

# Optimización del Control y la Gestión de Datos en una Celda de Manufactura Flexible a través de una Base de Datos Orientada a Grafos.

Isabella Ceballos Sánchez.  
Juan José Restrepo Rosero.

Director:  
Juan David Contreras Pérez.

Co-Directora:  
Dr. María Constanza Pabón Burbano.



Pontificia Universidad Javeriana de Cali  
Facultad de Ingeniería y Ciencias  
Programa de Ingeniería Electrónica  
Anteproyecto de Grado  
13 de octubre de 2023

Santiago de Cali, 13 de octubre de 2023.

Señores,  
**Pontificia Universidad Javeriana - Cali**  
Dr. Luis Eduardo Tobón Llanos  
Director de Carrera de Ingeniería Electrónica  
Cali.

Cordial Saludo,

Por medio de la presente nos permitimos informarles que los estudiantes de Ingeniería Electrónica, Isabella Ceballos Sánchez (cod: 8946329) y Juan José Restrepo Rosero (cod: 8939280), trabajan bajo nuestra dirección y co-dirección en el proyecto de grado titulado “Mejoramiento del proceso de control, monitoreo y trazabilidad de datos de una celda de manufactura flexible, mediante el uso de base de datos orientada a grafos”

Atentamente,



---

Juan David Contreras Pérez.



---

Dr. María Constanza Pabón Burbano.

Santiago de Cali, 13 de octubre de 2023.

Señores,

**Pontificia Universidad Javeriana - Cali**

Dr. Luis Eduardo Tobón Llanos

Director de Carrera de Ingeniería Electrónica  
Cali.

Cordial Saludo.

Nos permitimos presentar a su consideración el proyecto de grado titulado “Mejoramiento del proceso de control, monitoreo y trazabilidad de datos de una celda de manufactura flexible, mediante el uso de base de datos orientada a grafos” con el fin de cumplir con los requisitos exigidos por la Universidad y optar al título Profesional en Ingeniería Electrónica.

Al firmar aquí, damos fe que entendemos y conocemos las directrices para la presentación de trabajos de grado de la Facultad de Ingeniería y Ciencias aprobadas el 26 de Noviembre de 2009, donde se establecen los plazos y normas para el desarrollo del anteproyecto y del trabajo de grado.

Atentamente,

Isabella Ceballos S.

Isabella Ceballos Sánchez

Código: 8946329

Juan José Restrepo R.

Juan José Restrepo Rosero

Código: 8939280

## Resumen

Hoy en día, existe un gran interés en las empresas e industrias del país por desarrollar métodos de optimización, control, manejo y análisis de datos, para predecir y obtener un mejor resultado en los procesos de operación para la fabricación de productos. Los actuales sistemas de gestión de bases de datos (DBMS) desempeñan el papel de organizar los datos de manera eficiente y eficaz. Sin embargo, entre los desarrollos aplicados, sigue existiendo un factor importante relacionado al esquema de representación y análisis de los datos, en donde es vital tener en cuenta la manera en cómo se almacenan los datos, debido a que esto influye en la eficiencia de su procesamiento y consulta.

Una celda de manufactura flexible, junto con los sistemas de ejecución de manufactura (MES), están orientados hacia la optimización de operaciones de un área de trabajo, con el objetivo de asegurar la ejecución efectiva y optimización del rendimiento de las operaciones de fabricación de la planta de producción, y mejorar la calidad del producto final. Estos sistemas, funcionan a partir del control y análisis de la información recopilada.

Por ende, la implementación de una base de datos en el MES se convierte en uno de los pilares claves del control de un proceso, es decir, el constante flujo de datos obtenidos debe ser regulado y analizado de una correcta forma, para así lograr añadir diferentes tecnologías como lo son los gemelos digitales y obtener una representación digital de lo que es el proceso. Por lo tanto, es de vital importancia conocer las diferentes bases de datos que se han desarrollado actualmente, y evaluar sus diferentes desempeños en cuanto a su flexibilidad, escalabilidad y adaptabilidad a los cambios de la celda.

Así pues, en este trabajo se aborda un estudio en torno al mejoramiento de los procesos de control y la trazabilidad de datos de una celda de manufactura flexible, mediante el uso de base de datos orientada a grafos y herramientas de visualización para consultar, visualizar y entender los indicadores definidos para el proceso.

Dado esto, en el primer capítulo de este documento se detallan los antecedentes, el planteamiento y justificación del problema. En el segundo capítulo, los objetivos que contribuyen a solucionar este problema. Como tercera parte, se mencionan los alcances y limitaciones. En el cuarto capítulo, se detallan los marcos teóricos y conceptuales, que sirven de guía para solucionar los retos presentes en el proyecto. En el quinto capítulo, se detalla la metodología a seguir para el desarrollo del proyecto. En el sexto capítulo, se definen los resultados esperados en el desarrollo del proyecto, y, por último, se establecen los recursos humanos y técnicos necesarios.

**Palabras Claves:** Base de datos de grafos, Celdas de manufactura, Neo-4j, Cypher, Sistemas de ejecución de manufactura.

---

## Abstract

Nowadays, there is a great interest in companies and industries in the country to develop methods of optimization, control, management and analysis of data, to predict and obtain a better result in the operation processes for the manufacture of products. Current database management systems (DBMS) play the role of organizing data efficiently and effectively. However, among the developments applied, there is still an important factor related to the data representation and analysis scheme, where it is vital to take into account the way in which the data is stored, because this influences the efficiency of its processing and querying.

A flexible manufacturing cell, together with manufacturing execution systems (MES), are oriented towards the optimization of operations of a work area, with the objective of ensuring the effective execution and performance optimization of the manufacturing operations of the production plant, and improving the quality of the final product. These systems work from the control and analysis of the information collected.

Therefore, the implementation of a database in the MES becomes one of the key pillars of the control of a process, i.e., the constant flow of data obtained must be regulated and analyzed in a correct way, in order to add different technologies such as digital twins and obtain a digital representation of what the process is. Therefore, it is of vital importance to know the different databases that have been currently developed, and to evaluate their different performances in terms of flexibility, scalability and adaptability to cell changes.

Thus, this work addresses a study on the improvement of control processes and data traceability of a flexible manufacturing cell, through the use of graph-oriented database and visualization tools to query, visualize and understand the indicators defined for the process.

Given this, the first chapter of this document details the background, the approach and justification of the problem. In the second chapter, the objectives that contribute to solve this problem. In the third part, the scope and limitations are mentioned. In the fourth chapter, the theoretical and conceptual frameworks are detailed, which serve as a guide to solve the challenges present in the project. In the fifth chapter, the methodology to be followed for the development of the project is detailed. In the sixth chapter, the expected results of the project are defined, and finally, the necessary human and technical resources are established.

**Keywords:** Graph database, Manufacturing cells, Neo-4j, Cypher, Manufacturing execution systems.

# Índice general

<b>1. Introducción</b>	<b>10</b>
1.1. Antecedentes . . . . .	10
1.2. Definición del problema . . . . .	11
1.3. Justificación . . . . .	12
<b>2. Objetivos</b>	<b>14</b>
2.1. Objetivo General . . . . .	14
2.2. Objetivos Específicos . . . . .	14
<b>3. Alcances y Limitaciones</b>	<b>15</b>
3.1. Alcances . . . . .	15
3.2. Limitaciones . . . . .	15
<b>4. Marco Teórico</b>	<b>16</b>
4.1. Glosario . . . . .	16
4.1.1. Base de datos relacionales . . . . .	16
4.1.2. Celda de manufactura . . . . .	16
4.1.3. Neo4j . . . . .	16
4.1.4. Trazabilidad . . . . .	16
4.2. Marco Conceptual . . . . .	17
4.2.1. Base de datos orientada a grafos . . . . .	17
4.2.2. Lenguaje de consulta Cypher y OpenCypher . . . . .	19
4.2.3. MES (Manufacturing Execution System) . . . . .	20
4.3. Estado del Arte . . . . .	21
4.3.1. Wireless cyber-physical systems performance evaluation through a graph database approach . . . . .	21
4.3.2. Lenguaje visual de consulta basado en transformación de grafos: aplicación en el dominio médico . . . . .	21
4.3.3. Topology Modeling and Analysis of a Power Grid Network Using a Graph Database . . . . .	21
4.3.4. Bases de datos orientadas a grafos aplicadas al estudio de informes radiológicos: utilizando entornos de computación en la nube para abordar estudios de gran dimensión . . . . .	22
4.3.5. A knowledge graph-based data representation approach for IIoT-enabled cognitive manufacturing . . . . .	22
4.4. Normativas . . . . .	23
4.4.1. Axiomática de las Bases NoSQL . . . . .	23
4.4.2. OPC UA (Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta) . . . . .	24

---

4.4.3. Ethernet Industrial . . . . .	25
4.4.4. Modbus TCP/IP . . . . .	25
4.4.5. Comunicación Serial RS232 y señales digitales I/O . . . . .	26
4.4.6. Control de flujo RTS/CTS . . . . .	28
<b>5. Metodología</b>	<b>29</b>
5.1. Concebir . . . . .	29
5.2. Diseñar . . . . .	30
5.3. Implementar . . . . .	30
5.4. Operar . . . . .	31
5.5. Cronograma . . . . .	32
<b>6. Resultados esperados</b>	<b>33</b>
<b>7. Presupuesto</b>	<b>34</b>

# Índice de figuras

4.1. Base de datos de grafos, ilustración de una red informes médicos. (1)	18
4.2. Modelo de datos y desafíos bases SQL y NoSQL. (2) . . . . .	18
4.3. Consulta de lectura y escritura Cypher (3). . . . .	19
4.4. Jerarquía Funcional sistema MES.(4) . . . . .	20
5.1. Cronograma del proyecto (Elaboración propia) . . . . .	32



# Índice de cuadros

7.1. Precio estimado de los recursos humanos del proyecto . . . . .	34
7.2. Precio estimado de los equipos a emplear . . . . .	35
7.3. Precio estimado de los software a emplear . . . . .	35
7.4. Rubro final . . . . .	35

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Antecedentes

Las crecientes demandas personalizadas de los clientes en Industria 4.0, plantean un gran desafío para las empresas manufactureras en términos de flexibilidad y capacidad de respuesta (5). Hoy en día, se han propuesto diversos enfoques de programación dinámica eficaces para que los sistemas de fabricación respondan rápidamente a los cambios en las demandas de los usuarios, sin embargo, la implementación de un método de programación automática con alta precisión de control y bajo retardo de control sigue siendo un desafío el cual requiere de una gran cantidad de trabajo y tiempo para ajustar un esquema de programación que pueda responder a las necesidades de los procesos de manufactura actuales.

Como respuesta a esta problemática, en (6) los autores proponen un enfoque de representación de datos basado en grafos de conocimiento para la fabricación de múltiples capas que permite la toma de decisiones cognitivas desde una perspectiva global habilitada por IIoT haciendo uso de una base de datos basada en grafos en Neo4j. Los autores definen y almacenan nodos y bordes en la base de datos para representar entidades y relaciones en la fabricación como piezas, ensamblajes, características, pasos, procesos, requisitos, dispositivos y herramientas, mientras que los bordes representan relaciones como “tiene”, “tiene parte”, “parte de”, “tiene ensamblaje”, “subensamblaje de” y “orden”. El enfoque de grafos de conocimiento permite la fusión automática de datos heterogéneos de múltiples fuentes y toma de decisiones basados en el método de incrustación de grafos.

Actualmente, en los procesos de celda de manufactura también se evidencia el uso de aplicaciones de procesamiento y almacenamiento de datos mediante un sistema de gestión de bases de datos (DBMS). En (7) se describen implementaciones comunes de DBMS relacionales y No-SQL, y se comparan sus capacidades mediante un ejemplo práctico, teniendo como resultado que las bases de datos relaciones tienen un rendimiento deficiente en cuanto a su escalabilidad y proceso de algunos tipos de datos. Del mismo modo, en (8) propone un método de almacenamiento de Big Data (BD) para redes de distribución inteligente de un sistema de energía basado en la base de datos de grafos Neo4j. Los resultados de la simulación en los sistemas de prueba estándar IEEE muestran que el método de almacenamiento de BD propuesto puede mejorar de manera efectiva el almacenamiento de datos y aumentar la

eficiencia del análisis de la red de distribución inteligente.

En particular, las consultas sobre modelos de grafos han cobrado relevancia en los últimos años debido a su aplicación en áreas como el análisis de datos biológicos, las redes sociales y la web semántica. Por otra parte, no es nada raro encontrar hoy en día, que el ofrecer sistemas de información que cuenten con herramientas que faciliten el acceso y consultas de datos, es un gran reto que se sigue enfrentando desde diferentes perspectivas. En (9), la autora propone un lenguaje visual de consulta sobre un modelo de grafos, enfocado en el usuario final, que ofrece mayor expresividad que las herramientas de exploración de grafos sin trasladar a una notación visual los elementos de un lenguaje basado en texto. Como resultado de este trabajo, se obtuvo que el lenguaje facilita la formulación de consultas ad hoc (no conocidas con anticipación) que pueden ser complejas, mostrando en las pruebas que es una opción muy viable, teniendo en cuenta el tiempo de ejecución, en comparación con otros sistemas de bases de datos.

## 1.2. Definición del problema

Un sistema de ejecución de manufactura flexible (MES), es un sistema que permite el control, monitoreo y sincronización de la ejecución de procesos industriales, mediante la gestión de datos recopilados(10). En la implementación de un sistema MES, el análisis de datos juega un papel relevante en la mejora de la operación del ambiente de fabricación, en la calidad de los productos y en los reportes de lo sucedido en cada proceso. Para lograr esto, se requiere proporcionar flexibilidad para realizar cambios sobre la marcha de pedidos, especialmente en donde la producción de bienes es masiva (11)(12).

Por un lado, en la actualidad es común encontrar que, los DBMS relacionales se usen para manejar diferentes volúmenes de datos. Este tipo de bases, aunque logran un buen procesamiento, almacenamiento y tiempo de respuesta de consulta, su nivel de complejidad aumenta, a medida que el sistema tiende a escalar (7). Por ende, surge la necesidad de expansión e implementación de otro tipo de DBMS que brinde flexibilidad en la representación de la topología del sistema.

Por otro lado, en comparación con las bases de datos relacionales, las DBMS No relacionales, también conocidas como No-SQL, han demostrado obtener mejores resultados en términos de escalabilidad, cambios constantes y procesamiento de grandes volúmenes de datos. Por esta razón, se decidió investigar más a fondo estos tipos de bases No-SQL, y en estudios previos como (8), (11), (13) y (14) donde se evidencia que la base de datos No-SQL que más se ajusta a las necesidades de la implementación de una celda de manufactura flexible es la orientada a grafos.

Esto se debe a que la base de datos orientada a grafos se centra en la teoría de grafos, lo que permite representar la celda de manufactura flexible como una serie de nodos y etiquetas. La flexibilidad que brinda la representación por grafos, permite modelar la topología de los sistemas de manufactura y el sistema de información de forma integrada donde, por ejemplo, las estaciones de fabricación se pueden representar como nodos al igual que los pedidos u órdenes, y así relacionarlos entre

sí por medio de aristas que contienen la información o etiquetas. Esta representación de los datos y sus relaciones permite un entendimiento, análisis y desarrollo de procesos mucho más simple en comparación con otros sistemas de bases de datos, que específicamente en el campo de los MES, funcionan como la representación de la topología del proceso y la relación que existe entre un elemento y otro.

En (15) los autores hacen un seguimiento de los sistemas de gestión de bases de datos de grafos (GDBMS) y exploran su aplicación en el dominio biomédico. Estos concluyen que, aunque los sistemas de administración de bases de datos relacionales (RDBMS) y otros motores NoSQL aún son útiles en cuestión de escalabilidad, realización de consultas y posibilidad de adición de nuevos datos, su rendimiento puede verse afectado en conjuntos de datos densamente conectados con relaciones de muchos a muchos. En estos casos, los GDBMS pueden ser beneficiosos al proporcionar un modelado más natural de las múltiples relaciones y ofrecer medios más intuitivos para la realización de consultas.

Teniendo en cuenta lo anterior, surge la siguiente pregunta: ¿Cómo se pueden mejorar los procesos de control y trazabilidad de datos de una celda de manufactura flexible, mediante el uso de una base de datos que otorgue flexibilidad al proceso? En otras palabras, como respuesta a esta problemática, se propone un sistema de ejecución de manufactura para una celda de manufactura flexible mediante el uso de bases de datos orientadas a grafos, de tal manera que nos permita mejorar los procesos de control y trazabilidad de datos, obteniendo así un mejor entendimiento de sus iteraciones y recopilación de datos, y, por otro lado, la facilidad de permitir realizar cambios al proceso de celda de manufactura flexible brindando adaptabilidad al proceso.

### 1.3. Justificación

En los últimos años, la transformación y digitalización del sector manufacturero, ha implicado una transición del paradigma industrial actual, en donde el mayor de los problemas se centra en encontrar maneras de lograr la interoperabilidad entre el mundo físico y el mundo digital de los sistemas de fabricación, para poder cubrir las demandas y mantener un ritmo de rápido crecimiento económico. Esto provoca que se propongan diversas soluciones en cuanto a programación dinámica, monitoreo, control, flexibilidad y capacidad de respuesta del proceso. (16).

Por otro lado, una celda de manufactura flexible se encuentra en constantes cambios en el entorno, es decir, aparecen nuevas estaciones, nuevas máquinas, nuevos procesos e incluso se re-configura para ejecutar otro proceso industrial que va acorde a la situación actual que exige el mercado a la empresa (17).

En este orden de ideas y teniendo en cuenta las mejoras de rendimiento y eficiencia de procesos de manufactura, se propone diseñar y aplicar un sistema de información orientado en grafos que permita controlar la ejecución de una celda de manufactura flexible y así conseguir que el sistema de información sea flexible a la celda de manufactura, además de obtener una trazabilidad de la información que

se recolecta para llevar un registro del rendimiento de la máquina y otros posibles indicadores del proceso.

En el ámbito económico, un sistema MES al actuar como un sistema de control y de monitoreo, que gestiona los procesos de producción, permite que se asegure la ejecución efectiva y máxima optimización ya sea en recursos o rendimiento de las operaciones, del mismo modo, se obtiene una mejora en la calidad del producto final. A su vez, al obtener un producto de calidad, esto generará que los sistemas de planificación de recursos empresariales (ERP, por sus siglas en inglés) influyan sobre las decisiones de negocio.

Del mismo modo, esto permite obtener una alta estandarización, debido a la facilidad de acople a cualquier modelo de información que presenta la base de datos orientada a grafos. En términos de resultados, a partir del planteamiento de la celda de manufactura flexible basada en una base de grafos, se genera oportunidades en la analítica de datos debido a su similitud o su facilidad de representar la topología del proceso.

Dado esto, se pueden realizar análisis en cuanto a la planificación de la cadena de suministros de un sistema, es decir, el sistema podrá identificar una serie de patrones, y con base en esto, podrá representar mejor el entorno y, por ende, tomar decisiones óptimas. Además, el sistema a partir de la analítica de datos, puede predecir qué espera en el futuro, es decir, el sistema podrá averiguar qué patrones están surgiendo y qué riesgos podría estar enfrentando.

Principalmente, se espera que, al implementar un sistema de información orientado a grafos en una celda manufacturera flexible, se obtenga inicialmente un mejor análisis y entendimiento en las relaciones del proceso, un mejor manejo de datos y flexibilidad en cuanto a los cambios repentinos del proceso. Además, con la implementación del sistema, se busca mejorar la calidad del proceso, la trazabilidad y análisis de los datos obtenidos.

# Capítulo 2

## Objetivos

### 2.1. Objetivo General

Diseñar un sistema de información basado en una base de datos orientada a grafos, para el control y gestión de los datos en la celda de manufactura flexible del Centro de Automatización de Procesos (CAP).

### 2.2. Objetivos Específicos

- Definir los requerimientos asociados al control de la celda de manufactura flexible del CAP.
- Diseñar un sistema de base de datos que permita el control y trazabilidad de los datos de la celda de manufactura flexible a partir de una base de datos orientada a grafos.
- Implementar el sistema de información y el aplicativo de visualización que permita el control y la trazabilidad de los datos.
- Evaluar el sistema de información propuesto para el control del sistema en un escenario real o simulado de fabricación sobre pedido.

# Capítulo 3

## Alcances y Limitaciones

Este proyecto está enfocado en el diseño de un sistema de información para el control de la ejecución de la celda de manufactura flexible del CAP, con el fin de mejorar el rendimiento operacional a través de la gestión de los datos. Con base a lo anterior, se plantean los siguientes alcances y limitaciones:

### 3.1. Alcances

- El diseño del sistema se generará conforme a un entorno académico, es decir, se dará uso de herramientas de libre acceso.
- La implantación del sistema estará centrado en el funcionamiento dentro de las instalaciones del CAP, en un ambiente real o simulado.
- Se operará el sistema propuesto mediante el funcionamiento en un escenario de fabricación sobre pedido en el entorno del CAP.
- El diseño del sistema de información se planteará de manera que sea versátil, adaptable y pueda servir como referencia para la implementación en diferentes contextos y tipos de escenarios de fabricación con celdas de manufactura.

### 3.2. Limitaciones

- Se propondrá un modelo de información enfocado al proceso de celda de manufactura implementado en el CAP, debido al difícil acceso a un proceso de manufactura en una empresa.
- Dado a factores económicos, no se considerará agregar nuevas capacidades de gestión de la información a los equipos de manufactura, se pretende trabajar con los sistemas actualmente implementados.
- Actualmente algunos recursos de la celda de manufactura del CAP están fuera de servicio y en proceso de reparación, es por eso que, se plantea la posibilidad de dar uso a un ambiente de simulación en caso de que los recursos no se puedan habilitar al momento de hacer las pruebas requeridas.

# Capítulo 4

## Marco Teórico

### 4.1. Glosario

#### 4.1.1. Base de datos relacionales

Una base de datos relacional es un tipo de base de datos que almacena y proporciona acceso a puntos de datos relacionados entre sí. Estos datos se representan como un conjunto de tablas con columnas y filas, en donde se guarda información sobre los objetos que se van a representar en la base de datos. Las columnas contienen los atributos de los datos y cada registro o fila, suele tener un valor o ID único relacionado a cada atributo, lo que simplifica la creación de relaciones entre los puntos de datos. (18) (19).

#### 4.1.2. Celda de manufactura

Las celdas de manufactura son un tipo de tecnología que está orientado hacia la optimización de operaciones de un área de trabajo, con el objetivo de eliminar de manera consistente y progresiva aquellas actividades que no poseen ningún valor agregado en el proceso de manufactura. Esta consiste en un almacén que se utiliza para alojar tanto piezas por procesar como piezas procesadas, un robot cartesiano que permite alcanzar las distintas localidades del almacén, un sistema de transporte que permite trasladar las piezas hacia el robot y de regreso hacia el almacén, y un manipulador robótico articulado que realiza un procesamiento (20).

#### 4.1.3. Neo4j

Es una herramienta para la creación de bases de datos orientada a grafos, destinada a almacenar y consultar datos en grafos en vez de tablas como lo realizan las bases de datos relacionales. Neo4j cuenta con las propiedades más populares que almacena el grafo de forma nativa en el disco y proporciona un marco para recorrer y ejecutar operaciones en base a grafos. Por lo tanto, el lenguaje se usa en cientos de aplicaciones de producción en muchos dominios verticales de la industria. (21)

#### 4.1.4. Trazabilidad

La trazabilidad se entiende como la manera de encontrar y seguir el rastro de un producto o proceso en cada una de sus etapas de ejecución e identificar las



condiciones que lo rodean a lo largo de la cadena de logística y detectar el origen de una incidencia con facilidad (22)(23).

## 4.2. Marco Conceptual

### 4.2.1. Base de datos orientada a grafos

Una base de datos orientada a grafos, se centra en la teoría de los grafos, donde existen un conjunto de objetos (vértices y aristas) que permiten la representación de datos interconectados. Estas bases de datos son parte de la familia de base de datos NoSQL, por ende, también pueden usarse en contextos variados y con fines muy distintos, permiten analizar información y entender, evaluar y aprovechar los procesos y las relaciones (24).

Uno de los principales lenguajes implementados para el uso de GoDB es Cypher, un lenguaje de consulta declarativo que se basa en los conceptos básicos y cláusulas de las bases de datos SQL, pero con el plus de generar una funcionalidad adicional, facilitando la implementación de grafos. Este lenguaje es usualmente encontrado en el programa Neo4j.

El modelo de datos que utiliza Cypher es el de grafos de propiedades. El modelo comprende nodos, que representan entidades (como personas, cuentas bancarias, departamentos, etc.), y relaciones (sinónimo de bordes), representando las conexiones o relaciones entre las entidades.(21)

En la imagen 4.1, se muestra un ejemplo de una base de datos orientada a grafos implementada en el programa de desarrollo Neo4j. Este desarrollo se centra en el área de la medicina, donde muestra la visualización generada a partir de informes de mamografía, ecografía y resonancia magnética de un determinado paciente.(1).

La información que presentan los nodos en la imagen 4.1 son:

- Modadilidad del estudio realizado
- Datos Paciente
- Composición o detalle de la lesión.
- Enfermedad o lesión encontrada
- Estudio Realizado
- Localización de la enfermedad (Parte del cuerpo).

Del mismo modo, las relaciones que existen entre dichos nodos está dada por las palabras claves: **tiene, presenta, clasificada como, localizada en, e incluye.**

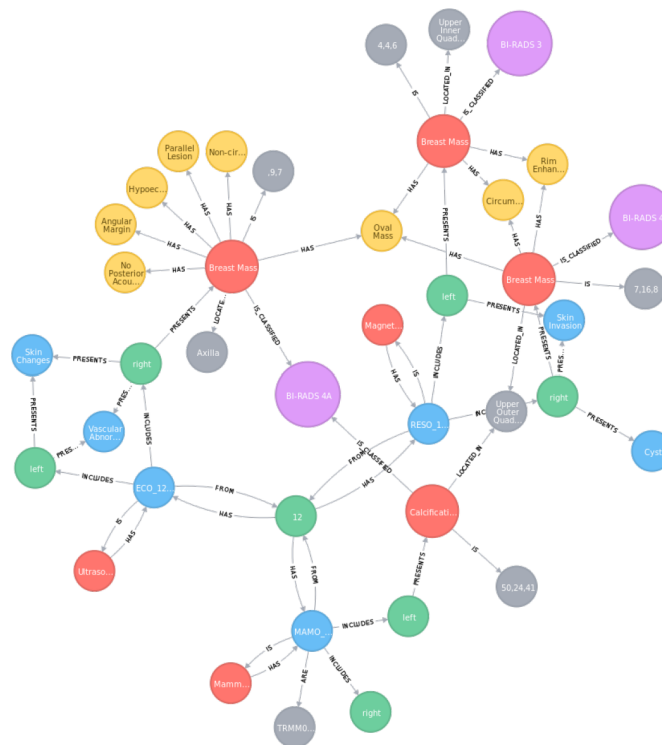


Figura 4.1: Base de datos de grafos, ilustración de una red informes médicos. (1)

En la actualidad, las bases más implementadas son las relacionales. Estas se basan en modelos relacionales, en donde se implementa una forma intuitiva y directa de representar los datos en tablas. Pero estas bases de datos se enfrenta a diferentes desafíos en cuanto su escalabilidad y rendimiento en sus consultas, por ejemplo, las consultas SQL largas requieren más tiempo para ejecutarse. Por otro lado, las bases orientadas a grafos nos otorgan sencillez, lo que hace más simple la interpretación y la generación de consultas.

En la imagen 4.2, se muestra una comparación frente al modelo de datos y ventajas de las bases SQL y NoSQL.

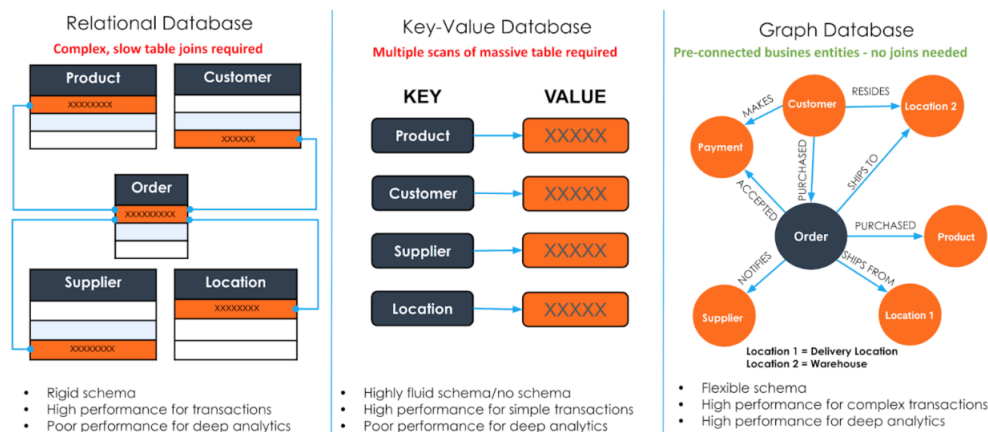


Figura 4.2: Modelo de datos y desafíos bases SQL y NoSQL. (2)

### 4.2.2. Lenguaje de consulta Cypher y OpenCypher

El lenguaje de consulta de grafos de propiedades Cypher es un lenguaje en evolución, originalmente diseñado e implementado como parte de la base de datos de grafos Neo4j, actualmente es utilizado por varios productos de bases de datos comerciales e investigadores.(21)

Una consulta se encuentra compuesta por varias cláusulas encadenadas. Cada cláusula maneja como entrada el estado del gráfico y una tabla de resultados intermedios formada por las variables actuales, y esta genera una salida, que es un nuevo estado del gráfico y una nueva tabla de resultados intermedios. Una ventaja del lenguaje Cypher es que sólo materializa resultados intermedios cuando es necesario.(3)

En Cypher las consultas se clasifican como (3):

- Consultas de lectura y escritura.
- Consultas de uniones.
- Consultas con CALL o subconsultas.

A continuación, en la figura 4.3 se muestra un ejemplo de tipos de consultas de lectura y escritura.

Clause	Table of intermediate results after the clause	State of the graph after the clause, changes in red						
<pre>MATCH (j:Person) WHERE j.name STARTS WITH "J"</pre>	<table><tr><th>j</th></tr><tr><td>(:Person {name: 'John'})</td></tr><tr><td>(:Person {name: 'Joe'})</td></tr></table>	j	(:Person {name: 'John'})	(:Person {name: 'Joe'})	<pre>graph TD     John[Person name='John'] -- FRIEND --&gt; Sara[Person name='Sara']     John -- FRIEND --&gt; Joe[Person name='Joe']     Sara -- FRIEND --&gt; Maria[Person name='Maria']     Joe -- FRIEND --&gt; Steve[Person name='Steve']</pre>			
j								
(:Person {name: 'John'})								
(:Person {name: 'Joe'})								
<pre>CREATE (j)-[:FRIEND]-&gt; (jj:Person {name: "Jay-jay"})</pre>	<table><tr><th>j</th><th>jj</th></tr><tr><td>(:Person {name: 'John'})</td><td>(:Person {name: 'Jay-jay'})</td></tr><tr><td>(:Person {name: 'Joe'})</td><td>(:Person {name: 'Jay-jay'})</td></tr></table>	j	jj	(:Person {name: 'John'})	(:Person {name: 'Jay-jay'})	(:Person {name: 'Joe'})	(:Person {name: 'Jay-jay'})	<pre>graph TD     John[Person name='John'] -- FRIEND --&gt; Sara[Person name='Sara']     John -- FRIEND --&gt; Joe[Person name='Joe']     Sara -- FRIEND --&gt; Maria[Person name='Maria']     Joe -- FRIEND --&gt; Steve[Person name='Steve']     John -- FRIEND --&gt; JayJay1[Person name='Jay-jay']     Joe -- FRIEND --&gt; JayJay2[Person name='Jay-jay']</pre>
j	jj							
(:Person {name: 'John'})	(:Person {name: 'Jay-jay'})							
(:Person {name: 'Joe'})	(:Person {name: 'Jay-jay'})							

Figura 4.3: Consulta de lectura y escritura Cypher (3).

### 4.2.3. MES (Manufacturing Execution System)

El Sistema de Ejecución de Manufactura (MES), es un software que actúa como un sistema de control y de monitoreo de la información para gestionar procesos de producción en entornos industriales, documentando la gestión de la planta. Estos sistemas tienen como objetivo asegurar la ejecución efectiva y optimización del rendimiento de las operaciones de fabricación de la planta de producción, y mejorar la calidad del producto final (25) .

El sistema MES requiere de sistemas tanto de control, como de supervisión y adquisición de datos (sistema SCADA, por sus siglas en inglés), con el fin de gestionar y controlar los equipos implementados. Del mismo modo, es fundamental integrar soluciones ERP (planificación de recursos empresariales, por sus siglas en inglés) para transferir información sobre el rendimiento de la producción, el consumo de materiales y otros.

Un sistema MES se alimenta en tiempo real de los datos provenientes de otros sistemas, convirtiéndolos en información necesaria para la toma de decisiones (4). A continuación, en la imagen 4.4, se muestra la jerarquía funcional de un sistema MES, en ella se encuentra que el MES cuenta con un nivel de planificación, donde recibe las órdenes de trabajo y logística del proceso, para poder así supervisar y controlar la información del proceso de producción.

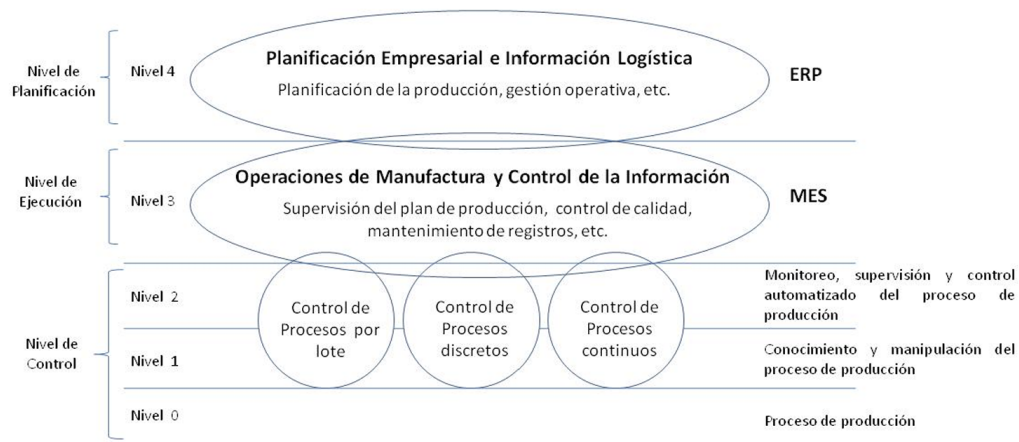


Figura 4.4: Jerarquía Funcional sistema MES.(4)

### 4.3. Estado del Arte

Para la realización de este trabajo se consultaron diferentes trabajos enfocados en el mejoramiento de los procesos de control y la gestión de datos en entornos industriales mediante bases de datos orientadas a grafos. Estos trabajos se resumen a continuación:

#### 4.3.1. Wireless cyber-physical systems performance evaluation through a graph database approach

En este trabajo, los autores se centran en la evaluación del rendimiento de los sistemas inalámbricos ciberfísicos utilizando un enfoque de base de datos de grafos para modelar y analizar los sistemas ciberfísicos, combinando elementos físicos y de software en una red inalámbrica. El artículo proporciona una visión general del enfoque utilizado, destacando la importancia de evaluar el rendimiento de estos sistemas para garantizar su eficiencia y fiabilidad. Los autores presentan los resultados obtenidos a través del análisis de rendimiento realizado utilizando la base de datos de grafos. Estos resultados proporcionan información sobre aspectos como la latencia, el ancho de banda y la calidad de servicio del sistema evaluado, mediante el cálculo de métricas de rendimiento de la red y descubrir correlaciones (11).

#### 4.3.2. Lenguaje visual de consulta basado en transformación de grafos: aplicación en el dominio médico

En este trabajo, la autora propone un lenguaje visual de consulta denominado GraphTQL, el cual se basa en un modelo de grafos. La principal premisa de GraphTQL radica en su enfoque centrado en el usuario final, buscando proporcionar una mayor expresividad en comparación con las herramientas convencionales de exploración de grafos. A diferencia de estas últimas, GraphTQL no traduce simplemente elementos de un lenguaje basado en texto a una notación visual, sino que se esfuerza por mantener la capacidad de expresión mientras se presenta de manera gráfica.

Los resultados obtenidos evidencian que GraphTQL simplifica la formulación de consultas ad hoc (no conocidas con anticipación), que pueden llegar a ser complejas. Por ende, el lenguaje GraphTQL demuestra ser una opción altamente viable, especialmente cuando se considera el tiempo de ejecución en comparación con otros sistemas de bases de datos como SPARQL (9).

#### 4.3.3. Topology Modeling and Analysis of a Power Grid Network Using a Graph Database

En este artículo, se presenta un nuevo método de arquitectura para almacenar, modelar y analizar datos de la red eléctrica. En primer lugar, los autores exponen una arquitectura para la construcción del modelo de red haciendo uso de la base de datos basada en grafos de Neo4j. Por otro lado, se presenta el diseño de los subprocesos usados para realizar el análisis de la energización inicial, el cálculo del camino más corto en conjuntos de datos pequeño a grandes y la búsqueda condicional, para

finalmente, comparar la funcionalidad y la eficiencia del modelo de base de datos propuesto y el análisis de topología contra una base de datos relacional tradicional (PostgreSQL). Los autores concluyen que el análisis de redes de energía utilizando Neo4j tiene mejor rendimiento y que para más de 20 millones de nodos, el uso de múltiples subprocesos es mucho más rápido que el uso de un solo subproceso para el análisis inicial de energización, al igual que para el cálculo del camino más corto funciona mejor en Neo4j (26).

#### **4.3.4. Bases de datos orientadas a grafos aplicadas al estudio de informes radiológicos: utilizando entornos de computación en la nube para abordar estudios de gran dimensión**

Este trabajo, se enfoca en el uso de bases de datos orientadas a grafos para el diagnóstico y el tratamiento de informes radiológicos, específicamente del cáncer de mama. La solución propuesta se basa en la utilización de bases de datos orientadas a grafos y técnicas de procesamiento distribuido para abordar estudios de gran dimensión utilizando entornos de computación en la nube. La autora concluye que su aplicación del modelo de grafos es capaz de manejar grandes volúmenes de datos y aumentar la eficiencia del procesamiento, al igual que mejorar la representación de los informes clínicos los cuales atribuyen al desarrollo de nuevos procedimientos para el análisis y el estudio de los mismos (1).

#### **4.3.5. A knowledge graph-based data representation approach for IIoT-enabled cognitive manufacturing**

En este artículo los autores proponen un enfoque de representación de datos basado en grafos de conocimiento para la fabricación cognitiva habilitada por IIoT. El enfoque se basa en la construcción de un grafo de conocimiento de fabricación de múltiples capas que permite la toma de decisiones cognitivas desde una perspectiva global, haciendo uso de una base de datos basada en grafos, específicamente la base de datos Neo4j. Los autores definen y almacenan nodos y bordes en la base de datos para representar entidades y relaciones en la fabricación. Los nodos representan entidades como piezas, ensamblajes, características, pasos, procesos, requisitos, dispositivos y herramientas, mientras que los bordes representan relaciones como “tiene”, “tiene parte”, “parte de”, “tiene ensamblaje”, “subensamblaje de” y “orden”.

Además, los autores utilizan el lenguaje RDF para realizar análisis semánticos y procesos de razonamiento cognitivo habilitados para IIoT en el grafo de conocimiento construido. El enfoque de grafos de conocimiento permite la fusión automática de datos heterogéneos de múltiples fuentes y la realización de razonamiento y toma de decisiones basados en el método de incrustación de grafos (6).

## 4.4. Normativas

### 4.4.1. Axiomática de las Bases NoSQL

1. **ACID free:** El término ACID hace referencia a la Atomicidad, Consistencia, Aislamiento y Durabilidad (27).
2. **BASE:** Sus siglas significan Basically, Available, Soft state y Eventual consistency. Es el opuesto de ACID. Las bases de datos NoSQL se dividen entre el camino de ACID a BASE (27).
3. **Teorema CAP:** Las siglas CAP, hacen referencia a **Consistency Availability Partition tolerance**, este fue propuesto en el 2000 por Eric Brewer, en donde propone la idea que un entorno distribuido en un sistema, no puede mantener continuamente consistencia perfecta, disponibilidad y tolerancia a la partición simultáneamente.

Este teorema se centra en los siguientes tres principios (27):

- Los datos disponibles en todas las máquinas deben de ser los mismos en todos los aspectos, y las actualizaciones deben realizarse en todas las máquinas con frecuencia para no perder la coherencia de la base.
- Los datos deben de estar disponibles permanentemente y ser accesibles en todo momento.
- Durante un fallo en la base de datos, esta va a tener un correcto funcionamiento sin detener su trabajo, es decir, se aplica la tolerancia a la partición.

Este punto es de gran relevancia, dado que permite entender que para ganar velocidad, se debe de sacrificar por lo menos una de las características. Aunque, el sistema puede realizar combinaciones de estos elementos teniendo en cuenta las siguientes posibilidades (28):

- **CP:** El sistema ejecutará las operaciones de forma consistente, aunque se pierda la comunicación entre nodos (partición del sistema), pero no se asegura que el sistema responda (disponibilidad).
- **AP:** El sistema siempre responderá a las peticiones, aunque se pierda la comunicación entre nodos (partición del sistema). Los datos procesados pueden no ser consistentes.
- **CA:** El sistema siempre responderá a las peticiones y los datos procesados serán consistentes. En este caso no se permite una pérdida de comunicación entre nodos (partición del sistema).

Existen 4 componentes claves en el bloque de construcción de una base de datos NoSQL (27):

- **Lenguaje de Modelado:** Describirá la estructura de las bases de datos y del mismo modo, define el esquema en el que se va a basar.

- **Estructura de la base de datos:** Cada base emplea su propia estructura y almacena la información dando uso de un dispositivo de almacenamiento permanente.
- **Lenguaje de consulta de base de datos:** Permite realizar todas las operaciones de creación, actualización, lectura y borrado.
- **Transacciones:** Durante cualquier transacción de datos, puede haber cualquier tipo de falla o falla; por la tanto, la máquina no debe dejar de funcionar.

#### 4.4.2. OPC UA (Arquitectura Unificada de Comunicaciones de Plataforma Abierta)

Es una arquitectura orientada a servicios independiente de la plataforma que integra toda la funcionalidad de las especificaciones individuales de OPC Classic en un marco extensible que proporciona soluciones más robustas, seguras y escalables para la comunicación industrial (29) (30).

A diferencia de OPC Classic, OPC UA puede funcionar en diferentes sistemas operativos, como Windows, Linux y otros. Utiliza protocolos estándar de Internet, como TCP/IP y HTTPS, para la comunicación, lo que facilita la interoperabilidad entre dispositivos y aplicaciones en entornos heterogéneos. Una de las principales ventajas de OPC UA es su enfoque en la seguridad. Proporciona mecanismos de autenticación, autorización y cifrado de extremo a extremo para proteger la comunicación y los datos transmitidos. Además, ofrece características avanzadas, como un modelo de información flexible, soporte para datos históricos, notificación de eventos y gestión de alarmas (29) (31) (32).

OPC-UA se ha convertido en el estándar de facto para la comunicación industrial y ha sido adoptado por muchas empresas y organizaciones en todo el mundo. La norma **IEC 62541** define las especificaciones técnicas para la implementación de OPC UA, brindando un marco común y coherente para su implementación y uso en diversos sectores de la industria (33) (34).

Las principales especificaciones técnicas definidas por la norma **IEC 62541** son las siguientes:

1. **Modelo de información:** Se establecen las estructuras de datos y la semántica utilizada para describir la información intercambiada entre los sistemas a través de OPC UA. Esto incluye la definición de nodos, atributos, métodos y eventos.
2. **Protocolo de comunicación:** Se especifica el protocolo de comunicación utilizado para la transferencia de datos entre los sistemas. OPC UA utiliza un modelo cliente-servidor, donde los clientes solicitan y reciben datos de los servidores. El protocolo puede basarse en TCP/IP y soportar diferentes mecanismos de transporte y seguridad.



3. **Seguridad:** Se definen los mecanismos de seguridad utilizados para proteger la comunicación y los datos transmitidos en OPC UA. Esto incluye autenticación, autorización, cifrado y firma digital, entre otros aspectos.
4. **Descubrimiento y conexión:** Se describe cómo los clientes pueden descubrir y conectarse a los servidores OPC UA disponibles en la red. Esto puede implicar la resolución de nombres, la búsqueda de servicios de directorio y la negociación de las opciones de comunicación.
5. **Historial de datos:** Se establece cómo se almacenan y acceden a los datos históricos en OPC UA. Esto puede incluir la capacidad de almacenamiento local en los servidores y la consulta de datos históricos por parte de los clientes.
6. **Alarmas y eventos:** Se establece el mecanismo para el manejo de alarmas y eventos en OPC UA. Permite a los servidores notificar a los clientes sobre cambios de estado, condiciones de error o eventos relevantes.

#### 4.4.3. Ethernet Industrial

Es el uso de Ethernet en un entorno industrial con protocolos que proporcionan determinismo y control en tiempo real. [1] Los protocolos para Ethernet industrial incluyen EtherCAT , EtherNet/IP , PROFINET , POWERLINK , SERCOS III , CC-Link IE y Modbus TCP (35). En el caso de la celda de manufactura del CAP, esta utiliza el protocolo de Modbus TCP (también Modbus TCP/IP), el cual es una extensión de Modbus RTU con una interfaz TCP que se ejecuta en Ethernet a través del puerto 502 y fue desarrollado originalmente por Schneider Electric. Además, Modbus es un bus serial sencillo, robusto y libre de derechos de autor que es fácil de implementar y funciona en enlaces físicos RS-232 o RS-485 con velocidades de hasta 115K baudios. (36) (37).

Por otro lado, Ethernet se está convirtiendo en omnipresente y rentable, con enlaces físicos comunes y mayor velocidad, por ello, muchos protocolos de comunicación industrial se están pasando a soluciones basadas en esta tecnología, permitiendo así una topología de red flexible y un número de nodos en el sistema (35).

#### 4.4.4. Modbus TCP/IP

Fue desarrollado bajo la unión del protocolo de aplicación Modbus con la transmisión Ethernet **IEEE 802.3** tradicional. El Protocolo de control de transporte (TCP) reside una capa por encima del Protocolo de Internet (IP) y es responsable de transportar los datos de la aplicación y hacerlos seguros, mientras que IP es responsable del direccionamiento real y la entrega de los datos (38).

Por un lado, el paquete TCP se inserta en la porción de datos del paquete IP debajo de él, mientras que IP en sí mismo es un protocolo no seguro y sin conexión y debe funcionar junto con el TCP superpuesto para poder operar. De esta forma, TCP generalmente se considera la capa superior de la plataforma IP que sirve para garantizar la transferencia segura de datos (36). Para implementar una comunicación Modbus se deben tener en cuenta las siguientes reglas según la organización de Modbus (39):

1. Sin requisitos explícitos del usuario, se recomienda implementar la gestión automática de conexiones TCP.
2. Se recomienda mantener la conexión TCP abierta con un dispositivo remoto y no abrirla y cerrarla para cada transacción MODBUS/TCP. Observación: Sin embargo, el cliente MODBUS debe ser capaz de aceptar una solicitud de cierre del servidor y cerrar la conexión. . La conexión se puede reabrir cuando sea necesario.
3. Se recomienda que un Cliente MODBUS abra un mínimo de conexiones TCP con un servidor MODBUS remoto (con la misma dirección IP). Una conexión por aplicación podría ser una buena opción.
4. Se pueden activar varias transacciones MODBUS simultáneamente en la misma conexión TCP. Observación: si se hace esto, entonces se debe usar el identificador de transacción MODBUS para identificar de manera única las solicitudes y respuestas coincidentes.
5. En el caso de una comunicación bidireccional entre dos entidades MODBUS remotas (cada una de ellas es cliente y servidor), es necesario abrir conexiones separadas para el flujo de datos del cliente y para el flujo de datos del servidor.
6. Una trama/frame TCP debe transportar solo una ADU MODBUS. Se desaconseja enviar múltiples solicitudes o respuestas MODBUS en la misma PDU TCP.

#### **4.4.5. Comunicación Serial RS232 y señales digitales I/O**

El protocolo de comunicación RS232 (Estándar Recomendado 232 por sus siglas en inglés) fue introducido por primera vez en 1960 por la Electronic Industries Association (EIA) es uno de los más antiguos pero populares que se utiliza a nivel industrial. Este es un tipo de tipo de comunicación serial utilizada para la transmisión de datos normalmente en distancias medias (40). No obstante, el estándar ha cambiado de nombre varias veces durante su historia a medida que la organización cambió su nombre, y ha sido conocido como EIA RS-232, EIA 232 y, más recientemente, como TIA 232 desde 1988 por la Telecommunications Industry Association (TIA).

Debido a que RS-232 se usa más allá del propósito original de interconectar un terminal con un módem, se han desarrollado estándares sucesores para abordar las limitaciones. Los problemas con el estándar RS-232 incluyen (41):

- Las grandes oscilaciones de voltaje y el requisito de suministros positivos y negativos aumentan el consumo de energía de la interfaz y complican el diseño de la fuente de alimentación. El requisito de oscilación de voltaje también limita la velocidad superior de una interfaz compatible.
- La señalización de un solo extremo referida a una tierra de señal común limita la inmunidad al ruido y la distancia de transmisión.

- La conexión multipunto entre más de dos dispositivos no está definida. Si bien se han ideado "soluciones alternativas" multipunto, tienen limitaciones en cuanto a velocidad y compatibilidad.
- El estándar no aborda la posibilidad de conectar un DTE directamente a un DTE, o un DCE a un DCE. Se pueden usar cables de módem nulo para lograr estas conexiones, pero estos no están definidos por el estándar, y algunos de estos cables usan conexiones diferentes que otros.
- No se especifica ningún método para enviar energía a un dispositivo. Si bien se puede extraer una pequeña cantidad de corriente de las líneas DTR y RTS, esto solo es adecuado para dispositivos de bajo consumo, como ratones .
- El conector D-sub de 25 pines recomendado en el estándar es grande en comparación con la práctica actual.

Por el lado de las máquinas de la celda de manufactura del CAP, los controladores de dispositivo tanto para los tornos como para las fresadoras Denford se comunican con las herramientas de máquina de dos maneras diferentes: Enlaces seriales RS232 y señales digitales de Entrada y Salida (I/O) (42).

En el caso de RS232 se utiliza para la descarga de programas: control numérico directo (DNC) y verificación detallada del estado. Se debe conectar un cable de RS232 desde un puerto serial en la PC de la celda supervisora al puerto serial externo en la máquina herramienta. Para comunicarse a través del enlace serial, tanto la máquina herramienta como el controlador del dispositivo deben usar la misma configuración (42).

Las señales I/O se conectan directamente desde el módulo de interfaz al puerto de entrada y salida auxiliar de la máquina. Hay dos líneas de entrada y dos líneas de salida que se pueden usar para transmitir información de estado de bajo nivel al controlador del dispositivo. Todas las herramientas Denford están conectadas al módulo de interfaz de I/O en los puertos 2A o 2B (42). El puerto auxiliar proporciona dos entradas a la herramienta, dos salidas de la máquina y un circuito de parada de emergencia. Las entradas y salidas hacia y desde la herramienta corresponden a cuatro códigos 'M':

- M62: salida 1 activada.
- M63: salida 2 activada.
- M64: salida 1 desactivada
- M65: salida 2 desactivada

#### **4.4.6. Control de flujo RTS/CTS**

La solicitud para enviar/autorizar para enviar (RTS/CTS) a veces se denomina estimulación o protocolo de enlace de hardware en lugar de control de flujo. El término protocolo de enlace de hardware proviene del uso de cableado y voltajes como método de control de transmisión de datos. A diferencia de XON/XOFF, que envía caracteres de control en el flujo de datos, RTS/CTS usa voltajes positivos y negativos a lo largo de pines o cables dedicados en el cableado del dispositivo, en donde un voltaje positivo significa que se permite la transmisión de datos, mientras que un voltaje negativo significa que se debe suspender la transmisión de datos (43).

# Capítulo 5

## Metodología

La metodología que se usará para llevar a cabo este trabajo de grado será la del modelo CDIO; una metodología usada en el campo de la ingeniería, la cual brinda las herramientas necesarias para enfrentar de manera innovadora y flexible problemas complejos de la sociedad (44).

En este orden de ideas, el desarrollo de este trabajo se dividirá en cuatro etapas las cuales son: Concebir, Diseñar, Implementar y Operar. A continuación, se explicarán las tareas que se realizarán en cada una de las etapas anteriores, para poder cumplir con los objetivos específicos planteados en un principio.

### 5.1. Concebir

En esta primera etapa, se concibe la idea del problema a resolver, en donde se realiza un estudio bibliográfico acerca de los antecedentes y aplicaciones relacionadas con sistemas de ejecución de manufactura basados en bases de datos orientadas en grafos para una celda de manufactura flexible, para luego, poder definir los requerimientos asociados al control de la celda de manufactura flexible del CAP.

Con base en lo anterior, se proponen las siguientes tareas para cumplir con la etapa de concepción:

- **Tarea 1:** Comprender y analizar las ventajas y desventajas entre las bases de datos relacionales y las no relacionales, en cuanto a su implementación en una celda de manufactura flexible.
- **Tarea 2:** Realizar un levantamiento bibliográfico sobre los temas de interés (Base de Datos Orientada a Grafos, MES, Celda de manufactura, Neo4j) y aplicaciones en el área industrial.
- **Tarea 3:** Realizar un levantamiento de requerimientos teniendo en cuenta los alcances y limitaciones que presenta el proyecto.
- **Tarea 4:** Estudiar la documentación acerca de la herramienta Neo4j y el lenguaje de consulta Cypher, para la creación e interacción con la base de datos orientada a grafos.

- **Tarea 5:** Llevar a cabo una revisión del sistema de información ya existente en la celda de manufactura, para determinar parámetros importantes a tener en cuenta para el diseño del nuevo sistema de información.

Finalizando esta etapa, se espera tener bien identificado y comprendido el problema, al igual que haber obtenido los conocimientos necesarios para continuar con la etapa de diseño.

## 5.2. Diseñar

En la segunda etapa, se pretende diseñar un sistema de información el cual permita controlar la celda de manufactura flexible a partir de una base de datos orientada a grafos.

- **Tarea 1:** Diseñar el sistema de información junto con la base de datos basada en grafos, a partir de los requerimientos definidos.
- **Tarea 2:** Identificar las variables y/o indicadores de interés a monitorear y la frecuencia con la que se deberá entregar el reporte de desempeño de la celda de manufactura.
- **Tarea 3:** Definir alternativas de visualización de los indicadores a reportar. Revisar las opciones disponibles y escoger la mejor opción mediante una matriz de selección.
- **Tarea 4:** Validar el diseño del sistema con los expertos del CAP.

## 5.3. Implementar

La tercera etapa pretende evaluar el modelo propuesto ya sea en un ambiente real o simulado, para el control del sistema en un escenario de fabricación sobre pedido. Con base a los resultados de la evaluación, se hará una retroalimentación del rendimiento del modelo y la realización de ajustes y correcciones requeridas.

- **Tarea 1:** Implementar el sistema de información basado en una base de datos de grafos al escenario de fabricación sobre pedidos, haciendo uso de la herramienta Neo4j y del lenguaje de consulta Cypher.
- **Tarea 2:** Implementar la visualización de acuerdo a los indicadores escogidos, mediante un Dashboard. Esto, con el fin de realizar un análisis y trazabilidad de datos, frente al resultado del escenario de fabricación sobre pedidos.
- **Tarea 3:** Realizar una evaluación en un ambiente real y/o simulado del sistema de información a la hora de realizar las consultas requeridas por el usuario en el escenario de fabricación sobre pedidos.
- **Tarea 4:** Llevar a cabo los cambios necesarios basados en los resultados obtenidos y las retroalimentaciones de los expertos del CAP para cumplir con los objetivos planteados.

Finalizada esta etapa, se espera que el sistema de información diseñado y la herramienta de visualización de los datos, haya pasado por todas las pruebas requeridas y tenga la validación de los usuarios del CAP.

## 5.4. Operar

En la última etapa se busca que el sistema propuesto haya sido validado completamente y se encuentre en funcionamiento completo en el escenario de fabricación sobre pedidos. Además, se evaluará el reporte de los indicadores mediante la aplicación de visualización implementada.

- **Tarea 1:** Evaluar la conexión entre el sistema de información y la celda de manufactura, mediante pruebas en un entorno de fabricación sobre pedido, en donde se analizará el funcionamiento en cuanto a envío y recepción de información por parte de la celda y del coordinador (sistema de información).
- **Tarea 2:** Evaluar la capacidad de adaptabilidad del sistema de información mediante la realización de cambios de los componentes y procesos que se requieren para cumplir con los pedidos que se llevan a cabo en la celda de manufactura.
- **Tarea 3:** Evaluar que los reportes generados de las consultas se lleven a cabo de acuerdo a como el usuario los espera.

Al culminar esta etapa se espera dar por terminado el proyecto de grado al tener el nuevo sistema de información instalado en la celda de manufactura flexible del CAP, con la cual se pueda someter al escenario de fabricación de pedidos y hacer las consultas y trazabilidad de los datos en el momento requerido.

## 5.5. Cronograma

El tiempo total del proyecto se llevará a cabo en 24 semanas las cuales se distribuyen de la siguiente manera:

Cronograma de Actividades																								
Actividades	Semanas																							
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
<b>Concebir</b>																								
1. Comprender y analizar las ventajas y desventajas entre las bases de datos relacionales y las no relacionales, en cuanto a su implementación en una celda de manufactura flexible.																								
2. Realizar un levantamiento bibliográfico sobre los temas de interés (Gemelo Digital, Base de Datos Orientada a Grafos, Sistemas Físicos Cibernéticos) y aplicaciones en el área industrial.																								
3. Realizar un levantamiento de requerimientos teniendo en cuenta los alcances y limitaciones que presenta el proyecto.																								
4. Investigar sobre la documentación acerca de la herramienta Neo4j y el lenguaje de consulta Cypher, para la creación e interacción con la base de datos orientada a grafos.																								
5. Llevar a cabo una revisión del sistema de información ya existente en la celda de manufactura, para determinar parámetros importantes a tener en cuenta para el diseño del nuevo sistema de información.																								
<b>Diseñar</b>																								
1. Diseñar el sistema del sistema de información basado en grafos a partir de los requerimientos definidos, mediante el uso de la herramienta Neo4j y del lenguaje de consulta Cypher, que permitirá operar la celda de manufactura flexible existente en el CAP.																								
2. Identificar las variables y/o indicadores de interés a monitorear y la frecuencia con la que se deberá entregar el reporte de desempeño de la celda de manufactura.																								
3. Definir alternativas de visualización de los indicadores a reportar. Revisar las opciones disponibles y escoger la mejor opción mediante una matriz de selección.																								
4. Validar el diseño del sistema con los expertos del CAP.																								
<b>Implementar</b>																								
1. Implementar el modelo de información orientado a una base de datos grafos al escenario de fabricación sobre pedidos.																								
2. Implementar la visualización de acuerdo a los indicadores escogidos, mediante un Dashboard. Esto, con el fin de realizar un análisis y trazabilidad de datos, frente al resultado del escenario de fabricación sobre pedidos.																								
3. Realizar una evaluación en un ambiente real y/o simulado del sistema de información a la hora de realizar las consultas requeridas por el usuario en el escenario de fabricación sobre pedidos.																								
4. Llevar a cabo los cambios necesarios basados en los resultados obtenidos y las retroalimentaciones de los expertos del CAP para cumplir con los objetivos planteados.																								
<b>Operar</b>																								
1. Evaluar la conexión entre el sistema de información y la celda de manufactura, mediante pruebas en un entorno de fabricación sobre pedido, en donde se analizará el funcionamiento en cuanto a envío y recepción de información por parte de la celda y del coordinador (sistema de información).																								
2. Evaluar la capacidad de adaptabilidad del sistema de información mediante la realización de cambios de los componentes y procesos que se requieren para cumplir con los pedidos que se llevan a cabo en la celda de manufactura.																								
3. Evaluar que los reportes generados de las consultas se lleven a cabo de acuerdo a como el usuario los espera.																								

Figura 5.1: Cronograma del proyecto (Elaboración propia)



# Capítulo 6

## Resultados esperados

A medida que se cumple con la metodología establecida, se espera obtener los siguientes resultados, para dar como culminado el desarrollo del proyecto:

1. El sistema de información diseñado cumple con la flexibilidad y adaptabilidad a los diferentes cambios de la celda de manufactura flexible, sin que dificulte la lógica de la consulta.
2. El diseño del sistema de información cumple con la característica de ser funcional o sirva como punto de partida para la implementación en cualquier otro tipo de celda de manufactura flexible.
3. Cumplimiento con un diseño simple y elaborado de la visualización de los datos a partir de los indicadores establecidos para la toma de decisiones del proceso.
4. El sistema de información diseñado es aprobado por los usuarios dado a partir de los resultados obtenidos en la etapa de implementación y operación de la celda de manufactura.

# Capítulo 7

## Presupuesto

Para cumplir con las etapas de concebir, diseñar, implementar y operar, es necesario adquirir y dar uso de algunas herramientas tales como bases de datos, componentes electrónicos, herramientas de laboratorio, software de simulación y entre otros.

La descripción de estos recursos se presenta a continuación, sin embargo, cabe aclarar que estos son componentes y servicios que son potenciales. Para saber con exactitud los costos y cantidades es necesario poner en marcha las etapas de diseño, implementación y operación.

- **Recursos Humanos:** Los recursos humanos del proyecto están conformados por Isabella Ceballos Sánchez y Juan José Restrepo Rosero quienes realizarán las labores de investigación, diseño e implementación. Además, se cuenta con la orientación del profesor y coordinador del CAP, Juan David Contreras Pérez y de la co-dirección de la profesora María Constanza Pabón.

A continuación, se muestra la descripción de costos de los implicados.

Nombre	Valor Hora	Número Horas Semana	Javeriana		Recursos propios		Total
			Especie	Efectivo	Especie	Efectivo	
Juan David Contreras	\$36,500	1	\$0	\$730,000	\$0	\$0	\$730,000
María Constanza Pabón	\$36,500	1	\$0	\$730,000	\$0	\$0	\$730,000
Isabella Ceballos	\$10,000	1	\$0	\$0	\$200,000	\$0	\$200,000
Juan José Restrepo	\$10,000	1	\$0	\$0	\$200,000	\$0	\$200,000
TOTAL			\$0	\$1,460,000	\$400,000	\$0	\$1,860,000

Cuadro 7.1: Precio estimado de los recursos humanos del proyecto

- **Equipos:** Los equipos a utilizar a lo largo del desarrollo de este proyecto pertenecen principalmente a el CAP y a los investigadores. La descripción de estos recursos se presenta en la siguiente tabla.

Nombre	Valor	Cantidad	Javeriana		Recursos propios		Total
			Especie	Efectivo	Especie	Efectivo	
Computador Asus TUF	\$6,400,000	1	\$0	\$0	\$6,400,000	\$0	\$6,400,000
Computador Asus X541n	\$3,000,000	1	\$0	\$0	\$3,000,000	\$0	\$3,000,000
Celda de manufactura flexible	\$200,000,000	1	\$200,000,000	\$0	\$0	\$0	\$200,000,000
TOTAL			\$200,000,000	\$0	\$9,400,000	\$0	\$209,400,000

Cuadro 7.2: Precio estimado de los equipos a emplear

- **Software:** Los software a emplear para llevar a cabo este proyecto son de carácter gratuito, por lo que no se requieren de gastos adicionales desde la parte de programas. Los software son los siguientes.

Nombre	Valor	Cantidad	Javeriana		Recursos propios		Total
			Especie	Efectivo	Especie	Efectivo	
Python	\$0	1	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Neo4j	\$0	1	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
TOTAL			\$0	\$0	\$0	\$0	\$0

Cuadro 7.3: Precio estimado de los software a emplear

De acuerdo a las tablas de recursos técnicos y humanos, se muestra a continuación los montos finales de cada categoría y el origen de los recursos.

Rubro	Javeriana		Recursos propios		Total
	Especie	Efectivo	Especie	Efectivo	
Recurso humano	\$0	\$730,000	\$400,000	\$0	\$1,130,000
Equipos	\$200,000,000	\$0	\$9,400,000	\$0	\$209,400,000
Software	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0

Cuadro 7.4: Rubro final

# Bibliografía

- [1] L. Calabuig Monerris, “Bases de datos orientadas a grafos aplicadas al estudio de informes radiológicos: utilizando entornos de computación en la nube para abordar estudios de gran dimensión,” Sep 2016.
- [2] TigerGraph, “What is a graph database and why should you care?,” Jul 2019.
- [3] I. Neo4j, “Clause composition - cypher manual.”
- [4] V. Salazar, “Análisis de la integración de los sistemas mes-erp en industrias de manufactura,” in *Energy and technology for the Americas: education, innovation, technology and practice. Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology, San Cristobal, Venezuela*, pp. 1–6, 2009.
- [5] M. Hermann, T. Pentek, B. Otto, *et al.*, “Design principles for industrie 4.0 scenarios: a literature review,” *Technische Universität Dortmund, Dortmund*, vol. 45, 2015.
- [6] M. Liu, X. Li, J. Li, Y. Liu, B. Zhou, and J. Bao, “A knowledge graph-based data representation approach for iiot-enabled cognitive manufacturing,” *Advanced Engineering Informatics*, vol. 51, p. 101515, 2022.
- [7] M. M. Maran, N. A. Paniavin, and I. A. Poliushkin, “Alternative approaches to data storing and processing,” in *2020 V International Conference on Information Technologies in Engineering Education ( Inforino )*, pp. 1–4, 2020.
- [8] P. Shi, G. Fan, S. Li, and D. Kou, “Big data storage technology for smart distribution grid based on neo4j graph database,” in *2021 IEEE 4th International Conference on Electronics Technology (ICET)*, pp. 441–445, 2021.
- [9] M. C. Pabón Burbano, “Lenguaje visual de consulta basado en transformación de grafos: aplicación en el dominio médico,” 2016.
- [10] T. A. Undheim, “The future of manufacturing execution systems is simplicity,” Jun 2022.
- [11] M. Hany, Y. Liu, K. Montgomery, and R. Candell, “Wireless cyber-physical systems performance evaluation through a graph database approach,” 2020-10-01 00:10:00 2020.
- [12] F. Tao, Q. Qi, A. Liu, and A. Kusiak, “Data-driven smart manufacturing,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 48, pp. 157–169, 2018. Special Issue on Smart Manufacturing.

- [13] C. H. dos Santos, G. T. Gabriel, J. V. S. do Amaral, J. A. B. Montevechi, and J. A. de Queiroz, “Decision-making in a fast fashion company in the industry 4.0 era: a digital twin proposal to support operational planning,” *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 5/6, pp. 1653 – 1666, 2021.
- [14] J. Qiao, A. Zhou, and H. Qiu, “Research and implementation of system of electric business expanding installation process based on graph database,” in *2020 IEEE 3rd International Conference on Automation, Electronics and Electrical Engineering (AUTEEE)*, pp. 10–13, 2020.
- [15] S. Timón-Reina, M. Rincón, and R. Martínez-Tomás, “Overview of graph databases and their applications in the biomedical domain,” *Database: The Journal of Biological Databases Curation*, vol. 2021, pp. 1 – 22, 2021.
- [16] M. Tisch, C. Hertle, J. Cachay, E. Abele, J. Metternich, and R. Tenberg, “A systematic approach on developing action-oriented, competency-based learning factories,” *Procedia CIRP*, vol. 7, pp. 580–585, 2013. Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013.
- [17] L. Kohnová and N. Salajová, “Impact of industry 4.0 on companies: Value chain model analysis,” Jan 2023.
- [18] Oracle, “¿qué es una base de datos relacional (sistema de gestión de bases de datos relacionales)?,” 2022.
- [19] A. W. Services, “¿qué es una base de datos relacional?,” 2023.
- [20] F. d. Ingenieria, “Revista ingeniería investigación y tecnología: Facultad de ingeniería,” 2019.
- [21] N. Francis, A. Green, P. Guagliardo, L. Libkin, T. Lindaaker, V. Marsault, S. Plantikow, M. Rydberg, P. Selmer, and A. Taylor, “Cypher: An evolving query language for property graphs,” in *Proceedings of the 2018 International Conference on Management of Data, SIGMOD ’18*, (New York, NY, USA), p. 1433–1445, Association for Computing Machinery, 2018.
- [22] M. Mecalux, “Software de trazabilidad: Todos los productos bajo control,” Mar 2020.
- [23] “Reglamento (ce) no 178/2002 del parlamento europeo y del consejo de 28 de enero de 2002,” Jan 2002.
- [24] IONOS, “Graph database: Bases de datos para una interconexión eficiente,” Oct 2019.
- [25] N. I. of Standards and Technology, “Guide to industrial control systems security,” May 2015.
- [26] B. Kan, W. Zhu, G. Liu, X. Chen, D. Shi, and W. Yu, “Topology modeling and analysis of a power grid network using a graph database,” *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 10, p. 1355, 01 2017.

- [27] V. Sharma and M. Dave, "Sql and nosql databases," *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 2, no. 8, 2012.
- [28] A. C. Romero, J. S. G. Sanabria, and M. C. Cuervo, "Utilidad y funcionamiento de las bases de datos nosql," *Facultad de Ingeniería*, vol. 21, no. 33, pp. 21–32, 2012.
- [29] O. Foundation, "Opc unified architecture," Sep 2019.
- [30] O. Foundation, "Opc classic," Oct 2020.
- [31] Paessler, "Monitor your industrial environment using opc ua," Jun 2021.
- [32] S. AG, "Using a cp 443-1 opc ua as gateway for mes/erp," May 2017.
- [33] S. M. Person and I. INC, "What is opc ua and how does it affect your world?," May 2008.
- [34] I. E. COMMISSION, "Iec 62541-5 - international electrotechnical commission," Jun 2020.
- [35] Z. Lin and S. Pearson, "An inside look at industrial ethernet communication protocols," Jul 2018.
- [36] A. INCORPORATED, "Introduction to modbus tcp/ip - prosoft technology," 2005.
- [37] E. P. COMPANY, "Industrial ethernet communication protocols," 2019.
- [38] A. Andersdotter, D. J. Lansford, D. Law, D. R. B. Marks, and D. A. Myles, "Ieee 802 standards association," May 2023.
- [39] M. Organization, "Modbus messaging on tcp/ip implementation guide v1," Oct 2006.
- [40] T. Sharma, "Rs232 serial communication protocol: Basics, working amp; specifications," Jan 2018.
- [41] P. Horowitz and W. Hill, *The Art of Electronics*. Cambridge University Press, 2nd ed., 1989.
- [42] D. L. User, "Computer integrated manufacturing systems (cim's) equipment installation supplement," Sep 2002.
- [43] IBM, "Flow control," Mar 2023.
- [44] E. Amaya, "Metodologías de trabajo," 2015.