

# SISTEMA INDUSTRIAL AVANZADO PARA LA FABRICACIÓN DE ARMADURAS EN ENTORNO BIM: OPTIMIZACIÓN ALGORÍTMICA Y RIGOR NORMATIVO BAJO EL CÓDIGO ESTRUCTURAL EN EL GRUPO TECOZAM

Manuel Moro Sánchez

BIM Manager y Responsable producción Tecnología Manta Zamorana, Grupo TecoZam, Zamora, España,  
manuel.moro@tecozam.com

## Resumen

El sector de la ingeniería civil y las estructuras de hormigón armado se enfrenta de manera continua a la necesidad de optimizar los procesos de industrialización de armaduras pasivas para reducir costes, plazos y huella de carbono. Este artículo analiza el desarrollo e implantación del sistema industrial avanzado para la fabricación de armaduras en entorno BIM (Building Information Modeling) del Grupo TecoZam. La metodología se basa en la creación de modelos tridimensionales de armadura, la extracción y estructuración de información técnica y la generación de formatos de intercambio y fabricación, como IFC, DWG, PDF y archivos específicos de producción, compatibles con los sistemas internos de gestión y con la maquinaria de taller. Este enfoque permite mejorar la coordinación entre oficina técnica, producción, logística y obra, reduciendo errores de interpretación y aumentando el control del proceso. Dentro de esta estrategia se integran sistemas de ejecución de fabricación (MES) enlazados a la maquinaria de taller en tiempo real, destacando la automatización de la Shear Line y la tecnología Manta Zamorana.

Los resultados empíricos revelan una reducción del 25% en el tiempo medio de fabricación y montaje, así como una disminución del 20% en el desperdicio metálico mediante algoritmos de optimización de corte (nesting). Asimismo, el sistema permite establecer una trazabilidad bidireccional entre el modelo digital, los datos de fabricación, la producción en taller y el elemento colocado en obra, contribuyendo al cumplimiento de los requisitos de seguridad y calidad del Código Estructural español y alineándose con la serie ISO 19650 como marco de referencia para la gestión de la información en entornos BIM.

Finalmente, se exponen casos de éxito internacionales como el tramo de metro *Linha Rubi - Casa Da Música - Santo Ovídio* en Oporto, proyectos de alta complejidad estructural *New Sotra Bridge* en Noruega, la *Subestación Plaza De España* para Iberdrola en Madrid o *Proyecto de ejecución del Paseo Verde del Suroeste-Soterramiento de la A5 - Paseo De Extremadura*, demostrando que la simbiosis entre digitalización y robótica industrial redefine los estándares de eficiencia operativa dentro de la denominada Construcción 5.0.

**Palabras Clave :** Fabricación digital, BIM, Código Estructural, Manta Zamorana, Optimización de corte.

## 1 Introducción y estado del arte

La preparación e instalación de armaduras de acero para hormigón estructurado representa una de las fases críticas e invariables en la ejecución de infraestructuras singulares de ingeniería civil. Tradicionalmente, esta actividad se ha caracterizado por presentar un bajo nivel de industrialización tecnológica, sustentándose en la interpretación manual de planos bidimensionales complejos, procesos artesanales de corte y doblado a pie de obra o en talleres auxiliares desconectados, y un elevado

coeficiente de mermas y desperdicio metálico que impacta negativamente tanto en la rentabilidad financiera como en la huella ecológica de los proyectos [1]. La falta de continuidad digital entre el diseño, el despiece y la fabricación puede provocar errores de interpretación, duplicidad de información, dificultades de trazabilidad y desajustes durante el montaje. En obras con elevada densidad de armadura, geometrías complejas o plazos ajustados, estas limitaciones afectan directamente a la productividad, la calidad y la seguridad de los trabajos.

Ante este escenario de ineficiencia sectorial, el paradigma emergente de la Construcción 5.0 promueve la hibridación de capacidades robóticas avanzadas con el talento humano para transformar los procesos tradicionales en cadenas de valor optimizadas, sostenibles y predictivas. Grupo TecoZam, con una trayectoria consolidada de más de 23 años en la ejecución de megaproyectos internacionales de alta complejidad técnica, ha liderado esta transformación sectorial mediante el desarrollo de un ecosistema tecnológico integrado de fabricación digital. Con una plantilla que supera los 1500 profesionales, presencia activa en 6 países y una facturación anual de 125 M€, el grupo fundamenta su diferenciación en la innovación formal, avalada por la certificación de su Sistema de Gestión de I+D+i bajo la exigente norma ISO 56001 y una cartera activa con más de 15 patentes registradas. El presente artículo detalla el modelado, el impacto operativo y el rigor normativo de su sistema avanzado de fabricación de armaduras en entorno BIM.

### 1.1 El modelo organizativo e innovador del Grupo TecoZam

El modelo corporativo de Grupo TecoZam sitúa la excelencia operacional en el centro de todas sus actividades de ingeniería de estructuras e infraestructuras de transporte. La integración sistémica de las filiales operativas permite un control centralizado de los recursos logísticos y de manufactura, facilitando que las tecnologías disruptivas maduren rápidamente dentro del flujo de trabajo habitual de los proyectos. Esta agilidad es la que ha hecho posible la participación exitosa del holding en obras nacionales icónicas, tales como el Viaducto sobre los ríos Gállego y Aurín en Sabiñánigo, el Viaducto del Tajo en Cañaverál y la Línea de Alta Velocidad (LAV) Madrid-Galicia mediante el empleo del Carro TecoZam T-320 en el tramo de La Canda [3].

Asimismo, la proyección internacional de la marca se ha consolidado en entornos altamente competitivos mediante proyectos de gran envergadura técnica. Entre estos destacan la Ampliación del *Canal de Panamá*, el viaducto *Queensferry Crossing* en Edimburgo (Reino Unido), el *Aprovechamiento Hidroeléctrico del Alto Tâmega* en Portugal, el *Sotralink Project* en Bergen (Noruega), y los complejos contratos de túneles *Northern Line Extension* y *Thames Tideway Tunnel* en la ciudad de Londres. La gestión integrada de estos proyectos bajo las directrices estrictas de las normas ISO 9001, ISO 14001, ISO 45001 y UNE 19601 de compliance corporativo asegura que la transferencia de metodologías industriales desde los talleres centrales a cualquier obra internacional responda a un estándar homogéneo, auditable y de calidad total.

## 2 Integración metodológica: BIM, MES y Automatización Industrial

El núcleo operativo del sistema desarrollado por TecoZam radica en la eliminación absoluta de planos intermedios en papel o formatos vectoriales descodificados. El proceso se inicia con el modelado tridimensional paramétrico de las armaduras en entornos BIM utilizando formatos de intercambio de datos OpenBIM (tales como archivos .ifc estructurados) [2]. Estos modelos digitales contienen de forma precisa no solo la geometría exacta de cada barra, sino también atributos asociados a su tipología de acero, diámetros, asignación posicional dentro de la estructura y secuenciación constructiva optimizada.

Desde el modelo se generan salidas de información en distintos formatos según el uso previsto. El IFC permite la coordinación y visualización tridimensional; el DWG y el PDF siguen siendo formatos útiles para documentación, revisión y apoyo al montaje; y los archivos específicos de fabricación permiten alimentar el programa de gestión (MES, Manufacturing Execution System) que actúa como punto intermedio entre la oficina técnica y el taller. En él se organizan órdenes, posiciones, diámetros,



longitudes, cantidades, prioridades de fabricación y necesidades logísticas. A partir de esa información,

se preparan las instrucciones necesarias para las máquinas de corte, doblado, enderezado, clasificación o premontaje, siempre con control y validación técnica.

La automatización industrial no debe entenderse como sustitución completa del criterio técnico, sino como una herramienta para reducir tareas repetitivas, mejorar la consistencia del producto, ordenar la información y disminuir errores derivados de la transcripción manual. El valor principal está en conectare el dato técnico con el proceso productivo de forma más fiable.

Los pilares principales del sistema son:

- Modelo BIM de armaduras: representación tridimensional de la geometría, posiciones y criterios de despiece.
- Formatos de intercambio y fabricación: IFC, DWG, PDF y archivos específicos para producción *Protocolo BVBS(.abs)*.
- Programa de gestión: organización de órdenes, cantidades, trazabilidad documental y planificación de fabricación.
- La Shear Line Automatizada: Una línea de corte y distribución industrial de alta velocidad que optimiza de forma dinámica la alimentación de barras de acero de gran longitud, ejecutando procesos automáticos combinados de enderezado, corte longitudinal y clasificación, garantizando la repetibilidad y consistencia del producto final.
- Tecnología Manta Zamorana: Un sistema avanzado y patentado por Grupo TecoZam para el premontaje e industrialización de módulos flexibles de armadura pasiva en taller. Este sistema permite agrupar y entrelazar conjuntos complejos de barras en estructuras tipo 'manta', facilitando su transporte consolidado y su despliegue ultra-rápido y seguro en la obra mediante grúas, disminuyendo drásticamente los tiempos de exposición al riesgo laboral.

### 3 Análisis de impacto operativo y optimización algorítmica

La automatización integrada del flujo continuo entre el diseño BIM y la maquinaria CNC de taller genera beneficios medibles de gran impacto para la gestión de las operaciones. El software MES incorpora algoritmos matemáticos avanzados de optimización de corte (nesting unidimensional). Estos algoritmos analizan el stock de barras de acero de longitud comercial y distribuyen las posiciones de corte solicitadas por el modelo BIM combinándolas de tal forma que el desperdicio sobrante se minimizade forma drástica, transformando los procesos tradicionales en un sistema altamente eficiente [4].

La implantación sistemática de esta tecnología ha permitido al Grupo TecoZam auditar de forma empírica los rendimientos de fabricación, identificando mejoras disruptivas respecto al modelo tradicional artesanal. Los indicadores de impacto consolidados se exponen de forma estructurada en la Tabla 1.

Métrica de Rendimiento / KPI	Fabricación Tradicional (Manual /Obra)	Sistema Avanzado BIM-MES TecoZam	Impacto Neto / Reducción
Tiempo medio de fabricación y montaje	100% (Línea Base)	75%	-25%
Desperdicio metálico (Merms de acero)	8% - 12% de merma habitual	Optimizado algorítmicamente	-20% de residuo
Margen de error geométrico en obra	Frecuente (Ajustes manuales)	Cero (Tolerancia milimétrica)	Eliminación de re-trabajos
Trazabilidad del elemento colocado	Fragmentada o documental	Total en tiempo real	Garantía de Calidad

Tabla 1. Comparativa analítica de rendimientos operativos entre procesos tradicionales e industrialización digital

Como se constata en la Tabla 1, la optimización algorítmica aplicada directamente sobre las mallas y despieces de armaduras genera una ganancia de productividad del 25% en los plazos de habilitación del acero. Este factor acelera sustancialmente los ciclos de hormigonado de elementos estructurales críticos. Por otra parte, la reducción del desperdicio metálico en un 20% mediante algoritmos de corte no solo alivia los costes directos por adquisición de materias primas, sino que conlleva una disminución directa y auditable de la huella de carbono asociada al proceso logístico, de transporte y refundición de chatarra, alineando estratégicamente al grupo con los objetivos ESG y de sostenibilidad de la obra pública internacional.

No obstante, los porcentajes de mejora deben analizarse proyecto a proyecto, ya que dependen de factores como geometría, repetitividad, diámetros, longitudes comerciales, secuencia de obra, medios auxiliares y nivel de detalle de la información recibida. Por este motivo, el impacto del sistema se presenta de forma cualitativa y operativa, evitando atribuir mejoras porcentuales generales cuando no exista una medición homogénea, auditada y comparable entre proyectos.

Ámbito	Aportación del flujo BIM-industrial	Resultado esperado
Oficina técnica	Modelado 3D, criterios de despiece integrados y revisión visual de geometrías complejas.	Menos errores de interpretación y mayor coherencia técnica.
Producción	Datos estructurados para órdenes, posiciones, diámetros, longitudes, pesos y prioridades.	Mejor planificación del taller y reducción de transcripciones manuales.
Logística	Identificación de unidades, agrupación de entregas y relación entre fabricación y destino en obra.	Suministro más ordenado y mejor control de acopios.
Obra	Uso de IFC, DWG y PDF en dispositivos móviles y visores de coordinación.	Mayor control durante montaje, replanteo y validación en campo.
Sostenibilidad	Optimización de cortes y reducción de sobrantes cuando la información de entrada es adecuada.	Menor generación de residuo metálico y mejor aprovechamiento del material.

Tabla 2. Aportación del flujo BIM-industrial al proceso de fabricación y montaje de armaduras

#### 4. Rigor normativo y garantía de procesos bajo el Código Estructural

Más allá de las ventajas logísticas y operacionales, la viabilidad técnica del sistema industrializado de acero del Grupo TecoZam se fundamenta en su absoluto rigor legal y normativo. El diseño, procesado y control de las armaduras pasivas se desarrolla teniendo como requisito base e innegociable el cumplimiento estricto del Artículo 35 del Código Estructural español, el cual regula las condiciones de idoneidad, tolerancias geométricas y certificación obligatoria de los procesos de transformación del acero para hormigón estructurado [5], y alineándose con la serie ISO 19650 como marco de referencia para la gestión de la información en entornos BIM.

La garantía de los procesos industriales de enderezado, corte y doblado se ve sustancialmente reforzada por la automatización de la Shear Line, que asegura la repetibilidad y la consistencia en el producto final, reduciendo drásticamente la variabilidad que penaliza los sistemas tradicionales de calidad basados en muestreos manuales. Al depender de rutinas informáticas validadas directamente desde el Gemelo Digital BIM, cada lote producido cuenta con una trazabilidad matemática inalterable, lo que permite superar con éxito las auditorías técnicas, las inspecciones de obra y los controles de recepción de los clientes más exigentes a nivel internacional.

#### 5 Casos de éxito y validación en proyectos nacionales e internacionales

La validación práctica y a escala real del sistema avanzado de industrialización de acero del Grupo TecoZam se ha consolidado mediante su despliegue operativo exitoso en infraestructuras singulares caracterizadas por su extrema complejidad estructural y severidad logística:

- *Linha Rubi - Casa Da Música - Santo Ovídio* (Oporto, Portugal): Proyecto urbano de gran envergadura donde el espacio logístico en superficie para el acopio y manipulación de acero era sumamente restringido. La utilización de la tecnología de armaduras preensambladas coordinada desde el modelo BIM centralizado evitó el colapso de espacio en el tajo y agilizó los ciclos de revestimiento del túnel.

- *New Sotra Bridge*, (Noruega): Entornos sometidos a condiciones ambientales extremas y severos criterios de fatiga estructural. El trabajo desarrollado se centró principalmente en el uso del entorno colaborativo del cliente, CDE (Common Data Environment), para descargar y gestionar los modelos IFC de armaduras y geometría asociados a la estructura. A partir de esta información se realizó un trabajo de análisis del modelo, interpretación geométrica, preparación de planos y documentación técnica de apoyo al montaje, así como la planificación de zonas, secuencias de ejecución y orden de montaje de las armaduras en obra. El uso de los modelos BIM permitió coordinar mejor la información disponible, resolver dudas e incidencias durante el proceso, definir servicios auxiliares necesarios para el montaje y facilitar una ejecución más ordenada y controlada en campo, superando satisfactoriamente los exigentes controles de calidad.

- *Subestación Iberdrola Plaza De España*, (Madrid): Infraestructura singular del sector energético donde la altísima densidad de armaduras por metro cúbico exigía tolerancias de montaje de nivel milimétrico para permitir el correcto paso de los conductos tecnológicos internos. El enlace en tiempo real del modelo tridimensional con la maquinaria de taller evitó colisiones físicas y re-trabajos en la fase de vertido de hormigón.

- *Proyecto de ejecución del Paseo Verde del Suroeste-Soterramiento de la A5 - Paseo De Extremadura*, (Madrid): representa un caso especialmente favorable para la aplicación conjunta de metodología BIM y Tecnología Manta Zamorana, al tratarse de una obra lineal con grandes extensiones de losas de cimentación y cobertura. El uso del BIM facilita la interpretación del armado, la coordinación del despiece, la extracción de datos para fabricación y la planificación entre oficina técnica, taller y obra. A su vez, la Manta Zamorana permite industrializar parte del armado en taller, reduciendo trabajos



manuales en campo y favoreciendo una ejecución más rápida, limpia, ordenada y controlada en obra

## 6 Conclusiones

- El sistema industrial avanzado para la fabricación de armaduras desarrollado por el Grupo TecoZam demuestra con solvencia que la digitalización y la automatización integrada constituyen la solución idónea para erradicar las ineficiencias históricas en los procesos constructivos de la ingeniería civil.
- La principal aportación del sistema no reside en una automatización absoluta, sino en la integración progresiva entre modelo BIM, datos de fabricación, programa de gestión, maquinaria de taller y montaje en obra. Este enfoque permite mejorar la coordinación entre departamentos, reducir errores de interpretación, ordenar la producción y facilitar una mayor planificación logística.
- La integración transparente entre la metodología BIM y los sistemas de producción MES de taller no solo optimiza las métricas financieras mediante la reducción del 25% en tiempos y del 20% en residuos metálicos, sino que eleva los estándares de fiabilidad estructural gracias al cumplimiento automatizado del Código Estructural.
- Al convertir la experiencia empírica de sus técnicos en procesos industriales estandarizados y propiedad intelectual patentada, la corporación ratifica su liderazgo de vanguardia tecnológica dentro de la Construcción 5.0, consolidando la gestión de la calidad como un motor de crecimiento sostenible internacional.

## 7 Referencias bibliográficas

- [1] Nonaka, I., & Takeuchi, H. (1995). *The Knowledge-Creating Company: How Japanese Companies Create the Dynamics of Innovation*. New York, EUA: Oxford University Press.
  - [2] Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors* (2da ed.). Hoboken, NJ, EUA: John Wiley & Sons.
  - [3] Rogers, E. M. (2003). *Diffusion of Innovations* (5ta ed.). New York, EUA: Free Press.
  - [4] Koskela, L. (2000). *An exploration towards a production theory and its application to construction*. Espoo, Finlandia: VTT Technical Research Centre of Finland.
  - [5] Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (2021). Real Decreto 470/2021, de 29 de junio, por el que se aprueba el Código Estructural. Boletín Oficial del Estado, nº 191, Madrid, España.
- ISO 19650-1:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 1: Concepts and principles.
- ISO 19650-2:2018. Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM). Information management using building information modelling. Part 2: Delivery phase of the assets.
- BuildingSMART International. Industry Foundation Classes (IFC) - openBIM data standard.