus parámetros nominales de placa. La legibilidad de esta información resulta relevante para la propuesta de retrofitting, pues permite evaluar en fases posteriores su compatibilidad con drivers de arquitectura abierta o, en su defecto, planificar su sustitución dirigida sin necesidad de desmontajes adicionales.

Figura 4

Servomotor del eje con placa de identificación.



Nota. Servomotor GEC Alsthom empleado en el sistema de accionamiento original, cuya placa permitió documentar las especificaciones técnicas para evaluar su posible reutilización en el retrofitting. Elaboración propia.

Asimismo, se documentaron los actuadores neumáticos asociados a funciones auxiliares de la máquina, como se muestra en la Figura 5, lo que evidencia que el alcance de una futura intervención de retrofitting deberá contemplar, además del control de movimiento por ejes, la integración de estos subsistemas auxiliares.

Figura 5

Actuador neumático del sistema auxiliar de la máquina.

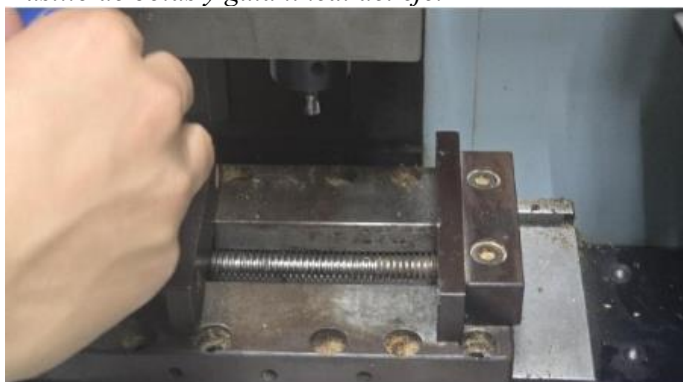


Nota. Componente neumático identificado durante el desarmado, considerado dentro de los subsistemas que deberán integrarse en una futura modernización del equipo. Elaboración propia.

La inspección de husillos de bolas y guías lineales, que se presenta en la Figura 6, mostró componentes mecánicos en condición de servicio, sin evidencia de daño estructural que impida su reutilización. Este hallazgo es central para la viabilidad del proyecto: consistente con la definición de retrofitting como una intervención acotada (Niemeyer et al., 2020), el hecho de que la mecánica se conserve funcional permite concentrar el alcance de la modernización en la capa de control y electrónica, en lugar de requerir una reconstrucción mecánica completa.

Figura 6

Husillo de bolas y guía lineal del eje.



Nota. Componentes mecánicos inspeccionados durante la ingeniería inversa, los cuales se encontraron en condiciones adecuadas para su reutilización tras el mantenimiento correctivo. Elaboración propia.

Tras la documentación fotográfica, la máquina se mantuvo en condiciones físicas intactas y funcionales en su modo manual, como puede observarse en la Figura 7, lista para la fase de recuperación mecánica y el ensamble del gemelo digital.

Figura 7

Estado del centro de maquinado tras la fase de documentación.



Nota. Condición física del equipo una vez concluido el proceso de documentación e ingeniería inversa, previo al mantenimiento correctivo y al modelado del gemelo digital. Elaboración propia.

Recuperación mecánica, ajuste y calibración

Sobre los componentes documentados en el diagnóstico, se aplicó un proceso de mantenimiento correctivo que incluyó la limpieza profunda de las piezas de fundición con desengrasante industrial y cepillos de nylon y latón, el lavado de los husillos de bolas con solvente y la revisión de sus balines internos, y la relubricación con grasa ligera en husillos y aceite específico en las guías tipo cola de milano, evitando mezclar ambos productos por cumplir funciones distintas. Esta limpieza y relubricación permitieron recuperar la suavidad del movimiento manual de los ejes, eliminando la resistencia causada por la grasa reseca y la suciedad acumulada.

Posteriormente, se ajustaron las cuñas (gibs) que controlan la holgura lateral entre la mesa y sus guías, hasta eliminar el juego sin sacrificar la suavidad del desplazamiento, y se verificó con una escuadra de precisión que la columna quedara perpendicular a la mesa, asegurando que el cabezal se desplazara en línea recta a lo largo del eje Z. El reensamblaje total —montaje de la mesa ranurada, acople de los motores originales a los husillos respetando las marcas hechas durante el desarme, y reconexión eléctrica siguiendo el etiquetado de la semana 1— permitió energizar la máquina sin incidentes eléctricos y verificar un movimiento uniforme de los tres ejes.

En la fase final de calibración, se comparó el backlash registrado en el diagnóstico inicial (semana 1) con el medido tras el ajuste de cuñas y la relubricación (semana 7), empleando en ambos casos el mismo indicador de carátula. De forma cuantitativa, se observó una reducción notable de la holgura mecánica de los ejes respecto de la condición inicial, lo que indica que una parte importante de la pérdida de precisión de la máquina no provenía únicamente de la obsolescencia de su sistema de control, sino también de causas puramente mecánicas —grasas resacas, husillos sucios y cuñas mal ajustadas— corregibles mediante mantenimiento correctivo.

Mediciones y evidencia cuantitativa

Con el fin de sustentar objetivamente el diagnóstico y el efecto del mantenimiento correctivo, se documentaron los recorridos máximos físicos de cada eje, presentados en la Tabla 1, y se comparó el backlash medido al inicio y al cierre del proyecto, como se resume en la Tabla 2. Ambas mediciones se realizaron con los mismos instrumentos (vernier e indicador de carátula, como puede observarse en la Figura 8) para preservar la comparabilidad, y se reportan junto con su incertidumbre instrumental

estimada, que corresponde a la resolución del instrumento empleado; se recomienda promediar al menos tres mediciones por eje para reducir el error de repetibilidad del operador.

Figura 8

Medición del backlash mediante indicador de carátula.



Nota. Procedimiento empleado para cuantificar la holgura mecánica de los ejes, antes y después del mantenimiento correctivo, mediante un indicador de carátula. Elaboración propia.

Tabla 1

Recorridos máximos medidos de los ejes del centro de maquinado Boxford 190 VMC.

Eje	Recorrido máximo medido	Método de medición	Incertidumbre estimada
X	188 mm	Metrología directa con vernier sobre el recorrido físico del carro	± 0.5 mm (resolución del instrumento)
Y	124 mm	Metrología directa con vernier sobre el recorrido físico de la mesa	± 0.3 mm (resolución del instrumento)
Z	98 mm	Metrología directa con vernier sobre el recorrido físico del cabezal	± 0.4 mm (resolución del instrumento)

Nota. Los recorridos se determinaron mediante metrología directa, utilizando un vernier, sobre el desplazamiento físico máximo de cada eje. La incertidumbre se debe a la resolución del instrumento utilizado. Elaboración propia.

Tabla 2

Comparación del backlash medido antes y después del mantenimiento correctivo.

Eje	Backlash inicial (semana 1)	Backlash final (semana 7)	Reducción observada	Incertidumbre instrumental
X	0.56 mm	0.18 mm	0.38 mm (67.8 %)	± 0.01 mm*
Y	0.45 mm	0.11 mm	0.34 mm (75.5 %)	± 0.01 mm*
Z	0.39 mm	0.12 mm	0.27 mm (69.2 %)	± 0.01 mm*

Nota. El backlash se midió con un indicador de carátula utilizando el mismo procedimiento experimental al inicio y al término del proyecto. La reducción porcentual corresponde a la disminución de la holgura mecánica obtenida mediante la limpieza, la lubricación y el ajuste de las cuñas de cada eje. Elaboración propia.

A modo de referencia comparativa, y sin que ello sustituya la caracterización directa de la unidad estudiada, la Tabla 3 recopila parámetros técnicos del sistema de accionamiento reportados por otros usuarios que han intervenido en este mismo modelo de máquina y documentados en foros técnicos especializados. Estos valores son útiles para dimensionar la propuesta de retrofitting de la siguiente sección y, en trabajos futuros, contrastar si la unidad de este estudio comparte la misma relación de transmisión y el mismo tipo de motor.

Tabla 3

Parámetros técnicos de referencia del sistema de accionamiento reportados para el modelo Boxford 190 VMC.

Parámetro del sistema de accionamiento	Valor reportado (mismo modelo)	Fuente
Motor paso a paso de eje Z	NEMA 23, 2.9 A, par de retención ≈ 1.48 N·m (modelo HY 200-2240-2.9)	MYCNCUK (s. f.-b)
Paso de husillo de bolas	≈ 2.5 mm/rev, con reducción por polea dentada HTD 3M	MYCNCUK (s. f.-b)
Resolución teórica por paso completo	0.0075–0.01 mm/paso, según relación de poleas (12/20 o 16/20 dientes)	MYCNCUK (s. f.-b)

Parámetro del sistema de accionamiento	Valor reportado (mismo modelo)	Fuente
Drivers originales	Etapas únicas de potencia en PCB, 2–2.5 A, medio paso/paso completo	MYCNCUK (s. f.-b)
Holgura mecánica en gibs (reportada por otros usuarios)	Ejes X/Y "muy difíciles de girar" hasta aflojar los gibs; se normaliza el movimiento tras el ajuste	MYCNCUK (s. f.-b)
Tarjeta de interfaz para retrofit de control	Mesa 7i96S + 7i84 (E/S adicional), con reutilización de drivers y motores originales	LinuxCNC Forum (2023)
Control de husillo en la arquitectura abierta	Relé de inversión de giro + relé de habilitación/freno + señal analógica 0–10 V de velocidad	LinuxCNC Forum (2023)

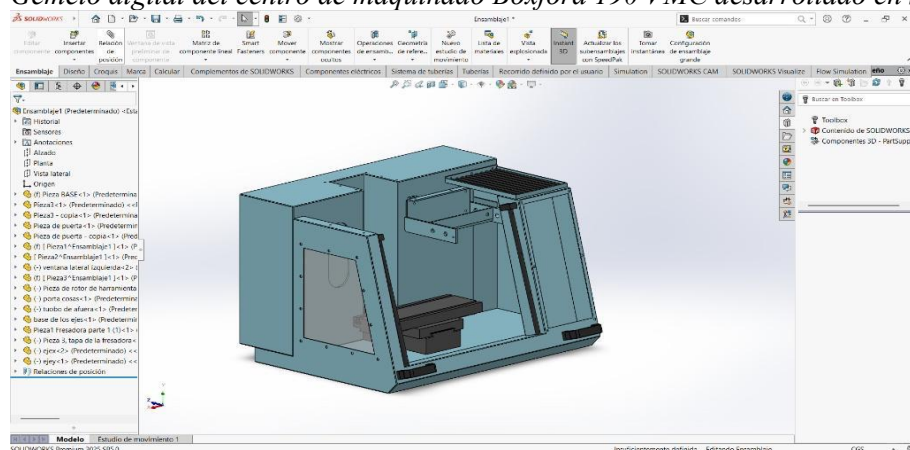
Nota. Información recopilada y organizada a partir de reportes técnicos publicados en MYCNCUK (s. f.-b) y en LinuxCNC Forum (2023). Elaboración propia con base en dichas fuentes.

Desarrollo del gemelo digital

A partir de la metrología y del registro fotográfico, se desarrolló un gemelo digital de la máquina en SolidWorks, como se muestra en la Figura 9, que integra la base principal, la columna vertical, la mesa de trabajo, el cabezal con el rotor de la herramienta, las guardas de acrílico y las cubiertas protectoras. El ensamble se relacionó mediante restricciones geométricas que permiten un estudio de movimiento, útil para verificar recorridos y detectar posibles colisiones entre componentes antes de intervenir en la máquina real.

Figura 9

Gemelo digital del centro de maquinado Boxford 190 VMC desarrollado en SolidWorks.



Nota. Modelo tridimensional utilizado para representar la geometría y cinemática de la máquina, empleado como herramienta de planificación para la propuesta de retrofitting. Elaboración propia.

Este modelo cumple una doble función dentro del proyecto: por un lado, sistematiza en un único artefacto digital la información dispersa recabada durante el desarmado; por otro, servirá como base de planificación para la fase de retrofitting, al permitir anticipar la ubicación física de la nueva tarjeta de control y de los drivers, así como el trazado de cableado, sin necesidad de mantener la máquina desarmada durante esa etapa de diseño.

Análisis de viabilidad del retrofitting

La viabilidad del retrofitting propuesto se sustenta en la evidencia cuantitativa y cualitativa presentada en la sección anterior, así como en la literatura técnica y académica consultada; el diseño detallado de ingeniería (dimensionamiento de drivers, selección final de la tarjeta de interfaz y programación del controlador) corresponde a una fase posterior. La Tabla 4 sintetiza los criterios considerados.

Tabla 4

Criterios considerados para evaluar la viabilidad del retrofitting propuesto.

Criterio de viabilidad	Evidencia cualitativa que lo respalda
Precedente técnico directo	Existen casos documentados de conversión de este mismo modelo de máquina (Boxford 190 VMC) a arquitecturas LinuxCNC con tarjeta de interfaz Mesa (p. ej., Mesa 7i96S),

Criterio de viabilidad	Evidencia cualitativa que lo respalda
	reportados por usuarios en foros técnicos especializados (MYCNCUK, LinuxCNC Forum).
Precedente académico	La literatura reporta retrofits exitosos de máquinas CNC obsoletas mediante controladores de arquitectura abierta y componentes de bajo costo (Quatrano et al., 2017; Herwan et al., 2019), lo que valida la ruta metodológica propuesta.
Estado mecánico conservado	La inspección física mostró husillos de bolas, guías lineales y la estructura de fundición en condiciones de servicio, por lo que el retrofitting puede limitarse al subsistema de control y a la electrónica, reduciendo el alcance técnico y el costo.
Trazabilidad de componentes originales	Los servomotores y actuadores documentados conservan placas de identificación legibles, lo que permite evaluar su reutilización o su sustitución dirigida sin desmontajes adicionales.
Disponibilidad de un gemelo digital	El modelo geométrico en SolidWorks permite planificar la integración física de la nueva electrónica (tarjeta Mesa, drivers) antes de intervenir en la máquina real, lo que reduce el riesgo de la intervención.
Coherencia con el enfoque de retrofitting	El caso es consistente con la literatura que define el retrofitting como una modernización evolutiva, de bajo costo y alcance acotado, preferible al reemplazo cuando la estructura mecánica permanece funcional (Niemeyer et al., 2020; Ilari et al., 2021).

Nota. La evaluación integra evidencia obtenida durante la ingeniería inversa y antecedentes reportados en la literatura científica y técnica sobre retrofitting de máquinas CNC. Elaboración propia con base en Niemeyer et al. (2020), Ilari et al. (2021), MYCNCUK (s. f.-b) y LinuxCNC Forum (2023).

En conjunto, estos elementos —la existencia de precedentes de conversión de este mismo modelo de máquina, el respaldo de casos académicos comparables, la condición de servicio de la estructura mecánica y la disponibilidad de un gemelo digital para planificar la intervención— constituyen, de manera cualitativa, un argumento consistente de que el retrofitting es una alternativa técnicamente razonable frente al reemplazo del equipo, en línea con lo señalado por Niemeyer et al. (2020) e Ilari et al. (2021) respecto a que el retrofitting resulta particularmente pertinente cuando la limitación de un equipo se concentra en su capa de control.

Aprendizaje y desarrollo de competencias

Más allá del resultado técnico, el proyecto permitió a los estudiantes participantes del Programa Delfin ejercitar un conjunto de competencias de ingeniería, cualitativamente mapeadas en la Tabla 5.

Tabla 5

Competencias de ingeniería desarrolladas durante el proyecto de ingeniería inversa y retrofitting.

Competencia de ingeniería	Actividad en el proyecto	Nivel (Bloom)	Evidencia
Ingeniería inversa	Desarmado sistemático, medición y documentación fotográfica de componentes mecánicos, eléctricos y de control.	Analizar	Registro
			fotográfico
			(89
			evidencias);
Modelado y representación técnica	Desarrollo del gemelo digital del centro de maquinado en SolidWorks (chasis, mesa, husillos, guardas).	Aplicar / Crear	manual
			original
			Ensamble
			CAD con estudio de movimiento
Conocimiento de arquitecturas de control industrial	Análisis comparativo entre el sistema de control propietario original y	Evaluar	Revisión
			documental

Competencia de ingeniería	Actividad en el proyecto	Nivel (Bloom)	Evidencia
	arquitecturas abiertas (LinuxCNC + Mesa).		técnica y bibliográfica
Gestión de activos y sostenibilidad	Evaluación cualitativa de retrofitting frente a reemplazo del equipo.	Evaluar	Análisis de brechas (gap analysis)
Innovación tecnológica aplicada	Propuesta de modernización del sistema de control con una arquitectura abierta para el futuro.	Crear	Propuesta técnica documentada

Nota. La clasificación se realizó de manera cualitativa, tomando como referencia la Taxonomía de Bloom, para relacionar las actividades desarrolladas con el nivel cognitivo alcanzado. Elaboración propia.

Este mapeo es de carácter conceptual y descriptivo: no se aplicaron instrumentos de medición del aprendizaje (por ejemplo, rúbricas pre y post), por lo que constituye una sistematización cualitativa de la experiencia formativa y no una medición del aprendizaje; se plantea como una línea de trabajo futura.

Discusión

Los hallazgos son consistentes con la literatura sobre retrofitting, que documenta que la obsolescencia de la maquinaria industrial suele originarse en la capa de control y comunicación, más que en la estructura mecánica (Niemeyer et al., 2020; Słowik & Sierocka, 2023), y que el retrofitting constituye una vía de modernización de bajo costo y alcance acotado frente al reemplazo (Ilari et al., 2021). El caso estudiado ilustra, además, un patrón observado en la literatura académica: la sustitución de sistemas de control propietarios obsoletos por arquitecturas abiertas de bajo costo ha sido reportada en máquinas CNC de características similares (Quatrano et al., 2017; Herwan et al., 2019), lo que otorga sustento adicional a la ruta de modernización basada en LinuxCNC y una tarjeta de interfaz Mesa propuesta para la siguiente fase de este proyecto.

Comparación con estudios previos de retrofitting

En comparación con Niemeyer et al. (2020), quienes proponen el retrofitting como una ruta de entrada a la Industria 4.0 para pequeñas y medianas empresas mediante cambios evolutivos y de bajo costo, este proyecto reproduce esa misma lógica evolutiva en un contexto educativo: se avanzó primero por la recuperación mecánica —de menor costo y riesgo— antes de abordar la sustitución del control, en lugar de intentar una intervención integral desde el inicio.

Frente a Quatrano et al. (2017), que retroadaptaron una máquina CNC considerada obsoleta mediante un controlador de lazo abierto basado en Arduino, conservando la estructura mecánica original, el caso aquí documentado comparte la misma estrategia general —conservar la mecánica y sustituir solo el control—, aunque la ruta de modernización planteada en este trabajo (LinuxCNC y tarjeta Mesa) corresponde a una arquitectura de control de lazo cerrado orientada a mayor precisión, en línea con lo reportado en conversiones de este mismo modelo de máquina (LinuxCNC Forum, 2023).

Herwan et al. (2019) reportan un resultado cuantitativo de desempeño directamente medible: una precisión del 88 % en la detección del desgaste de la herramienta mediante acelerometría y aprendizaje automático, tras retroadaptar un torno CNC antiguo. El presente estudio, al encontrarse en la fase de recuperación mecánica y documentación, aún no cuenta con un indicador de desempeño equivalente en la capa de control; su métrica cuantitativa comparable, en esta etapa, es la reducción del backlash mecánico registrada entre el diagnóstico inicial y el cierre del proyecto que se muestra en la Tabla 2, la cual desempeña un papel similar al de una línea base de precisión sobre la que la futura implementación de control deberá construirse y, eventualmente, mejorar.

Finalmente, en línea con el análisis de triple resultado de Ilari et al. (2021) entre el retrofitting inteligente y la compra de máquinas nuevas, la evidencia recabada en este caso —mecánica recuperable, motores con placas de identificación legibles y precedentes documentados de conversión exitosa del mismo modelo— refuerza la conclusión de que el retrofitting es, también en el contexto de un laboratorio universitario, una alternativa más favorable que el reemplazo del equipo.

Un hallazgo relevante de la fase de recuperación mecánica es que buena parte de la pérdida de precisión de la máquina no provenía únicamente de la antigüedad de su control, sino también de causas puramente mecánicas —grasas resacas, husillos sucios y cuñas mal ajustadas—, corregibles mediante limpieza,

relubricación y ajuste de tolerancias. Esto tiene una implicación práctica para otras instituciones con equipos similares: antes de invertir en un nuevo sistema de control electrónico, conviene recuperar primero la condición mecánica de la máquina, ya que una parte importante de la mejora de la precisión puede lograrse solo con un mantenimiento correctivo bien ejecutado.

Desde la perspectiva formativa, el proyecto es coherente con la literatura que señala que el aprendizaje basado en proyectos, aplicado sobre activos reales de la institución, fortalece competencias técnicas y de innovación que son difíciles de desarrollar mediante prácticas simuladas o de corta duración (Misoc et al., 2015; Delgado Arcos et al., 2026). La ingeniería inversa, en particular, resultó ser tanto un método de documentación técnica como un vehículo formativo en sí mismo, al exigir a los estudiantes comprender de manera profunda un sistema del que no existía documentación de ingeniería completa.

En términos de impacto social, la metodología documentada es directamente replicable en las universidades tecnológicas y politécnicas de América Latina que conservan maquinaria CNC en condiciones similares, lo que permite recuperar infraestructura formativa con una inversión mínima y ampliar el acceso de los estudiantes a experiencias reales de manufactura programada, en consonancia con los ODS 4, 9 y 12.

Limitaciones del estudio

Entre las limitaciones del estudio se encuentra su carácter predominantemente cualitativo y documental, con mediciones cuantitativas acotadas a los recorridos por eje y al backlash mecánico: no se realizaron mediciones eléctricas ni pruebas funcionales de los componentes de control, y la evaluación de la viabilidad de la arquitectura de control abierta se basa en evidencia documental y en precedentes técnicos, sin constituir aún un diseño de ingeniería detallado. Asimismo, el proyecto se ha desarrollado hasta la fase de documentación, y modelado; la implementación física de la nueva arquitectura de control no ha sido ejecutada.

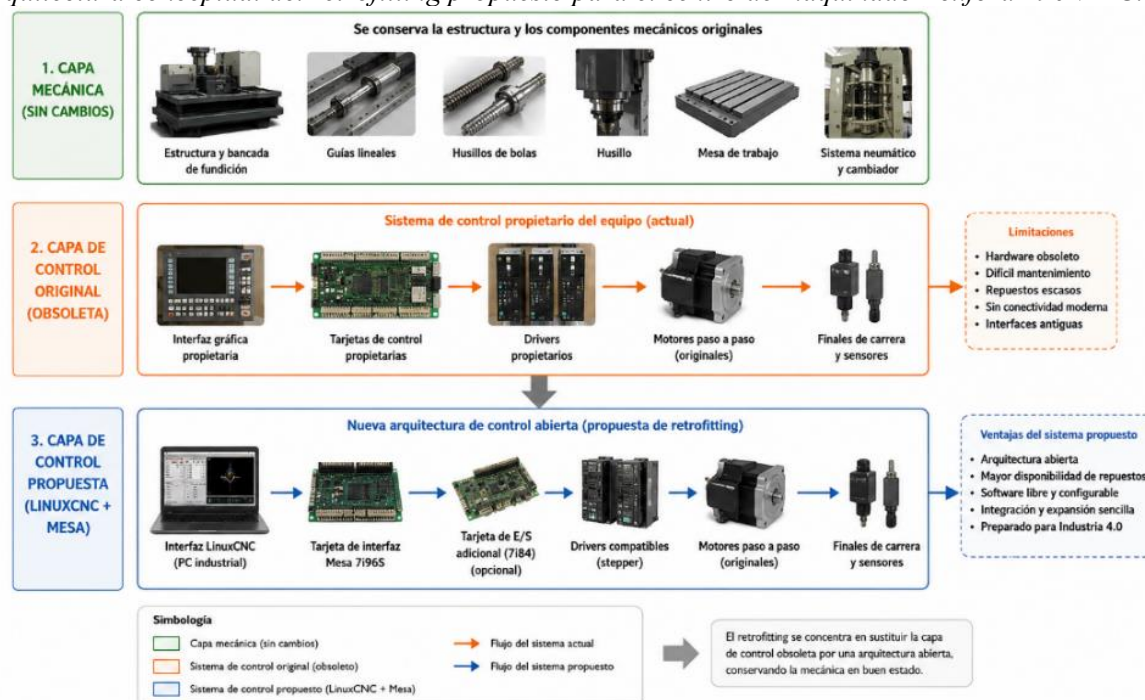
Propuesta de trabajo a futuro

A partir de la documentación generada, la siguiente fase del proyecto contempla la implementación de una arquitectura de control abierta basada en LinuxCNC y una tarjeta de interfaz Mesa, en sustitución de las tarjetas de control propietarias documentadas en el diagnóstico. Esta ruta se justifica técnicamente por la existencia de precedentes documentados de la conversión de este mismo modelo de máquina a

esta arquitectura, así como por el respaldo de la literatura académica sobre retrofits de máquinas CNC mediante controladores de arquitectura abierta. La arquitectura conceptual propuesta se presenta en la Figura 10.

Figura 10

Arquitectura conceptual del retrofitting propuesto para el centro de maquinado Boxford 190 VMC.



Nota. Esquema conceptual que muestra la sustitución de la arquitectura de control propietaria por una solución basada en LinuxCNC y en una tarjeta de interfaz Mesa, conservando la estructura mecánica original. Elaboración propia.

Un caso documentado en el foro oficial de LinuxCNC reporta la conversión de un Boxford 190 VMC utilizando una tarjeta Mesa7i96S combinada con una tarjeta de entradas/salidas adicionales 7i84, conservando los drivers y los motores paso a paso originales de la máquina —es decir, sin necesidad de sustituir el sistema de accionamiento mecánico ya documentado en este trabajo—. En ese caso se implementaron con éxito los finales de carrera (homing) de los tres ejes y el control completo del husillo, incluyendo arranque, paro, cambio de sentido de giro y variación de velocidad, mediante un esquema de relé de inversión de giro, un relé de habilitación/freno y una señal analógica de 0 a 10 V para la consigna de velocidad (LinuxCNC Forum, 2023). Un segundo usuario del mismo hilo (depronman) confirmó de forma independiente tener una unidad Boxford VMC190 convertida a LinuxCNC en

funcionamiento estable, señalando además que la conveniencia del cambio de herramienta bajo esta arquitectura reduce la necesidad de un cambiador automático de herramientas.

Por su parte, un hilo de conversión de este mismo modelo en el foro MYCNCUK (s. f.-b) documenta parámetros técnicos del sistema de accionamiento que resultan directamente relevantes para dimensionar la propuesta: motores paso a paso NEMA 23 (por ejemplo, modelo HY 200-2240-2.9, 2.9 A, con un par de retención aproximado de 1.48 N·m), husillos de bolas con un paso aproximado de 2.5 mm por vuelta, transmitidos mediante poleas dentadas y banda HTD de 3 mm de paso, con relaciones de transmisión que producen una resolución teórica de entre 0.0075 y 0.01 mm por paso completo del motor, según la relación de poleas instalada (12/20 o 16/20 dientes). Ese mismo reporte describe ejes que giraban con gran dificultad hasta aflojar los gibs, y que recuperaron un movimiento adecuado tras el ajuste —una observación consistente con el hallazgo de este proyecto de que buena parte de la pérdida de precisión tenía origen mecánico y no solo electrónico—. Estos valores se presentan en la Tabla 3 como referencia técnica y deberán confirmarse contra los componentes reales de la unidad estudiada antes de dimensionar los drivers de la nueva arquitectura.

El alcance previsto para esta fase futura incluye: (a) la adquisición e instalación de una tarjeta de interfaz Mesa (por ejemplo, 7i96S, con una tarjeta de expansión de E/S si el número de señales lo requiere) en sustitución de las tarjetas de control propietarias documentadas en el diagnóstico, conservando en la medida de lo posible los drivers y motores originales, siguiendo el precedente reportado para este mismo modelo de máquina; (b) la implementación de los finales de carrera y el control del husillo (giro, sentido y velocidad) mediante el esquema de relés y señal analógica ya validado en la literatura técnica consultada; (c) la migración de la interfaz de usuario y del intérprete de trayectorias hacia LinuxCNC; y (d) el uso del gemelo digital desarrollado en SolidWorks como herramienta de planificación para la ubicación física de los nuevos componentes electrónicos y el trazado del cableado. Se enfatiza que esta fase constituye trabajo futuro: su alcance ha quedado definido y justificado técnicamente en el presente estudio, pero aún no ha sido implementado ni evaluado experimentalmente.

CONCLUSIONES

Mediante ingeniería inversa se documentaron los componentes mecánicos, eléctricos, de control y neumáticos del centro de maquinado CNC Boxford 190 VMC, lo que evidencia que su antigüedad

funcional se concentra en la capa de control y no en su estructura mecánica. A partir de esa documentación, se ejecutó un proceso de mantenimiento correctivo, ajuste de tolerancias y calibración que recuperó la suavidad de movimiento de los ejes y redujo la holgura mecánica (backlash) respecto de la condición inicial, confirmando que gran parte de la pérdida de precisión de la máquina tenía origen mecánico y no solo electrónico. Esta documentación se sistematizó, además, en un gemelo digital desarrollado en SolidWorks, que representa fielmente la geometría y la cinemática de la máquina y servirá como herramienta de planificación para la fase de retrofitting del control.

A partir de la evidencia recabada —el estado de la mecánica, la reducción medida del backlash, la trazabilidad de los componentes originales, la disponibilidad del gemelo digital y, en particular, la existencia de precedentes técnicos y académicos de conversiones equivalentes— se sostiene que es viable proponer un retrofitting basado en una arquitectura de control abierta (LinuxCNC y tarjeta de interfaz Mesa), el cual se plantea como la siguiente fase de trabajo del proyecto.

El proyecto permitió, además, que los estudiantes participantes ejercitaran competencias de ingeniería inversa, conocimiento de arquitecturas de control industrial, gestión de activos y capacidad de innovación tecnológica aplicada, en un contexto de aprendizaje basado en un problema real de su institución. La experiencia muestra que la documentación estructurada mediante ingeniería inversa constituye una metodología viable y formativa para abordar, de manera responsable y fundamentada, la modernización de maquinaria industrial en contextos educativos, y sienta las bases técnicas para la fase de implementación electrónica que se propone como trabajo futuro.

Contribución de los autores (CRediT)

Roberto Cristian: validación y redacción. Carol Elissett Colin Velázquez y Cristian Jesus Ortiz Reyes: conceptualización, investigación, análisis formal y redacción (borrador original). Maythe Joseline Erasto González: investigación, curación de datos y visualización (modelado en SolidWorks). Randy Delgado: supervisión, validación y redacción (revisión y edición).

Financiamiento

No está financiado.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de interés.



Agradecimientos

Los autores y estudiantes del programa Delfin expresan su más sincero agradecimiento a la Universidad Tecnológica de Tecamachalco por el apoyo y colaboración brindados durante el proyecto, facilitando el acceso al laboratorio y al centro de maquinado Boxford 190 VMC empleado en este estudio. Su compromiso con la excelencia y la educación permitió concluir satisfactoriamente el proyecto de investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aeromaquinados. (2025, 17 de septiembre). *Mantenimiento a máquinas CNC: Tipos, frecuencia y ventajas*. <https://aeromaquinados.com/mantenimiento-a-maquinas-cnc/>
- Al-Maenei, S. S. H., Kuhnhen, C., Engel, B., & Schiller, M. (2020). Smart retrofitting of machine tools in the context of industry 4.0. *Procedia CIRP*, 88, 369-374. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.064>
- Delgado Arcos, R. C., Blanco Flores, L. R., Rodríguez Centeno, D., & Andrade Rodríguez, H. (2026). Evaluación técnica y formativa de una microinfraestructura fotovoltaica off-grid como laboratorio vivo en una universidad tecnológica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 10(2), 9404-9418. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v10i2.23947
- García-Rodríguez de Guzmán, I., Polo, M., & Piattini, M. (2004). Estado del arte de la reingeniería y la ingeniería inversa: 2001–2003. En *Actas de las JIISIC 2004*. <http://www.grise.upm.es/rearviewmirror/conferencias/jiisic04/Papers/30.pdf>
- Herwan, J., Kano, S., Ryabov, O., Sawada, H., Kasashima, N., & Misaka, T. (2019). Retrofitting old CNC turning with an accelerometer at a remote location towards Industry 4.0. *Manufacturing Letters*, 21, 56-59. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2019.08.001>
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design science in information systems research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75-106. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Ilari, S., Di Carlo, F., Ciarapica, F. E., & Bevilacqua, M. (2021). Machine tool transition from Industry 3.0 to 4.0: A comparison between old machine retrofitting and the purchase of new machines from a triple bottom line perspective. *Sustainability*, 13(18), 10441. <https://doi.org/10.3390/su131810441>



Lincoln, Y. S., & Guba, E. G. (1985). *Naturalistic inquiry*. SAGE Publications.

LinuxCNC Forum. (2023, 15 de junio). *Boxford 190VMC conversion with Mesa 7i96S* [Hilo de foro].

Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://forum.linuxcnc.org/12-milling/49338-boxford-190vmc-conversion-with-mesa-7i96s>

Mantenimiento Industrial Saltillo. (s. f.). *Guía completa del mantenimiento de máquinas CNC:*

Preventivo, correctivo y predictivo. Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://mantenimientoindustrialmexico.com/guia-completa-del-mantenimiento-de-maquinas-cnc-preventivo-correctivo-y-predictivo/>

Misoc, F., Ball, T., & Asgill, A. (2015). Project-based curriculum for renewable energy engineering technology. En *2015 ASEE Annual Conference & Exposition* (pp. 1-12). ASEE.

<https://doi.org/10.18260/1-2--22379>

MMS México. (2026, 23 de febrero). *Gemelos digitales avanzados en máquinas-herramienta*.

Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://www.mmsmexico.com/articulos/gemelos-digitales-avanzados-en-maquinas-herramienta>

MYCNCUK. (s. f.-a). *Advice needed, converting a Boxford VMC 190*. Recuperado el 3 de julio de 2026,

de <https://www.mycncuk.com/archive/index.php/t-7750.html>

MYCNCUK. (s. f.-b). *CONVERSION: Boxford VMC 190*. Recuperado el 3 de julio de 2026, de

<https://www.mycncuk.com/threads/10394-Boxford-VMC-190>

Naciones Unidas. (2015). *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*.

<https://sdgs.un.org/es/2030agenda>

Niemeyer, C. L., Gehrke, I., Müller, K., Küsters, D., & Gries, T. (2020). Getting small medium enterprises started on Industry 4.0 using retrofitting solutions. *Procedia Manufacturing*, 45, 208-

214. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.04.096>

Quatrano, A., De Simone, M. C., Rivera, Z. B., & Guida, D. (2017). Development and implementation of a control system for a retrofitted CNC machine by using Arduino. *FME Transactions*, 45(4),

565-571. <https://doi.org/10.5937/fmet1704565Q>

- SD Industrial. (2023, 21 de junio). *Retrofitting: ¿Qué es y cuáles son sus beneficios?* Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://sdindustrial.com.mx/blog/retrofitting-transformando-la-industria-a-traves-de-la-modernizacion/>
- Serra Ruiz, J. (2021, 5 de octubre). *Técnicas y herramientas de la ingeniería inversa*. Tecnología++. Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://blogs.uoc.edu/informatica/es/ingenieria-inversa-que-es-herramientas-y-tecnicas>
- Siemens. (s. f.). *Ingeniería inversa*. Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://www.siemens.com/es-mx/technology/reverse-engineering/>
- Słowik, M., & Sierocka, H. (2023). Manufacturing equipment retrofitting towards Industry 4.0 standards – A systematic overview of the literature. *Engineering Management in Production and Services*, 15(3), 14-26. <https://doi.org/10.2478/emj-2023-0017>
- Stake, R. E. (1995). *The art of case study research*. SAGE Publications.
- Universidad Distrital. (s. f.). *Desarrollo del gemelo digital para una máquina de medición por coordenadas (CMM)* [Repositorio institucional]. Recuperado el 3 de julio de 2026, de <https://repository.udistrital.edu.co/items/72234bcc-8a39-43ac-be6e-751e2fc9443f>