



unitec®

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA CENTROAMERICANA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**DISEÑO Y PROTOTIPADO DE UN CMMS PARA CENTROS DE SALUD EN SAN PEDRO
SULA**

**PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE LICENCIADO EN INGENIERÍA EN
BIOMÉDICA**

PRESENTADO POR:

21841150 ANDRÉ MICHEL RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ

ASESOR: MANUEL GAMERO

CAMPUS SAN PEDRO SULA

ABRIL, 2023

AUTORIZACIÓN

AUTORIZACIÓN DEL AUTOR PARA LA CONSULTA, LA REPRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL, Y PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO DE TESIS DE GRADO.

Señores

CENTRO DE RECURSOS PARA EL APRENDIZAJE Y LA INVESTIGACIÓN (CRAI)
San Pedro Sula

Estimados Señores:

Yo, ANDRÉ MICHEL RODRÍGUEZ HERNÁNDEZ, de San Pedro Sula, autor del trabajo de pregrado titulado: "Diseño y Prototipado de un CMMS para Centros de Salud en San Pedro Sula", presentado y aprobado en año 2023, como requisito previo para optar al título de Licenciado en Ingeniería en Biomédica autorizo a:

Las Bibliotecas de los Centros de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación (CRAI) de la UNITEC, para que con fines académicos, puedan libremente registrar, copiar o utilizar la información contenida en él, con fines educativos, investigativos o sociales de la siguiente manera:

Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo en la sala de estudio de la biblioteca y/o la página Web de la Universidad.

Permita la consulta, la reproducción, a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato CD o digital desde Internet, Intranet, etc., y en general en cualquier otro formato conocido o por conocer.

De conformidad con lo establecido en el artículos 19 de la Ley de Derechos de Autor y de los Derechos Conexos; los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

Es entendido que cualquier copia o reproducción del presente documento con fines de lucro no está permitida sin previa autorización por escrito de parte de los principales autores.

En fe de lo cual, se suscribe la presente acta en la ciudad de San Pedro Sula a los 28 días del mes de abril del año 2023.

28 de abril del 2023.



André Michel Rodríguez Hernández
21841150

HOJA DE FIRMAS

Los abajo firmantes damos fe, en nuestra posición de miembro de Terna, Asesor y/o jefe Académico y en el marco de nuestras responsabilidades adquiridas, que el presente documento cumple con los lineamientos exigidos por la Facultad de Ingeniería y los requerimientos académicos que la Universidad dispone dentro de los procesos de graduación.

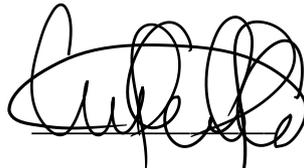


Ing. Manuel Gamero

Asesor Metodológico

Ing. Reyna Valle

Coordinador de Terna



Ing. Carlos Perdomo

Miembro de Terna



Ing. Erick Amaya

Miembro de Terna



Ing. Reyna Valle

Jefe Académica de Ingeniería en Biomédica | UNITEC

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Madre por apoyarme durante toda mi vida y ser la principal promotora de mi desarrollo estudiantil, por ser una fuente de amor y cariño inagotable y por haberme apoyado de forma incondicional todos estos años.

A mi Padre por siempre brindarme buen consejo, por ser el primero en intervenir por mí, por apoyar mi desarrollo como profesional y por dar el ejemplo sobre el hombre en el cual me quiero convertir.

A mis hermanos Lester Hernández y Estefanía Rodríguez por las memorias que compartimos y por su apoyo incondicional.

A Alicia García por los momentos divertidos que hemos vivido y por el apoyo que me ha brindado en horas bajas.

A Jose Carlos Aguilar, Abelardo Banegas, Alexandro Cribas y David Molina por apoyarnos mutuamente durante nuestros estudios, compartir pasatiempos y pasar buenos momentos.

A Natalia Ortiz por estar haber estado presente en algunos de los momentos más difíciles que he pasado, por lo cual siempre será mi amiga.

A mis amistades por el impacto positivo que han tenido en mi vida, aún si estas no están al tanto de cuánto las valoro.

-André Michel Rodríguez Hernández

El éxito no es definitivo, el fracaso no es fatal: lo que cuenta es tener el coraje para seguir adelante.

Winston Churchill

RESUMEN EJECUTIVO

En Honduras las instituciones de atención a la salud por lo general no cuentan con profesionales en el área de biomédica o ingeniería clínica, por lo cual la gestión de los equipos médicos, abarcando desde su asignación a una unidad clínica hasta procesos de mantenimiento, es deficiente. Esta problemática se exagera debido al estado de la infraestructura informática hospitalaria debido a que la documentación de información relevante se maneja en papel y lápiz, una medida analógica que representa un obstáculo al momento de recabar información específica sobre la base de equipos de la institución. Los sistemas CMMS, herramientas de gestión de mantenimiento, presentan beneficios que han sido cuantificados para las instituciones que han adoptado este software, pasando de estrategias de mantenimiento reactivas a proactivas, en concordancia con los fundamentos de la Ingeniería Clínica. Este software toma un enfoque particular a la gestión de equipos médicos al emplear la Metodología en V y el Juicio de Expertos en el tema para crear un diseño y prototipo ilustrativo de un CMMS ambientado a las necesidades del sector salud. El diseño presentado es altamente modular, permitiendo que pueda iterarse sobre el mismo para crear un diseño completamente funcional y coherente con los requisitos que los expertos consideran fundamentales para este programa. Se encontró que hay una baja a nula implementación documentada de sistemas CMMS en el país, tanto en el sector salud como el industrial, que la Metodología en V resulta eficaz para el desarrollo de este tipo de software y que un prototipo de CMMS desarrollado en el lenguaje de programación C# es viable. Se necesita de un periodo de desarrollo mayor al tiempo de investigación para que se produzca un prototipo funcional que pueda ser implementado en condiciones reales en el campo.

Palabras Clave: **CMMS, Diseño de Software, Ingeniería Clínica, Juicio de Expertos, Metodología en V, Prototipado de Software, Salud.**

ABSTRACT

In Honduras, healthcare institutions generally do not have professionals in the area of biomedical or clinical engineering, so the management of medical equipment, from its assignment to a clinical unit to maintenance processes, is deficient. This problem is exacerbated by the state of medical IT infrastructure because the documentation of relevant information is handled on pen and paper, an analog solution that represents an obstacle when gathering specific information on the institution's equipment base. CMMS systems, maintenance management tools, present benefits that have been quantified for institutions that have adopted this software, moving from reactive to proactive maintenance strategies, in accordance with the fundamentals of clinical engineering. This software takes a specialized approach to the management of medical equipment through the application of the V-Model and the Judgment of Experts in the field were used to create a CMMS design and illustrative prototype tailored to the needs of the healthcare sector. This design is highly modular, allowing it to be iterated upon to create a fully functional design consistent with the requirements that experts consider fundamental for this program. It was found that there is low to null documentation of implementation of CMMS systems in the country, both in the healthcare and industrial sectors, that the V-Model is effective for the development of this type of software, and that a CMMS prototype developed in the C# programming language is viable. A development period longer than the research time is needed to produce a functional prototype that can be implemented in real conditions on the field.

Keywords: **Clinical Engineering, CMMS, Expert's Judgment, Healthcare, Software Design, Software Prototyping, V-Model.**

ÍNDICE DE CONTENIDO

I. Introducción	1
II. Planteamiento del Problema.....	3
2.1 Precedentes del Problema	3
2.2 Definición del Problema.....	3
2.3 Justificación.....	4
2.4 Preguntas de Investigación	4
2.5 Objetivos.....	5
2.5.1 Objetivo General	5
2.5.2 Objetivos Específicos.....	5
III. Marco Teórico	6
3.1 Situación Actual.....	6
3.1.1 Macroentorno	6
3.1.1.1 Implementación de CMMS en Chile	7
3.1.1.2 Análisis de Implementación de CMMS en Malasia Peninsular.....	8
3.1.1.3 Implementación de CMMS en Tailandia.....	9
3.1.2 Microentorno	10
3.1.2.1 Condiciones Climáticas en San Pedro Sula y Sus Efectos en el Equipo Médico	10
3.1.2.2 Hospital Nacional Mario Catarino Rivas	12
3.2 Conceptualización.....	12
3.2.1 Ingeniería Clínica	12
3.2.2 Programación	13
3.2.3 Bases de Datos	13
3.2.4 Ciberseguridad	14
3.3 Teorías de Sustento	15
3.3.1 Administración Hospitalaria	15
3.3.1.1 Ingeniería Clínica	15
3.3.1.2 Capacitación.....	16
3.3.2 Mantenimiento Hospitalario	16
3.3.2.1 Mantenimiento Preventivo.....	17
3.3.2.2 Mantenimiento Correctivo	18
3.3.3 Bases de Datos	18
3.3.3.1 El Lenguaje SQL	18

3.3.3.2 Bases de Datos Relacionales	19
3.3.4 Ciberseguridad	19
3.3.4.1 Air Gap	20
3.3.4.2 Ofuscación.....	20
3.3.4.3 Cifrado Extremo A Extremo	21
3.3.4.4 Roles de Usuario	21
3.3.5 Los Sistemas CMMS.....	22
3.3.5.1 Beneficios de la Implementación de un CMMS.....	23
3.3.6 Selección e Implementación de un CMMS.....	25
3.3.6.1 Soluciones Comerciales, Código Abierto y a Medida	25
3.3.6.2 Implementación de un CMMS	26
3.4 Marco Legal	28
3.4.1 Ley del Sistema Nacional de Salud	28
3.4.2 Decreto No. 274-2010, Creación de Dirección General de Bienes Nacionales.....	29
3.4.3 Código Penal de Honduras	29
IV. Metodología.....	31
4.1 Enfoque.....	31
4.2 Variables de Investigación.....	31
4.2.1 Variable Dependiente.....	32
4.2.2 Variables Independientes.....	32
4.3 Técnicas e Instrumentos Aplicados	33
4.4 Metodología de Desarrollo.....	35
4.4.1 Metodología en V	35
4.4.2 Requerimientos Básicos e Institucionales.....	36
4.4.3 Arquitectura de Software.....	36
4.4.4 Definición de Módulos	38
4.4.4.1 Módulo de Órdenes de Trabajo.....	38
4.4.4.2 Módulo de Inventario	38
4.4.4.3 Módulo de Personal.....	40
4.4.4.4 Módulo de Mantenimiento.....	41
4.4.5 Diseño de Base de Datos	42
4.4.6 Programación de Prototipo Ilustrativo.....	42
4.4.7 Pruebas Unitarias e Integración de Módulos del CMMS	43
4.5 Encuesta a Expertos	43

4.6 Metodología de Validación	44
4.7 Cronograma de Actividades	42
4.8 Matriz Metodológica	43
4.9 Operacionalización de las Variables.....	45
V. Resultados y Análisis	46
5.1 Resultados de Encuesta.....	46
5.1.1 Descripción de la Encuesta.....	46
5.1.2 Preguntas, Resultados y Análisis de la Encuesta	46
5.2 Diseño de Base de Datos	64
5.2.1 Tablas de la Base de Datos	65
5.2.2.1 Fabricantes de Equipos Médicos	65
5.2.2.2 Inventario de Equipos Médicos	66
5.2.2.3 Modelos de Equipos Médicos	67
5.2.2.4 Órdenes de Trabajo	67
5.2.2.5 Personal de la Institución.....	68
5.2.2.6 Unidades Clínicas	69
5.2.2.7 Usuarios del CMMS.....	69
5.2.2.8 Tablas Auxiliares	70
5.2.2.9 Diagrama de Entidad-Relación	71
5.3 Desarrollo de Prototipo Ilustrativo	73
5.3.1 Desarrollo de CLI Programada en C++	73
5.3.2 Desarrollo de Aplicación con GUI Programada en C#	74
VI. Conclusiones	77
VII. Recomendaciones.....	79
VIII. Aplicabilidad.....	80
IX. Trabajo Futuro	81
X. Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación.....	82
Bibliografía.....	87
Anexos	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Interfaz de Usuario, CMMS del Hospital Naval Almirante Nef	8
Figura 2 - Roles de Usuario, CMDMS.....	9
Figura 3 - Humedad Relativa Promedio Anual de Honduras	10
Figura 4 - Temperatura Promedio Anual de Honduras	11
Figura 5. Modelo del "Iceberg", costos Directos e Indirectos Asociados al Mantenimiento de Activos	23
Figura 6 - Proceso de Implementación de CMMS	27
Figura 7 – Variables Dependiente e Independientes.....	32
Figura 8 – Técnicas e Instrumentos Establecidos	34
Figura 9 - Metodología en V aplicada al desarrollo de software	35
Figura 10 - Módulo de Órdenes de Trabajo	38
Figura 11 - Módulo de Inventario	39
Figura 12 - Módulo de Personal.....	40
Figura 13 - Módulo de Mantenimiento.....	41
Figura 14 - Cronograma de Actividades	42
Figura 15 - Respuestas Obtenidas, Ordenadas por Hospital.....	47
Figura 16 - Respuestas Obtenidas, Ordenadas por Ente Rector y Nivel de Atención.....	48
Figura 17 - Existencia de Departamentos de Biomédica.....	49
Figura 18 - Realización de Mantenimiento Preventivo.....	50
Figura 19 - Histograma, Preg. N1.....	52
Figura 20 - Histograma, Preg. N2.....	53
Figura 21 - Histograma, Preg. N3.....	53
Figura 22 - Histograma, Preg. N4.....	54
Figura 23 - Histograma, Preg. N5.....	55

Figura 24 - Matriz de Diagramas de Dispersión	57
Figura 25 - Conocimiento Previo sobre CMMS	58
Figura 26 - Conocimiento Previo y Disposición a Utilizar un CMMS	59
Figura 27 - Promedio de OTs Atendidas por Ente Rector y Nivel de Atención	60
Figura 28 - Requisitos de Diseño.....	62
Figura 29 - Diagrama de Entidad-Relación de la Base de Datos Propuesta	72
Figura 30 - Diagrama de Ventanas del Prototipo Ilustrativo	75
Figura 31 - Pantalla Principal del Prototipo Ilustrativo	76
Figura 32 – Pantalla de Autenticación de Usuarios.....	92
Figura 33 - Pantalla de Módulo de Tipos de Equipos.....	93
Figura 34 - Pantalla de Creación de Registro (Create).....	93
Figura 35 - Pantalla de Lectura de Registro (Read)	94
Figura 36 - Pantalla de Edición de Registros (Update)	94
Figura 37 - Pantalla de Eliminación de Registros (Delete).....	95
Figura 38 - Orden de Trabajo, HNMCR.....	96
Figura 39 - Encuesta Aplicada a Respondientes.....	97
Figura 40 - Método CRUD y Servicios.....	98
Figura 41 - Pantalla Principal, Prototipo CLI	99
Figura 42 - Visualización de Datos en DBeaver	100
Figura 43 - Gráfica de Valor (%) de Funciones.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Resumen de Leyes y Normativas Relacionadas a la Implementación de Sistemas CMMS	28
Tabla 2 - Matriz Metodológica.....	43
Tabla 3 - Operacionalización de las Variables de Investigación	45
Tabla 4 - Análisis Estadístico Descriptivo de Resultados de Escala de Likert.....	51
Tabla 5 - Matriz de Correlación de Pearson.....	56
Tabla 6 - Ajuste por Omisión de Elemento	56
Tabla 7 - Tabla de Frecuencias, Requisitos de Diseño de CMMS.....	61
Tabla 8 - Valoración de Funciones Específicas	63
Tabla 9 - Tablas Principales de la Base de Datos.....	65
Tabla 10 - Tabla de Fabricantes de Equipos Médicos.....	66
Tabla 11 - Tabla de Inventario de Equipos Médicos	66
Tabla 12 - Tabla de Modelos de Equipos Médicos.....	67
Tabla 13 - Tabla de Órdenes de Trabajo.....	67
Tabla 14 - Tabla de Personal de la Institución	68
Tabla 15 - Tabla de Unidades Clínicas de la Institución	69
Tabla 16 - Tabla de Usuarios del CMMS.....	69
Tabla 17 - Tablas Auxiliares de la Base de Datos.....	70
Tabla 18 - Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación.....	82
Tabla 19 - Resumen de Referencias Indizadas en el Marco Teórico	102

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo I – Pantallas del Prototipo Ilustrativo de CMMS.....	92
Anexo II – Formato de Orden de Trabajo, HNMCR	96
Anexo III – Encuesta Aplicada, Formato Visto por Respondientes.....	97
Anexo IV – Método CRUD y Servicios.....	98
Anexo V – Pantalla Principal, Prototipo CLI.....	99
Anexo VI – Visualización de Base de Datos en DBeaver	100
Anexo VII – Gráfica de Valor (%) de Funciones de un CMMS.....	101
Anexo VIII – Síntesis de Referencias del Marco Teórico.....	102

LISTA DE SIGLAS

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers
BD	Base de Datos
CESAMO	Centro de Salud con Médico Odontólogo
CESAR	Centro de Salud Rural
CLI	Command Line Interface
CLIPER	Clínica Periférica
CMDMS	Computerized Medical Device Management System
CMI	Clínica Materno Infantil
CMMS	Computerized Maintenance Management System
CRUD	Create, Read, Update, Delete
DER	Diagrama Entidad-Relación
DNBE	Dirección Nacional de Bienes de Estado
FUTSH	Federación Unitaria de Trabajadores de la Salud de Honduras
GUI	Graphical User Interface
HMC	Honduras Medical Center
HNMCR	Hospital Nacional Mario Catarino Rivas
HV	Hospital del Valle
IC	Ingeniería Clínica

IDE	Integrated Development Environment
IHCIT	Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra
IHSS	Instituto Hondureño de Seguridad Social
IHSS BA	Hospital Barrio Abajo
IHSS HE	Hospital de Especialidades
IHSS SPS	Hospital Regional del Norte, San Pedro Sula
INCT	Instituto Nacional Cardiopulmonar "Tórax"
INCIBE	Instituto Nacional de Ciberseguridad (España)
KPI	Key Performance Indicator
MC	Mantenimiento Correctivo
MDI	Medical Device Integration
MP	Mantenimiento Preventivo
MPP	Mantenimiento Preventivo Planificado
OMS	Organización Mundial de la Salud
OPS	Organización Panamericana de la Salud
OT	Orden de Trabajo
SESAL	Secretaría de Salud
SQL	Structured Query Language
VARCHAR	Variable Character

I. INTRODUCCIÓN

En el ambiente clínico-hospitalario existen dos categorías que pueden describir las máquinas y herramientas utilizadas para el cuidado de la salud: dispositivos y equipos médicos. La primera categoría, según la Organización Mundial de la Salud (2012), se comprende por cualquier "... producto, instrumento, aparato o máquina que se usa para la prevención, el diagnóstico o el tratamiento de enfermedades y dolencias, o para detectar, medir, restaurar, corregir o modificar la anatomía o función del organismo con un fin sanitario" (p. 6). La segunda categoría se ve englobada dentro de la primera, con la particularidad de que "... exige[n] calibración, mantenimiento, reparación, capacitación del usuario y desmantelamiento, actividades que por lo general están a cargo de ingenieros clínicos" (p. 6).

Los procesos de mantenimiento de equipos médicos pueden ser planificados o no planificados (Rani et al., 2014). Es importante para la institución tener un registro de las labores realizadas sobre el equipo, reemplazo de piezas o consumibles, garantías, información identificadora, entre otros datos. Para ello se puede emplear un CMMS, «*Computerized Maintenance Management System*», *Sistema Computarizado de Gestión de Mantenimiento* en español. Esta es una herramienta de software que permite recolectar registros de mantenimiento, registros de inventario, crear agendas de mantenimiento planificado, crear un inventario de refacciones, entre otras características (Phillips, 2002). Al tratarse de un sistema digital, se cuenta con la ventaja de que todos sus datos pueden ser indexados en una base de datos que permite buscar información de manera más eficiente en comparación con un mismo registro en papel y lápiz.

Esta investigación se dividirá en un total de diez capítulos, incluyendo esta introducción. En el Capítulo II abordará el problema de investigación, siendo la necesidad de un sistema de rastreo de labores de mantenimiento realizadas en el contexto biomédico hospitalario. El Capítulo III presentará los conceptos y bases teóricas requeridas para comprender el funcionamiento de un CMMS y su relación a la administración biomédica hospitalaria. El Capítulo IV abordará las Metodologías de Diseño y Validación empleadas para el desarrollo de la investigación. El Capítulo V desglosará la información recabada mediante los métodos descritos en el Capítulo IV y el significado de dicha información para la investigación. El Capítulo VI abarcará las Conclusiones que respondan a los Objetivos General

y Específico planteados en el Capítulo II. El Capítulo VII presentará algunas recomendaciones para investigaciones futuras en esta rama. El Capítulo VIII explorará la aplicabilidad del trabajo investigativo en el mundo real. El Capítulo IX planteará algunas ramas de investigación que pueden ser exploradas utilizando este trabajo como base. Finalmente, el Capítulo X presenta una Tabla de Conformidad de los Segmentos de la Tesis, es decir los capítulos previos, con la investigación realizada.

En este trabajo se presentarán los resultados obtenidos de un periodo de 10 semanas de desarrollo para el diseño y prototipado de un CMMS, junto con una recolección de información cualitativa obtenida de una muestra de expertos en el área de ingeniería clínica. Se espera que los resultados de este proyecto puedan ser utilizados para crear una herramienta informática eficiente y modular para agilizar la gestión de equipos médicos y su mantenimiento en las instituciones clínico-hospitalarias de Honduras.

II. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1 PRECEDENTES DEL PROBLEMA

La adopción de las tecnologías informáticas en el Sector Salud de Honduras es relativamente reciente, iniciando a partir del año 2000, siendo empleada para la recolección de información sobre distintas patologías con el fin de realizar estudios estadísticos sobre aquellas enfermedades que afecten a la población hondureña (Bermúdez-Madriz, 2011).

A partir de entonces, la adopción de nuevas tecnologías informáticas para el Sector Salud ha tomado un enfoque meramente clínico, obviándose la recolección intensiva de información sobre otros aspectos clave como la administración de equipos médicos al no estar debidamente definida en las leyes, planes o proyectos de Salud del país (véase el Capítulo III, Marco Legal).

Instituciones como el Hospital Nacional Mario Catarino Rivas utilizan métodos de recolección analógicos como el papel y lápiz para la gestión de órdenes de trabajo (véase el Anexo II), lo cual dificulta el recabado de información al necesitarse revisar página por página cada orden recibida. Se emplea software como hojas de cálculo para el tabulado de información, pero este tipo de software no es apto para la administración biomédica hospitalaria.

2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La mayoría de las instituciones sanitarias en Honduras carecen de Departamentos de Ingeniería Clínica, por lo cual es común que se empiece a acumular un "inventario" de equipos en mal estado. La reparación de estos recae en brigadas técnicas enviadas por la Secretaría de Salud o entidades privadas. Donde la espera de estas brigadas no sea una opción viable, únicamente queda como recurso la contratación de servicios externos o el descarte de equipos que podrían ser reparados. Las pocas instituciones que sí cuentan con Departamentos de Ingeniería Clínica usualmente manejan un volumen de trabajo excesivo, lo cual dificulta el desempeño de sus labores. El registro, seguimiento y cumplimiento de las gestiones de trabajo, principalmente aquellas relacionadas al mantenimiento de equipos médicos, se dificultan al no contar con sistemas digitales especializados que agilicen estas tareas.

2.3 JUSTIFICACIÓN

Capsite, como se citó en Terry (2012), condujo una encuesta sobre una muestra de 300 hospitales acerca de la MDI («*Medical Device Integration, Integración de Dispositivos Médicos*»). El 44% de los encuestados afirmaron que habían adquirido software de MDI, y de esos respondientes el 37% citó como razonamiento detrás de la adquisición la mejoría de la eficiencia de la atención clínica. La implementación de sistemas informáticos en el sector de atención a la salud usualmente persigue el incremento de la eficiencia al nivel macro de la institución, por tanto, un sistema CMMS sería bien visto por la mayoría de las instituciones en el rubro, particularmente aquellas de gran tamaño (ej. más de 400 camas) debido al incremento de la carga de trabajo sobre los equipos médicos de la institución y el mantenimiento que requieran.

En un contexto más generalizado, DPSI (1994) como se citó en United States Department of Energy (2010) encuestó a 558 compañías y encontró un incremento de la productividad sobre la ejecución de mantenimientos del 28.3%, una reducción del tiempo fuera de servicio del 20.1%, un ahorro del 19.4% sobre costos materiales, una reducción del tamaño del inventario de refacciones del 17.8% y un tiempo de 14.5 meses antes de obtener un retorno total sobre la inversión en el sistema CMMS.

La implementación a un CMMS a medida permitiría que el flujo de órdenes de trabajo de una institución sanitaria pase a ser completamente digital y facilitaría la resolución de estas al también implementar registros ampliados de los equipos médicos de la institución. El diseño del CMMS, fundamentado en los requerimientos particulares de la institución, aporta una dirección clara y concisa para la etapa de desarrollo y agilizar su implementación.

2.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

- ¿Cuáles son las características clave que un CMMS personalizado debe tener para ser efectivo en la gestión biomédica hospitalaria?
- ¿Cuál es la situación actual, conceptos y teorías que fundamenten la implementación de sistemas CMMS?
- ¿Qué tipo de metodologías pueden ser definidas para la investigación y desarrollo de una propuesta de un CMMS a nivel local?

- ¿Qué tipo de características debe tener un CMMS para cumplir con los requerimientos de los usuarios en el ambiente hospitalario local?
- ¿Qué nivel de funcionalidad puede tener un CMMS programado en lenguaje C# a bajo costo?

2.5 OBJETIVOS

2.5.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer un diseño de CMMS personalizado para aplicaciones de gestión biomédica hospitalaria.

2.5.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la situación actual, conceptos y teorías que fundamenten la implementación de sistemas CMMS.
- Identificar las metodologías más adecuadas para la investigación y desarrollo de una propuesta de un CMMS a nivel local.
- Definir las características que los usuarios en el ambiente hospitalario local consideran como requisitos para un CMMS.
- Determinar el grado de funcionalidad que se obtiene del desarrollo de un CMMS basado en lenguaje de programación C# a bajo costo.

III. MARCO TEÓRICO

El desarrollo de un diseño para un sistema CMMS requiere un previo conocimiento sobre aspectos técnicos y teóricos relevantes a sus distintas facetas. Como herramienta informática, es un programa de computadora cuyas capacidades dependen de aspectos como su lenguaje de programación, implementación de bases de datos y sistema operativo objetivo. Como herramienta administrativa, se fundamenta en la bases teóricas de la ingeniería clínica y la administración hospitalaria. Dentro de este capítulo se explorarán aquellos conceptos que sean juzgados como necesarios para comprender la funcionalidad y propósito de un sistema CMMS dentro de un contexto biomédico hospitalario.

3.1 SITUACIÓN ACTUAL

Se han realizado investigaciones previas a la presente acerca del desarrollo e implementación de sistemas CMMS en el ámbito biomédico hospitalario, particularmente en Chile, Malasia y Tailandia. No se encontraron instancias públicamente registradas sobre la implementación de sistemas CMMS en Honduras, independiente del rubro.

Debido a que la propuesta de diseño para el sistema CMMS se ambientará al contexto de Salud pertinente a San Pedro Sula, se detallará brevemente la realidad de la administración biomédica del Hospital Nacional Mario Catarino Rivas.

3.1.1 MACROENTORNO

Países como Chile, Malasia y Tailandia ha sido objeto de estudio por diferentes autores. En Chile, se diseñó e implementó un CMMS para el Hospital Naval Almirante Nef en Viña del Mar, con el objetivo de mejorar la productividad del personal biomédico en un entorno laboral con rotación anual de los miembros de la Armada de Chile. En Malasia Peninsular, se llevó a cabo un estudio para evaluar el uso y las quejas de los sistemas de CMMS en hospitales públicos, donde la falta de capacitación y la ciberseguridad fueron las principales preocupaciones. Por último, en Tailandia, se desarrolló un CMDMS especializado en la gestión de recursos humanos y equipos médicos en el Hospital de Pathum Thani. En general, estos estudios muestran la importancia de adaptar los CMMS a las necesidades específicas de cada institución y la necesidad de capacitar adecuadamente al personal en su uso.

3.1.1.1 IMPLEMENTACIÓN DE CMMS EN CHILE

Acevedo, Fuentes y Enderle (2005) diseñaron e implementaron un CMMS para el Hospital Naval Almirante Nef en Viña del Mar, Chile. Este hospital cuenta con 300 camas y atiende a miembros de la Armada de Chile. Debido a regulaciones particulares a la Armada chilena, el personal clínico de la institución debe de ser rotado anualmente a otros hospitales navales. Este proceso de rotación dificulta las labores del departamento de biomédica de la institución, puesto que es difícil capacitar una base laboral en cambio constante. Por ello, el Hospital Naval decidió recurrir a solución a medida que también acomodara el rastreo de productividad de los empleados, la tasa de cumplimiento de órdenes de trabajo y la obsolescencia de equipos.

El desarrollo del CMMS fue fundamentado en la observación cuidadosa de los procesos internos del Hospital Naval y tomaron como referencia las buenas prácticas de tres hospitales en Connecticut, Estados Unidos. El programa fue desarrollado en el lenguaje de programación Visual Basic para crear la interfaz de usuario (Figura 1) y se utilizó Microsoft Access para alojar la base de datos con la información de los equipos de la institución. Ambas de estas herramientas no son recomendadas en la actualidad, prefiriéndose ahora utilizar el lenguaje C# o Java para el desarrollo de la aplicación y un gestor de bases de datos relacionales más robusto como MySQL, PostgreSQL o MariaDB. Sin embargo, durante el desarrollo de la aplicación, si bien las herramientas utilizadas no eran las recomendadas, tampoco se consideraban inadecuadas u obsoletas.

Los autores mencionan también que la decisión de crear un CMMS a medida tiene ventajas y desventajas en comparación a la implementación de una solución comercial, pero el beneficio obtenido al diseñar el CMMS alrededor de las necesidades del hospital, en vez de recontextualizar las necesidades en los términos de una solución comercial, le permite al hospital aprovechar la información y parámetros existentes.

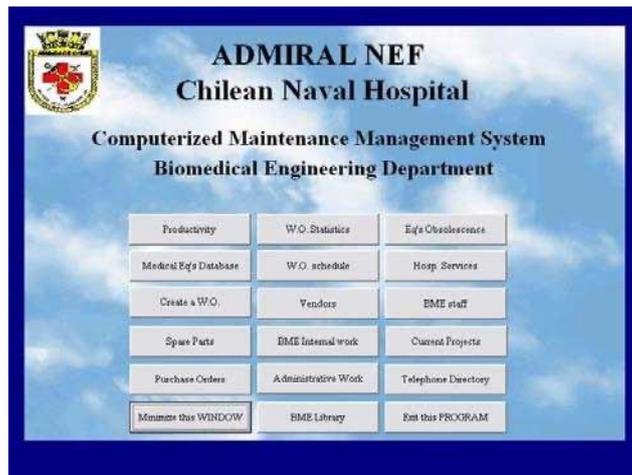


Figura 1 - Interfaz de Usuario, CMMS del Hospital Naval Almirante Nef

Fuente: (Acevedo et al., 2005).

3.1.1.2 ANÁLISIS DE IMPLEMENTACIÓN DE CMMS EN MALASIA PENINSULAR

Salamit y Wahid (2021) condujeron un estudio en Malasia Peninsular con el propósito de recabar información acerca de los hábitos de uso, beneficios y quejas acerca del uso de sistemas de CMMS en hospitales públicos utilizando encuestas, contando con una población de 39 profesionales en labores administrativas, técnicas y misceláneas. En su estudio encontraron que poco más de la mitad de las acciones tomadas en el CMMS corresponden al manejo de órdenes y solicitudes de trabajo (35.9% y 15.4%, respectivamente), mientras que las tareas relacionadas al manejo de inventarios de equipos médicos conforman poco más de un cuarto (20.5% y 7.7%, correspondientes a la gestión de equipos y el control de inventario, respectivamente).

Las quejas más comunes corresponden a dudas relacionadas a la ciberseguridad (35.9%) y la falta de capacitación sobre el uso del CMMS (23.1%). Las dudas relacionadas a la ciberseguridad se basan en la utilización de almacenaje en la nube, lo cual genera preocupaciones en el personal administrativo sobre un posible ataque de interceptación de datos durante las transferencias a la nube. La falta de capacitación, a mención de los autores, puede ser resuelta al solicitar material didáctico, acompañamiento y asesoría acerca del uso a los proveedores de los sistemas CMMS, en este caso comerciales. También proponen un modelo de enseñanza donde se capacita a un miembro designado del personal de la institución para que este se encargue de capacitar al resto de los empleados.

Cabe resaltar que de los miembros del personal encuestados, el 69.23% utilizaba un CMMS con implementación en PC y dispositivos móviles. El acceso móvil al CMMS es una característica de alta utilidad para la evaluación de equipos en el campo de trabajo, lo cual sería de gran utilidad para el personal técnico.

3.1.1.3 IMPLEMENTACIÓN DE CMMS EN TAILANDIA

Nirapai et al. (2018) desarrollaron un CMMS para el Hospital de Pathum Thani, Tailandia. Este CMMS se enfoca particularmente en el manejo del recurso humano de la institución como la gestión de sus equipos médicos. Este enfoque se traslada fuertemente al diseño del CMMS, a tal punto que se le considera una variante especializada denominada CMDMS («*Computerized Medical Device Management System*», *Sistema Computarizado de Gestión de Dispositivos Médicos*).

Los autores desarrollaron el CMDMS utilizando MySQL como gestor de base de datos, el lenguaje de programación PHP para la integración a un servidor en línea y un sitio web accesible tanto en dispositivos móviles como PC. El acceso al CMDMS es regulado por un sistema de autenticación de usuario, el cual a su vez implementa un sistema de roles de usuario (Figura 2). El CMDMS es una mejora sobre el sistema de mantenimiento preventivo que había sido implementado por el Hospital de Sri Sawan al implementar módulos de mantenimiento correctivo, inventario global (compartido con otras instituciones), descarte de equipos médicos y gestión de la carga de trabajo.

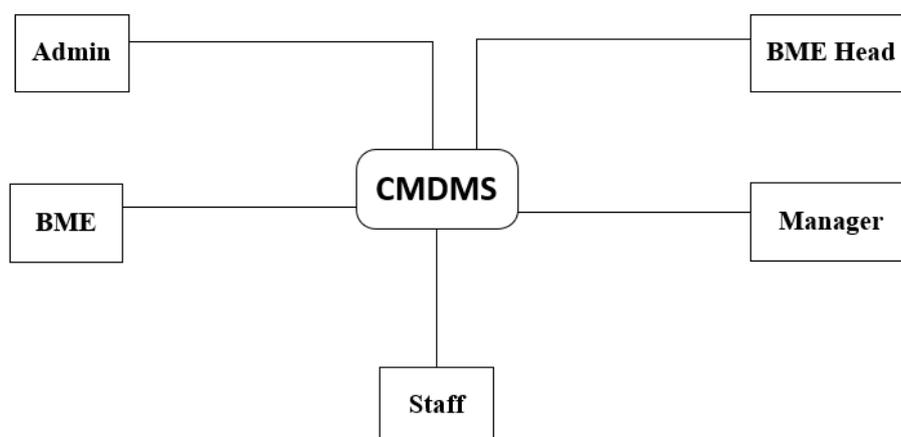


Figura 2 - Roles de Usuario, CMDMS

Fuente: (Nirapai et al., 2018).

3.1.2 MICROENTORNO

En el contexto de la gestión de equipos médicos, es importante considerar los factores ambientales en los cuales éstos son operados. En Honduras, por ejemplo, la humedad relativa promedio es superior al 60% y la temperatura oscila entre 26.9 a 27.5 °C, valores que se alejan de los límites recomendados por la normativa ASHRAE para instalaciones médicas. La Organización Mundial de la Salud señala que estos factores ambientales pueden afectar negativamente el desempeño y la vida útil de los equipos médicos, derivando así en un incremento sobre las labores de mantenimiento que debe realizar una institución. En este contexto, el Hospital Nacional Mario Catarino Rivas (HNMCR) implementa varios sistemas de registro e inventariado de equipos médicos, tanto en formato papel como digital, pero estos no están estandarizados, lo que dificulta su seguimiento y análisis.

3.1.2.1 CONDICIONES CLIMÁTICAS EN SAN PEDRO SULA Y SUS EFECTOS EN EL EQUIPO MÉDICO

San Pedro Sula tiene una humedad relativa promedio del ~80% (Figura 3) mientras que la normativa ASHRAE 170-2017, Adenda P establece un límite inferior del 20% hasta, comúnmente, un máximo del 60% para instalaciones médicas (ASHRAE, 2017). Honduras, por lo general, mantiene una humedad superior al 60% en todos sus departamentos

La temperatura promedio de San Pedro Sula oscila entre 26.9 a 27.5 °C (Figura 4), siendo superior entonces al rango de temperaturas propuesto de 22 hasta 26 °C en la normativa ASHRAE 170-2017, Adenda N (ASHRAE, 2017).

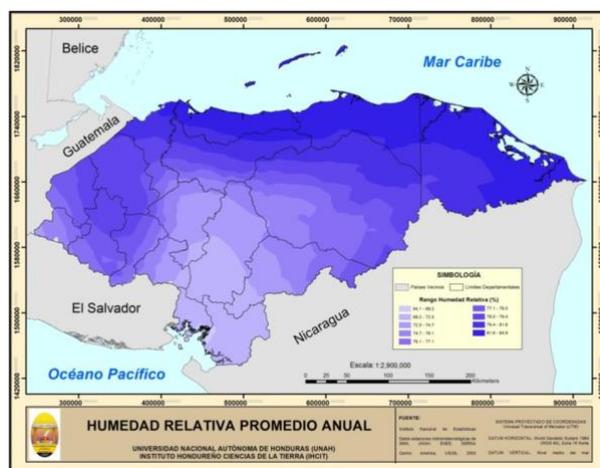


Figura 3 - Humedad Relativa Promedio Anual de Honduras

Fuente: (IHCIT, 2012).

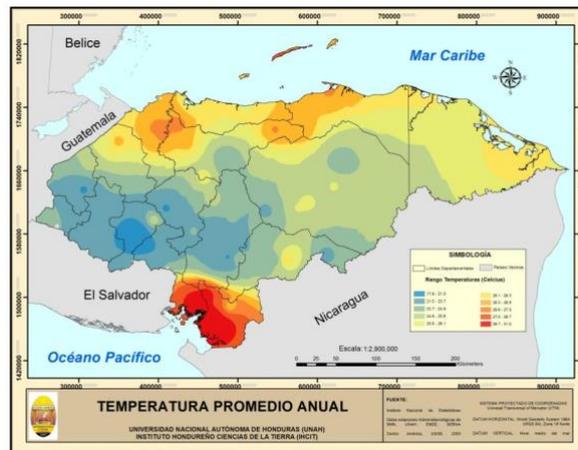


Figura 4 - Temperatura Promedio Anual de Honduras

Fuente: (IHCIT, 2012).

La Organización Mundial de la Salud (2012) menciona que los factores ambientales "... como altas temperaturas y la humedad, pueden afectar negativamente a equipos médicos diseñados para climas templados o entornos controlados. Los procedimientos de mantenimiento en un país o una región en particular deberán adaptarse a estos factores locales".

En particular, Baylakoğlu et al. (2021) destacan que los problemas relacionados a la humedad relativa usualmente tienen como consecuencia la corrosión y alteración de propiedades electrónicas de los componentes. La temperatura tiene una relación con la humedad relativa mediante el punto de rocío, el cuál Baylakoğlu et al. definen como la temperatura de saturación del vapor de agua en el aire. Afirman que el punto de rocío puede utilizarse para determinar la probabilidad de condensación, donde la temperatura ambiente se utiliza para calcular el punto de rocío.

En base estos datos recabados, se puede inferir que Honduras es un país naturalmente hostil hacia el equipo médico, particularmente en el caso de San Pedro Sula que es tanto una ciudad húmeda como caliente. Un equipo que sea operado correctamente tendrá una mayor tasa de fallas en San Pedro Sula por estos factores ambientales, resultando en una reducción del tiempo en el cual el equipo se encuentre disponible para una institución. Sin un sistema de archivo sobre mantenimientos y trabajos realizados, una institución no tendría la capacidad de definir puntualmente si ciertas fallas son productos de errores de operación o factores ambientales.

3.1.2.2 HOSPITAL NACIONAL MARIO CATARINO RIVAS

El Hospital Nacional Mario Catarino Rivas implementa varios sistemas a base tanto a papel y lápiz como digitales para el registro e inventariado de sus equipos médicos. La institución no mantiene un factor común entre estos sistemas, dificultando el rastreo para un equipo individual.

El HNMCR implementa un sistema de digitalizado de órdenes de trabajo utilizando software de hojas de cálculo y herramientas automatizadas programadas en el lenguaje de programación Python. Este sistema, junto con las herramientas automatizadas, son utilizadas exclusivamente por la Unidad de Equipos Médicos de la institución.

La Unidad de Equipos Médicos del HNMCR atendió aproximadamente 183 órdenes de trabajo durante el año del 2022, de las cuales 116 estaban relacionadas a tareas de mantenimiento como MP, MC, Calibración e Inspección. A su vez, de las 183 órdenes registradas, 79 no contaban con su número de identificación institucional, dificultando su rastreo.

3.2 CONCEPTUALIZACIÓN

Existen ciertos conceptos básicos que deben de ser abordados para tener una idea general sobre los temas explorados en las Teorías de Sustento, sin embargo, al no ser el foco de esta investigación, se presentan brevemente en un formato de glosario.

3.2.1 INGENIERÍA CLÍNICA

- **Unidad de Ingeniería Clínica:** Es la unidad que usualmente se encarga de la administración y mantenimiento de equipos médicos, pero que también realiza labores de capacitación, asesoría en compras institucionales y/o supervisión de las instalaciones clínicas (Organización Mundial de la Salud, 2012).
- **MP:** Mantenimiento Preventivo, se entiende como todas las actividades programadas que aseguran la funcionalidad de los equipos y prevenir averías o fallas (Organización Mundial de la Salud, 2012).
- **MC:** Mantenimiento Correctivo, restituye la función de un dispositivo averiado y permite ponerlo nuevamente en servicio. (Organización Mundial de la Salud, 2012).

- **MPP:** Mantenimiento Preventivo Planificado, es aquel que se debe de elaborar un programa de mantenimiento apropiado y costo eficaz acorde con la situación, es posible prever qué piezas será necesario reemplazar y con qué frecuencia. (Organización Mundial de la Salud, 2012).
- **OT:** Orden de Trabajo, es el documento que comunica una petición de servicio a la Unidad de Ingeniería Clínica (Medina et al., 2015).

3.2.2 PROGRAMACIÓN

- **Lenguaje de Programación:** Es un sistema de comunicación humano-computadora que permite crear instrucciones complejas para que estas sean ejecutadas por el computador (Kernighan & Ritchie, 1988b).
- **Compilador:** Es el sistema que convierte el código legible por humanos a instrucciones en lenguaje binario para que estas sean ejecutadas por el CPU (Thain, 2020).
- **Aplicación:** Es una recolección de instrucciones entrelazadas que permite realizar alguna acción en particular (Guédez, 2011).
- **Software Comercial:** Son aplicaciones desarrolladas y distribuidas por entes independientes. Estas aplicaciones pueden ser de paga o gratis. Suelen tener un nivel de soporte técnico superior (Montúfar, 2006).
- **Software a Medida:** Son aplicaciones desarrolladas según los requerimientos presentados a los desarrolladores. Estas aplicaciones suelen ser más efectivas que las comerciales, pero carecen del mismo nivel de soporte del cual gozan las aplicaciones comerciales (Villar, 2006).

3.2.3 BASES DE DATOS

- **Tablas:** Son la unidad básica de trabajo en la gestión de datos, estas deben de ser creadas con antelación e integradas a la base de datos (Oppel & Sheldon, 2008).
- **Llaves:** Son campos de datos compartidos entre dos o más tablas, pueden ser foráneas si su tabla de origen es distinta a la tabla seleccionada o primaria si son el identificador único para la tabla seleccionada (Oppel & Sheldon, 2008).

- **Relaciones:** Es el tipo de relación que tienen dos o más tablas entre sí según su llave, pueden ser relaciones uno-a-uno, uno-a-muchos, entre otras. (Oppel & Sheldon, 2008)
- **Queries:** Consultas, son peticiones realizadas a la base de datos para que retorne la información deseada utilizando el lenguaje SQL (Oppel & Sheldon, 2008).
- **SQL:** *Structured Query Language*, es el lenguaje de programación utilizado para realizar las consultas a la base de datos (Oppel & Sheldon, 2008).
- **Comandos:** Son las acciones particulares que pueden ser realizadas con el lenguaje SQL, como la selección de campos, selección de proveniencia de datos y condiciones de búsqueda (Oppel & Sheldon, 2008)
- **Almacenamiento Local:** Indica que la información en una base de datos se almacena físicamente en el disco duro, de la computadora del usuario (Instituto Nacional de Ciberseguridad, 2016).
- **Vistas:** Son tablas virtuales formadas por la manipulación de las tablas base persistentes, se utilizan para almacenar una consulta particular sin afectar los datos persistentes (Oppel & Sheldon, 2008).

3.2.4 CIBERSEGURIDAD

- **Ofuscación:** Es una técnica de ciberseguridad que consiste en discreción y secrecía en respecto al funcionamiento del software, en particular sobre sus medidas de seguridad (Ross et al., 2021)
- **Cifrado Extremo a Extremo:** Una técnica de cifrado que encripta comunicaciones entre dos puntos para que esta, en caso de ser interceptada, sea ilegible para el atacante (Greenberg, 2014, como se citó en Rühlig y Björk, 2020).
- **Rol de Usuario:** Una técnica de diseño de software, el rol del usuario asigna privilegios de forma jerárquica a distintas clases de usuarios. (Oracle, 2008)
- **Red Local:** Una red de computadoras conectadas entre sí de forma física, usualmente por conexión LAN a un servidor común (INCIBE, 2016).
- **Air Gap:** Una técnica de ciberseguridad que consiste en eliminar toda conexión entre la red local al internet, aislando a esta de ataques por la web (Arendt, 2016).

3.3 TEORÍAS DE SUSTENTO

Los principios y conceptos que fundamentan el diseño y desarrollo de un CMMS abordan desde la Administración Hospitalaria hasta los Tipos de Software que pueden ser empleados en el contexto biomédico hospitalario. La información recabada se utilizará para fundamentar el desarrollo de la Metodología de esta investigación.

3.3.1 ADMINISTRACIÓN HOSPITALARIA

Buchbinder y Shanks (2016) definen la administración hospitalaria como "... profesión que provee liderazgo y dirección a la organización que entregan servicio a la salud personal y a divisiones, departamentos, unidades o servicios dentro de la organización". (p. 33)

Es de esperarse que una organización como un hospital cuente con una gran variedad de profesionales que manejan los procesos internos de la institución, como sean el manejo de recursos humanos, dirección general de la institución, evaluación de compras y/o, particularmente, la administración de equipos médicos. Para esta última tarea, usualmente es empleado un Ingeniero Clínico.

3.3.1.1 INGENIERÍA CLÍNICA

Derrico et al. (2011) definen a la ingeniería clínica de la siguiente forma:

La Ingeniería Clínica (IC) representa la parte de la Ingeniería Biomédica enfocada en la aplicación de teorías y metodologías del amplio campo de la ingeniería biomédica para mejorar la calidad de los servicios de salud. Sus actividades se refieren especialmente a la gestión adecuada de las tecnologías biomédicas (desde la compra hasta el control de riesgos) y al desarrollo y puesta a punto de sistemas de información hospitalaria y redes de telemedicina. La IC se combina con el conocimiento de la medicina para llevar a cabo actividades de atención médica al proporcionar experiencia en un amplio espectro de temas, desde fisiología humana y biomecánica hasta electrónica e informática. (p. 1)

En las instituciones clínico-hospitalarias, es común que el Ingeniero Clínico sea el encargado de la administración de equipos médicos, la aprobación de proyectos hospitalarios, creación de pliegos de condiciones para licitaciones, responsabilidad o asesoría en adquisición de equipos, entre otras funciones.

3.3.1.2 CAPACITACIÓN

Siliceo (2004) propone el siguiente concepto de capacitación: "... la capacitación consiste en una actividad planeada y basada en necesidades reales de una empresa u organización y orientada hacia un cambio en los conocimientos, habilidades y actitudes del colaborador". También presenta los siguientes puntos:

1. Las organizaciones en general deben dar las bases para que sus colaboradores tengan la preparación necesaria y especializada que les permitan enfrentarse en las mejores condiciones a su tarea diaria.
2. No existe mejor medio que la capacitación para alcanzar altos niveles de motivación, productividad, integración, compromiso y solidaridad en el personal de una organización.

En el contexto la ingeniería clínica, la capacitación del personal es la tarea de enseñanza sobre el uso, operación y/o manipulación segura y adecuada de los equipos médicos de la institución.

3.3.2 MANTENIMIENTO HOSPITALARIO

El Instituto Británico de Estándares (1984) define el mantenimiento como "la combinación de todas las acciones técnicas y administrativas asociadas cuya intención sea retener un activo en, o restaurarlo a, un estado en el cual pueda cumplir con su función requerida". (p. 3)

Lie y Chun (1986) proponen que dentro del mantenimiento existen dos categorías según el rigor del trabajo realizado, con una categoría correspondiendo a "reparación mínima", aquella dónde únicamente se repare o reemplaza el componente afectado, o "reemplazo correctivo", cuando se hace un cambio completo sobre el sistema que haya presentado una falla en el equipo.

La Secretaría de Salud de Honduras, OPS y FUTSH, (2005) afirman lo siguiente:

La infraestructura hospitalaria y de los centros de salud es deficiente, los servicios no son de la calidad y cobertura requeridas y, en encuestas recientemente realizadas, la percepción de la calidad de la atención por parte de los usuarios no es buena. Algunos centros públicos datan de principios del siglo pasado y requieren fuertes inversiones en infraestructura y equipo para proporcionar los servicios en condiciones óptimas y exentas de riesgo. El mantenimiento ha sido escaso y ha motivado el constante deterioro, tanto de la infraestructura como del equipo. (p. 27)

La falta de mantenimiento, entonces, es considerada como un factor negativo en respecto al estado de los equipos y la infraestructura de los centros de salud.

El mantenimiento hospitalario abarca tanto equipos como las instalaciones de la institución. El mantenimiento como tal puede ser preventivo, o sea, se realiza antes de que el equipo registre fallas o correctivo cuando ya se ha registrado alguna falla.

3.3.2.1 MANTENIMIENTO PREVENTIVO

El mantenimiento preventivo tiene como propósito reducir el riesgo de lesiones al usuario o al paciente, reducir el costo del ciclo de vida del equipo a través de este, cumplir con normativas y estándares y mantener su función esperada (De Lemos, 2004). Este proceso puede ser planificado o puede ser realizado de forma puntual si se sospecha que el equipo está próximo a fallar, si ha pasado un periodo extendido de tiempo al último mantenimiento realizado o si su función se ha deteriorado más allá de su desviación esperada.

El mantenimiento preventivo planificado (MPP) es aquel que sigue una agenda determinada según las características particulares del equipo. El periodo entre las acciones de mantenimiento es regular y programa en colaboración con las unidades que sean responsables por los equipos en la institución.

El mantenimiento preventivo, según Wienker et al. (2015), es una medida proactiva para el cuidado del equipo de la institución. Por consecuente, el tiempo de baja de los equipos disminuye mientras que, a la vez, su fiabilidad aumenta al mantenerlos en buenas condiciones.

3.3.2.2 MANTENIMIENTO CORRECTIVO

El mantenimiento correctivo se realiza únicamente cuando el equipo ya ha fallado, por consecuente, no puede ser planificado. Se puede considerar al mantenimiento correctivo como el complemento del mantenimiento preventivo, donde ambos comparten una relación inversamente proporcional al otro.

Si bien al aumentar la cantidad de mantenimiento preventivo realizado se reduce el mantenimiento correctivo, siempre existen casos donde el equipo falle antes de lo previsto, como lo puede ser el caso de una sobrecarga eléctrica que derrita los fusibles de un equipo.

3.3.3 BASES DE DATOS

Una base de datos es aquella que contenga distintos datos que estén relacionados entre sí de alguna forma y que, como tal, contenga esas relaciones y su tipo, como lo son uno-a-uno, uno-a-muchos, muchos-a-muchos, entre otras más (Harrington, 2009).

El almacenamiento de datos junto con sus relaciones le permite al usuario realizar consultas sin tener que preocuparse de dónde se encuentre la información físicamente, pero esta funcionalidad es poco eficiente si se aplica de manera global a la base de datos. Por ende, surge la necesidad de poder realizar consultas específicas para ahorrar tiempo computacional, lo cual sería logrado a través del lenguaje SQL.

3.3.3.1 EL LENGUAJE SQL

Las siglas SQL significan *Lenguaje Estructurado de Consultas* en español. SQL es considerado un lenguaje de programación cuyo propósito es la comunicación entre el usuario y la base de datos al poder realizar consultas parametrizadas que devuelvan únicamente la información requerida por el usuario (Oppel & Sheldon, 2008).

La estructura básica de la consulta SQL suele utilizar tres comandos: SELECT, FROM y WHERE. El comando SELECT puede seleccionar columnas, FROM selecciona la tabla de origen de los datos y WHERE aplica alguna condición que filtre los datos no deseados. Esto como tal es algo limitado, ya que solo es posible realizar consultas con una única tabla de origen de datos, pero también existen comandos como JOIN que permiten *juntar* dos o más tablas, sin ser necesario que ambas contengan exactamente los mismos datos. Estos comandos en particular pertenecen a una subcategoría del lenguaje SQL denominado DML, o *Lenguaje de*

Manipulación de Datos (Oppel & Sheldon, 2008). Esta manipulación de la información permite generar nueva información al aplicarse correctamente los comandos previamente mencionados, como, por ejemplo, la creación de una columna de tiempo transcurrido que se genere al tomar una columna de fecha inicial y otra de fecha actual o final.

3.3.3.2 BASES DE DATOS RELACIONALES

Se menciona que las bases de datos contienen relaciones, pero este no siempre es el caso. Por ejemplo, una empresa pequeña podría utilizar Microsoft Excel como "base de datos", aún si este programa no es apto para tal tarea.

La base de datos relacional es considerablemente más compleja, particularmente porque las relaciones entre las tablas que la conforman deben de ser planificadas durante la fase de diseño debido a que la capacidad de agregar más relaciones puede variar en complejidad según el tamaño y las relaciones preexistentes en la base de datos (Harrington, 2009).

Usualmente se recurre a la base de datos relacional cuando existe un grado de *conurrencia*, es decir, que varios usuarios a la vez estén accediendo y/o modificando la información dentro de la base de datos. La robustez computacional necesaria para esta tarea hace que la adopción de software especializado, como MySQL, PostgreSQL o Microsoft SQL Server, sea necesaria.

Las bases de datos relacionales también cuentan con la ventaja de poder ser navegadas con mayor facilidad mediante consultas SQL, y, particularmente, pueden utilizarse las relaciones entre tablas para potenciar dichas consultas.

3.3.4 CIBERSEGURIDAD

La ciberseguridad es el conjunto de tácticas, prácticas, ideas de diseño y medidas implementadas con el propósito de proteger la seguridad y privacidad de los usuarios de algún sistema, programa o aplicación.

Las instituciones clínico-hospitalarias se consideran como objetivos de alta prioridad para distintos adversarios que según Ayala (2016) pueden ser categorizados en cuatro grupos:

1. Hactivistas: Son individuos que participan en actividades de hackeo por distintas razones, pero por lo general no son maliciosos.

2. Ciber-terroristas: Son los brazos informáticos de grupos terroristas como al-Qaeda o Hezbollah.
3. Ciber-criminales: Individuos que participan en actividades de hackeo con propósitos maliciosos como el robo de identidad, fraude bancario, entre otros motivantes.
4. Gobiernos Hostiles: Grupos de hackeo profesionales cuyas actividades son autorizadas por gobiernos mundiales para atacar a sus adversarios.

Un hospital estaría expuesto a ataques de parte de los últimos tres grupos por razones cualesquiera. Uno de los casos de hackeo a instituciones sanitarias más famosos fue el colapso de la red privada del Servicio Nacional de Salud del Reino Unido por el «ransomware», secuestrador de datos, WannaCry en 2017 (BBC News, 2017). Este caso en particular no fue un ataque particularmente dirigido a la institución como tal, pero demuestra que los ciberataques tienen la capacidad de severamente afectar la capacidad de atención a la salud de una población a nivel nacional.

Es necesario, por lo tanto, adoptar medidas de mitigación de riesgos. No es posible crear una red privada completamente impenetrable, pero al implementar medidas de ciberseguridad apropiadas, es posible convertir a la institución en un objetivo mucho más difícil de derrotar, desincentivando a posibles adversarios de perseguir a la institución,

3.3.4.1 AIR GAP

Arendt (2016) describe la «Air Gap», entrehierro en español, como "... el aislamiento físico de la red privado del resto de la net o de la red pública en particular". Esta idea se extiende al aislamiento total de la red privada del internet, dificultando considerablemente el acceso no físico. La «Air Gap» trae consigo otro beneficio: al estar desconectada del internet, es poco probable que los usuarios utilicen las computadoras de la red privada por ocio, evitando que malos hábitos computacionales individuales comprometan a la red.

3.3.4.2 OFUSCACIÓN

Según el Ross et al. (2021), la ofuscación es una táctica de engaño a adversarios que consiste en "ocultar, transformar u ocultar de otro modo los contenidos, las propiedades o la presencia de información u otros activos del adversario". Los autores agregan que esta medida puede ser implementada al mantener encriptada la información en descanso, el encriptado de comunicaciones de datos o el encriptado de autenticadores.

Esta táctica es más efectiva mientras menos información pueda conocer el adversario, por lo cual es importante que los usuarios de la red privada no revelen datos sobre su funcionamiento, sin importar que tan críticos puedan ser. Por ejemplo, si un usuario revela que las computadoras de la red utilizan Microsoft Windows 8, esto llevaría al adversario a buscar debilidades del sistema operativo que pueda explotar para obtener acceso a la red.

3.3.4.3 CIFRADO EXTREMO A EXTREMO

El cifrado extremo a extremo es una técnica criptográfica que consiste en "... un sistema en que solo las partes comunicándose entre sí pueden acceder a la información encriptada y nadie en más durante la comunicación" (Greenberg, 2014, como se citó en Rühlig y Björk, 2020). Se implementa para proteger la información «*en tránsito*» para evitar que un tercero intercepte la comunicación y robe los contenidos de esta, como contraseñas, información bancaria, información personal, entre otros datos. En caso de que esta comunicación sea interceptada, el atacante únicamente obtendría un hilo binario aleatorio, siendo casi imposible descifrar el mensaje encriptado. Cabe mencionar que este protocolo no protege la información «*en reposo*», es decir, aquella alojada en los puntos de comunicación, por lo cual estos también tienen que ser reforzados mediante otras técnicas.

El proceso de cifrado es un proceso matemático intensivo, por lo cual su implementación aumenta los requerimientos de hardware de la red para mantener una velocidad de comunicación aceptable.

3.3.4.4 ROLES DE USUARIO

Los roles de usuario, según Oracle (2008), son los privilegios otorgados a un usuario de algún sistema o aplicación. Definen los privilegios como la combinación de un permiso y un recurso. Los permisos más comunes son «*Read*» (Lectura), «*Write*» (Escritura) y «*Execute*» (Ejecutar). La combinación de permisos de lectura y escritura usualmente es denominada como «*Edit*» (Edición). Un ejemplo de un privilegio es «*Lectura del Folder X*», donde «*Lectura*» es un permiso y «*Folder X*» es un recurso.

Oracle (2008) continúa al mencionar que los roles usuario son "... un método para afrontar riesgos de ciberseguridad ...". Dicho esto, la incorporación de los roles de usuario también tiene una base en lo meramente funcional. Por ejemplo, no es deseable que los empleados tengan acceso a la base de datos que contiene la información contractual de la

institución. Por ende, la asignación de privilegios a cada rol sigue un esquema jerárquico similar a la jerarquía organizacional de una institución, donde los usuarios con mayor jerarquía recibirían más privilegios. Existen dos excepciones a esto, sin embargo, las cuales son los roles de Administrador y «SysAdmin» («System Administrator», Administrador de Sistema). El Administrador de Sistema tiene acceso completo e ilimitado a toda la información del sistema y puede ejecutar cualquier cambio que desee. Los Administradores tienen acceso casi ilimitado al sistema, pero generalmente no pueden ejecutar cambios mayores (ej. borrar una tabla completa de una base de datos).

3.3.5 LOS SISTEMAS CMMS

Mather (2002) describe al CMMS como "... capaz de manejar todos los diversos procesos y procedimientos de la gestión del mantenimiento, ayudar a la organización a hacer que las operaciones sean más eficientes y analizar el equipo para optimizar aún más el desempeño en esa área".

El CMMS es un sistema digital implementado para el manejo y gestión de los procesos de mantenimiento, pero también se extiende al manejo y control de inventario, gestión del recurso humano y, en algunos casos, la capacidad de realizar reportes financieros. Los CMMS tienen como objetivo mejorar la productividad de cualquier institución al ser una medida de mantenimiento proactiva en vez de reactiva.

Estos sistemas están ligados de manera fundamental con las bases de datos puesto que los CMMS como tal son navegadores y editores de bases de datos. La eficacia de un CMMS es dependiente del diseño de la base de datos que le alimenta. La Organización Mundial de la Salud (2012) destaca las siguientes tablas como las más comúnmente implementadas en CMMS hospitalarios:

1. Tipo de Equipo.
2. Modelos de Equipo.
3. Fabricantes/Vendedores.
4. Refacciones.
5. Personal (Recurso Humano).
6. Mantenimiento.
7. Unidades Hospitalarias.

A partir de estas tablas, la OMS recomienda la construcción de módulos para dividir las tareas del CMMS de forma clara y ordenada. Estos módulos son: Módulo de Inventario de Equipos, Módulo de Inventario de Refacciones, Módulo de Mantenimiento y el Módulo de Gestión de Contratos.

Finalmente, el CMMS debe de ser capaz de automatizar ciertas tareas repetitivas, como lo puede ser la asignación de códigos de inventario, generación de reportes de mantenimiento, actualización de campos, entre otras.

3.3.5.1 BENEFICIOS DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN CMMS

Wienker (2015) propone el modelo del "Iceberg" (Figura 5) para describir los costos asociados al mantenimiento, el indica que existen dos tipos de costos: directos e indirectos. Los costos indirectos pueden ser hasta cinco veces mayores que los directos y también incurren en pérdidas de ingresos y menor sostenibilidad institucional.

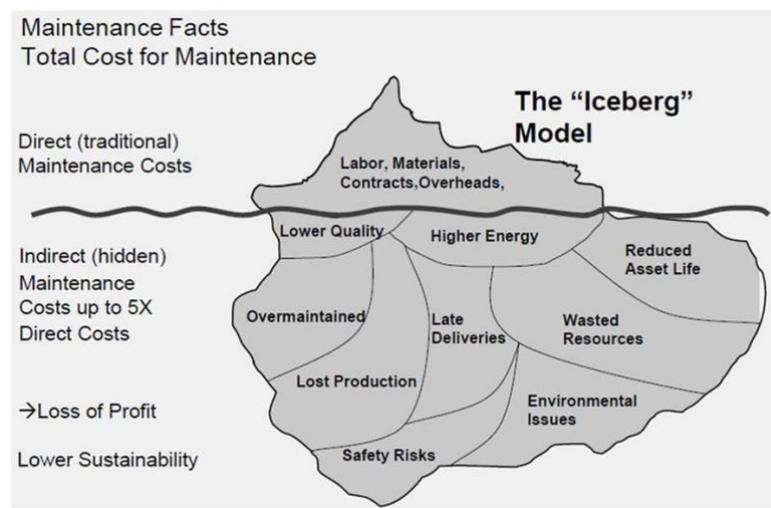


Figura 5. Modelo del "Iceberg", costos Directos e Indirectos Asociados al Mantenimiento de Activos

Fuente: (Wienker, 2015).

Se mencionan, particularmente, cinco costos indirectos, o escondidos, que pueden ser reducidos en gran medida por un CMMS:

1. Baja Calidad: La baja calidad de activos puede ser determinada al incluir parámetros de fabricante, modelo, vendedor y garantía a la base de datos del CMMS. Sí se define la baja calidad como aquellos equipos que necesiten de mantenimiento excesivo, que tengan un tiempo de baja considerable, que fallen poco después del periodo de garantía, entre otros criterios que puede aplicar el Ingeniero Clínico de

la institución, entonces se podrán colocar estos modelos y/o vendedores en lista gris o lista negra.

2. Sobre-mantenidos: Sin un rastreo eficiente de la historia de mantenimientos de un equipo, es posible que este sea mantenido más de lo necesario si se sigue una filosofía de “mejor prevenir que lamentar”. El historial de mantenimientos proporcionado por el CMMS permitiría revisar rápidamente cuándo fue atendido el equipo, por quién y qué trabajo se realizó sobre él.
3. Riesgos de Seguridad: Algunos equipos pueden fallar de tal forma que presenten un riesgo para el personal, los pacientes o ambos (ej. desfibrilador). Los equipos cuyo estado de mantenimiento sea desconocido podrían ser apartados por el personal por miedo a fallas. El CMMS permite una mejor vigilancia sobre estos equipos y proporciona un historial de fallas (si las hay), facilitando la prevención de fallas lo cual a su vez aumenta la seguridad del equipo.
4. Problemas Ambientales: Algunas condiciones fuera del control del hospital, como la estabilidad del suministro eléctrico o la humedad ambiente, contribuyen al desgaste y fallo de los equipos médicos. Estos parámetros pueden ser los responsables, pero es necesario contar con un registro histórico de fallas extenso antes de emitir un dictamen. El CMMS facilita este proceso de recabado de información al recolectar toda la información asociada a mantenimientos y fallas de los equipos.
5. Reducción de Vida Útil: El CMMS permite implementar un control más estricto y detallado sobre el mantenimiento preventivo de equipos médicos. Esto permite proporcionar el MP de manera eficiente y ordenada, manteniendo el funcionamiento del equipo y sus condiciones generales en buen estado, por ende extendiendo su vida útil.

Los CMMS ofrecen mejoras en la productividad del mantenimiento, reducción del tiempo fuera de servicio de los equipos en mal estado, ahorro en consumo de materiales y reducción del tamaño del inventario de refacciones (DPSI, 1994, como se citó en United States Department of Energy, 2010).

Estos beneficios tienen el efecto directo de reducir los costos operacionales de la institución, permitiendo un ahorro de presupuesto que puede ser reinvertido en dónde la institución crea necesario.

3.3.6 SELECCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN CMMS

La selección de un CMMS depende de las necesidades particulares de la institución y los aspectos que prioricen sobre el software. Por ejemplo, algunas instituciones podrían requerir soporte para lectura de códigos de barra mientras que otros podrían solicitar una aplicación móvil que acompañe al CMMS.

Si bien las necesidades, requerimientos y solicitudes de cada institución pueden ser distintos, las soluciones a estos parámetros pueden agruparse en tres categorías: comerciales, código abierto y a medida. Estas categorías se refieren al autor, o autores, de algún software y su tipo de distribución.

3.3.6.1 SOLUCIONES COMERCIALES, CÓDIGO ABIERTO Y A MEDIDA

Las soluciones comerciales son desarrolladas por compañías en el sector de informática con fines de lucro. La ventaja principal detrás del software comercial es el amplio soporte técnico que puede ofrecer al contar con equipos de profesionales que pueden encargarse de la mayor parte del proceso de implementación, soporte 24/7, mejoras continuas y recursos de aprendizaje avanzado para los usuarios del sistema (Montúfar, 2006). Su principal desventaja es su costo elevado, pudiendo este ser un monto fijo o un servicio de suscripción. Esto las hace particularmente inasequibles para instituciones pequeñas o con presupuestos limitados.

Las soluciones de código abierto son, por lo general, desarrolladas por un equipo de programadores con el objetivo común de crear una solución gratis. Como su nombre lo indica, el código de estas soluciones es público, por lo cual cualquier persona puede editarlo para agregar funcionalidades que no estén presentes en la versión estándar del software. Esta personalización la hace atractiva para varias instituciones, pero usualmente cuentan con muy poco o nulo soporte técnico en calidad oficial, teniendo que utilizarse medidas de soporte técnico alternativas como foros de usuarios o tutoriales en línea.

Las soluciones a medida son aquellas que son desarrolladas a petición de la institución. El costo del desarrollo puede ser muy elevado, incluso más que una solución comercial, pero se cuenta con la ventaja que, por desarrollarse desde cero, pueden ser personalizadas a un nivel incluso mayor que las soluciones de código abierto (Villar, 2006). La gran limitante de este tipo de solución es la documentación del código, puesto a que sí se pierde el contacto con el equipo de desarrollo original, es posible que de encontrarse fallas en el software estas sean extremadamente difíciles de corregir debido a que no siempre es posible deducir la funcionalidad del código a plena vista, teniendo que pasar por un proceso de prueba y error hasta encontrar la forma de solucionar los problemas del software. Este problema puede ser mitigado si el desarrollo del CMMS se realiza de forma interna, es decir, por un equipo integrado por empleados de la institución que documenten plenamente la funcionalidad del código de la solución de tal forma de que ser relevados sus sucesores puedan comprender la funcionalidad de este rápidamente.

3.3.6.2 IMPLEMENTACIÓN DE UN CMMS

La Organización Mundial de la Salud (2012) indica que el proceso de implementación para un CMMS (Figura 6) debe de integrar al personal de Ingeniería Clínica de principio a fin para que la adopción del sistema sea eficaz. Maher (2002) menciona que el traslado de estrategias reactivas a proactivas, como la adopción de un CMMS, es un proceso estructurado desde KPIs «*Key Performance Indicators, Indicadores de Rendimiento Clave*» hasta el reporte de excepciones que nos indiquen qué se está haciendo mal en la institución.

La OMS (2012) define siete fases de integración de un CMMS las cuáles son:

1. Evaluación: Una institución pondera la necesidad de un sistema CMMS para la administración de sus equipos, cuáles requisitos mínimos debería cumplir y qué información desean ingresar.
2. Selección: En esta fase la institución observa las posibles soluciones que existen en el mercado para implementar aquella que cumpla todos o la mayoría de los requisitos planteados en la Fase #1.
3. Recolección de Datos: La institución define la información que desea ingresar al CMMS y empieza el proceso de recolectar la información existente para que esta sea trasladada al CMMS.

4. **Instalación:** La solución electa se integra a la red informática de la institución, se habilitan los puntos de acceso al sistema y se instala el servidor que aloje la base de datos del CMMS.
5. **Configuración y Personalización:** La solución electa se configura para la institución, incluyendo aspectos de configuración técnica como cuál red utilizará para comunicarse hasta el idioma de la aplicación.
6. **Introducción de Datos:** Los datos recolectados por la institución son alimentados a la base de datos del CMMS, al terminarse esta fase el sistema se encuentra funcional.
7. **Capacitación:** Se entrena al personal de la institución sobre el uso del CMMS, cuáles son sus funciones, solución de problemas básicos o frecuentes, como agregar información, entre otros aspectos.

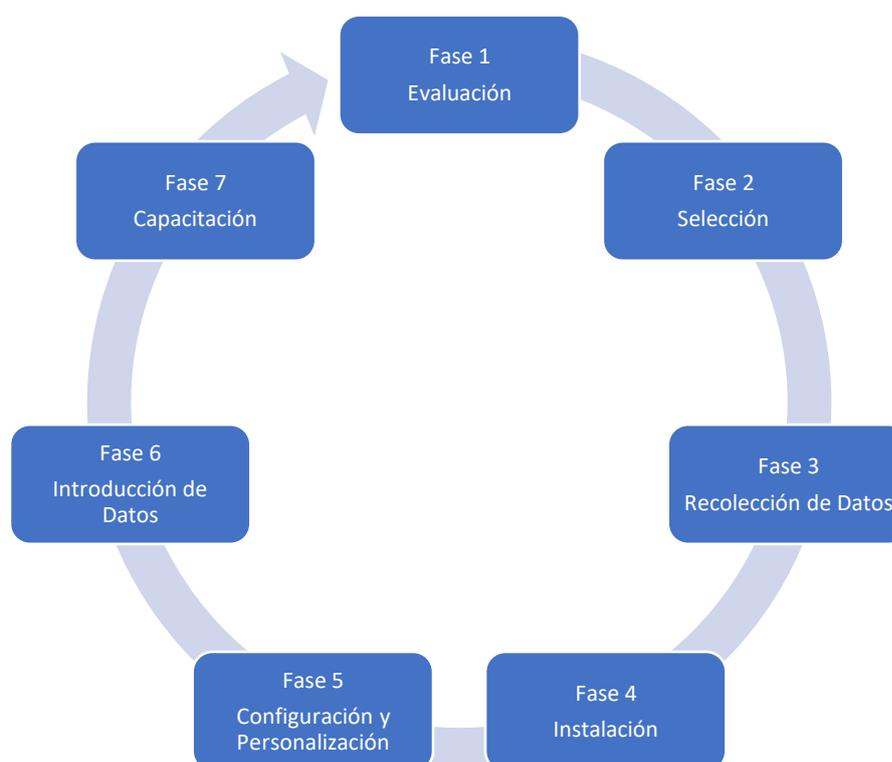


Figura 6 - Proceso de Implementación de CMMS

Fuente: Elaboración propia con datos de la (Organización Mundial de la Salud, 2012).

3.4 MARCO LEGAL

Se realizó una investigación sobre el trasfondo legal acerca de la implementación de tecnologías informáticas en el sector público y la gestión de bienes nacionales. Las leyes encontradas (Tabla 1) se relacionan de manera indirecta a la implementación de sistemas CMMS.

Tabla 1 - Resumen de Leyes y Normativas Relacionadas a la Implementación de Sistemas CMMS

Normativa	Clasificación	Componente Legal	Resumen
Ley del Sistema Nacional de Salud	Ley	Capítulo IX, Artículo No.43	Establece la priorización de la adopción de herramientas informáticas para el sistema de referencia de pacientes en el Sistema de Salud.
Decreto No. 274-2010	Decreto Ejecutivo	Capítulo I, Artículo No. 3, Inciso No. 6	Establece la obligación sobre la Dirección de Bienes Nacionales de verificar periódicamente la existencia y estado de los bienes, registros e inventariados que sean propiedad gubernamental.
Código Penal de Honduras	Código	Capítulo IX, Artículos 254 y 256	Establece sentencias para aquellos individuos que dolosa o culposamente dañen o destruyan bienes nacionales.

Fuente: Elaboración propia (2023).

3.4.1 LEY DEL SISTEMA NACIONAL DE SALUD

La Ley del Sistema Nacional de Salud, Capítulo IX, Artículo No. 43 – Sistema Nacional de Referencia y Respuesta, afirma lo siguiente:

El Rector establecerá el mecanismo de coordinación entre los diferentes establecimientos de salud que se articulan en redes integradas de servicios de salud a fin de asegurar la continuidad e integralidad de la atención y facilitar, además, una mayor oportunidad y eficiencia en la prestación de servicios del usuario referido (enviados) y atendidos (recibidos) de forma bidireccional. Para garantizar un adecuado flujo de información, la SESAL priorizará el uso de plataformas informáticas para la interconexión de los procesos de referencia y respuesta.

No se hace ninguna referencia directa a la ingeniería clínica ni a los sistemas CMMS, sin embargo, se puede extender la idea expuesta en el artículo al contextualizar el servicio médico a la población hondureña con la disponibilidad de este, la cual depende en gran medida sobre la disponibilidad de los equipos médicos de las distintas instituciones de atención a la salud. Por ende, si al mejorar la disponibilidad de equipos médicos mediante la adopción de tecnologías informáticas, como un CMMS, mejora la capacidad de atención de la institución, entonces esta tecnología tendrá que ser priorizada.

3.4.2 DECRETO NO. 274-2010, CREACIÓN DE DIRECCIÓN GENERAL DE BIENES NACIONALES

El Decreto No. 274-2010, Capítulo I, Artículo No. 4, Inciso No. 6, afirma que una de las funciones de Dirección General de Bienes Nacionales es "verificar periódica y sistemáticamente la existencia y estado de conservación de los bienes, inventariados o registrados ...". La responsabilidad sobre el estado de los bienes nacionales asignados a una institución es delegada a una oficina de la DGBN, ahora DNBE (*Dirección Nacional de Bienes del Estado*), en la institución. Esta responsabilidad es delegada nuevamente a los departamentos de mantenimiento pertinentes a la institución.

3.4.3 CÓDIGO PENAL DE HONDURAS

El Código Penal de Honduras, Capítulo IX, Artículo No. 254 afirma lo siguiente:

Se impondrá reclusión de tres (3) a cinco (5) años a quien destruya, inutilice, haga desaparecer o de cualquier modo, deteriore cosas muebles o inmuebles o animales de ajena pertenencia, siempre que el hecho no constituya un delito de los previstos en el capítulo siguiente.

La misma pena se impondrá al que por cualquier medio destruya, altere, inutilice o de cualquier otro modo dañe los datos, programas o documentos electrónicos ajenos, contenidos en redes, soportes o sistemas informáticos.

Continuando, el Capítulo IX, Artículo No. 255, Párrafos 1 y 2, Incisos No. 5 y 6 afirman:

Será sancionado con reclusión de tres (3) a seis (6) años quien cause alguno de los daños a que se refiere el Artículo anterior:

5) Sobre objetos de interés científico, histórico, asistencial, educativo, cultural o artístico o en laboratorios, archivos, bibliotecas, museos, monumentos o sobre un bien de utilidad social;

6) Sobre medios o vías de comunicación o de tránsito, puentes, canales, parques, paseos u otros bienes del Estado o bienes nacionales de uso público;

Los daños culposos se sancionarán con una pena igual a la mitad de la correspondiente al daño doloso. Si el autor hubiese cometido el hecho como consecuencia de haber consumido alcohol o drogas, se castigará con las dos terceras partes de la pena aplicable al correspondiente daño doloso.

El Artículo 254 menciona los sistemas informáticos y la manipulación maliciosa de sus datos, lo cual se extiende como protección contra la alteración, inhabilitación o destrucción de bases de datos o la inhabilitación de programas especializados como un CMMS.

El Artículo 255 protege directamente los bienes de utilidad social y los bienes nacionales. La información almacenada en un CMMS puede considerarse como un objeto de interés científico o asistencial debido a que esta facilita el análisis de la situación actual y permite una mayor eficacia en la gestión del mantenimiento de la institución. Todos los equipos médicos en una institución hospitalaria bajo gestión pública en Honduras están bajo la administración de la DNBE, por lo cual se clasifican como bienes nacionales.

Los daños dolosos o culposos pueden recibir entre tres a seis años de reclusión. Es poco probable que una institución hospitalaria busque dañar sus equipos intencionalmente o que sus empleados laboren bajo la influencia del alcohol o narcóticos, por lo cual los daños causados a equipos médicos, de ser considerados criminales, serían de naturaleza culposa. Este pensamiento se puede extender a que los empleados tienen la responsabilidad de cuidar los equipos de la institución.

IV. METODOLOGÍA

Durante este capítulo se implementaron los conceptos explorados en el Marco Teórico para fundamentar el diseño de la investigación, es decir, su enfoque, técnicas de recolección de datos, definición de variables, entre otros aspectos. Sin embargo, los aspectos más importantes son la definición de la metodología de desarrollo y validación para el prototipo de un sistema CMMS. Existen diversas metodologías aplicables a ambas de estas etapas, sin embargo, únicamente se exploró aquella que se juzgó como más adecuada, pero esto no niega la existencia de otras metodologías ni implica que estas sean de ninguna forma deficientes.

4.1 ENFOQUE

El enfoque de esta investigación es mixto, el cual Sampieri y otros (2014) definen como:

... un conjunto de procesos sistemáticos, empíricos y críticos de investigación e implican la recolección y el análisis de datos cuantitativos y cualitativos, así como su integración y discusión conjunta, para realizar inferencias producto de toda la información recabada y lograr un mayor entendimiento del fenómeno bajo estudio.

La funcionalidad de los CMMS se define, en la mayoría de los casos, de manera cualitativa. Esto se debe a que las instituciones suelen definir requerimientos de manera empírica sin haber basado sus criterios en un estudio cuantitativo estructurado.

Los beneficios del CMMS pueden y han sido cuantificados (DPSI, 1994, como se citó en United States Department of Energy, 2010), con lo cual la Organización Mundial de la Salud (2011) creó un esquema para un CMMS hospitalario. Por tanto, la funcionalidad del diseño a presentar puede basarse en criterios de elección cualitativos que tengan como resultado un beneficio cuantificable para la institución.

4.2 VARIABLES DE INVESTIGACIÓN

Según Sampieri y otros (2014), las variables de investigación son "...propiedad[es] que pueden variar y cuya variación es susceptible a medirse". Estas variables se deben de relacionar a la investigación, en este caso a través de los objetivos general y específicos planteados en el Capítulo II.

4.2.1 VARIABLE DEPENDIENTE

La variable dependiente es el resultado de la implementación de varias variables independientes. En el contexto del presente estudio, se define como variable dependiente el diseño del sistema CMMS, el cual se compone de una serie de características y funcionalidades que determinan su efectividad en el contexto de una organización. Dado que la variable dependiente se relaciona con un concepto abstracto y no numérico, se considera que su naturaleza es cualitativa, y por tanto, su medición y análisis requiere de técnicas específicas que permitan cuantificar y comparar sus distintos niveles o categorías.

4.2.2 VARIABLES INDEPENDIENTES

Las variables independientes son aquellas que pueden ser manipuladas para aproximar la variable dependiente a lo esperado. Para esta investigación los requerimientos de la institución, la arquitectura de software del CMMS, el diseño de los módulos del CMMS, las funciones del software, la interfaz de usuario y el diseño de una base de datos son las variables independientes. Estas variables (Figura 7) se definirán en gran medida alrededor de las respuestas obtenidas en una encuesta a personal biomédico de distintas instituciones hospitalarias del país. Algunos aspectos del diseño del CMMS se definirán antes de aplicarse dicha encuesta al considerarse fundamentales para el desarrollo del sistema.

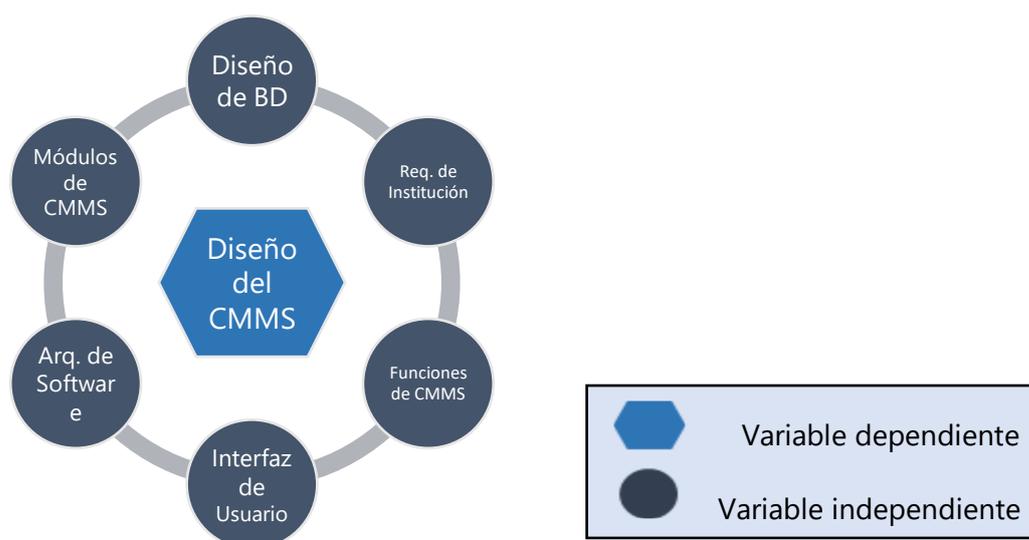


Figura 7 – Variables Dependiente e Independientes

Fuente: Elaboración propia (2023).

Cada variable independiente de la investigación representa lo siguiente:

1. Diseño de Base de Datos: Se refiere al diseño de tablas, es decir, cuántas tablas son necesarias, cuáles campos incluyen, cómo se interconectan entre sí, etcétera.
2. Requisitos de la Institución: Se refiere a aquellos requisitos sobre el diseño de un CMMS que puede hacer una institución que afecten directamente la Arquitectura del Software. Estos pueden ser la elección de una aplicación móvil o web, el sistema operativo objetivo o el uso de un lenguaje de programación en particular.
3. Funciones del CMMS: Se refiere a aquellas funciones de un CMMS (ej. generación de reportes financieros) que puede solicitar una institución sin que estas afecten la Arquitectura del Software.
4. Interfaz de Usuario: Se refiere al diseño de una interfaz por la cual el usuario sea capaz de interactuar con el programa. Existen interfaces por línea de comandos (CLI) o interfaces gráficas (GUI).
5. Arquitectura del Software: Son aquellos componentes básicos que se utilizarán en el desarrollo del software, como lo son el lenguaje de programación, el gestor de base de datos, el entorno de desarrollo, entre otros.
6. Módulos de CMMS: Hace referencia a las distintas "secciones" dentro del programa, como lo son el módulo de inventarios o el módulo de equipos. Cuáles módulos son incluidos y cómo funcionan pueden ser manipulados en base a los requisitos de la institución y las funciones deseadas.

Estas variables pueden ser manipuladas para crear el Diseño del CMMS, la variable dependiente de esta investigación. Cada variable independiente tiene un impacto directo sobre cómo funciona el diseño y qué es capaz de realizar.

4.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS APLICADOS

La investigación se desarrolló por medio del empleo de dos técnicas de estudio (Figura 8). La primera, consistió en la aplicación de encuestas a dieciséis (16) usuarios que han estado relacionados con la gestión de tecnología biomédica en hospitales del país. La segunda, se estableció como el desarrollo de un prototipo por medio de diversas herramientas e instrumentos.

Sobre la primera técnica, se implementó como instrumento de recolección de datos cualitativos una encuesta para recolectar información relacionada al estado actual de su estrategia de mantenimiento de equipos médicos, que herramientas utilizan para la recolección de datos y que requisitos impondrían sobre el diseño de un CMMS. Para extraer información cuantitativa de este método cualitativo se empleó el análisis estadístico descriptivo, obteniéndose tablas de frecuencia, histogramas, diagramas de dispersión, matrices de correlación, entre otros recursos matemáticos, todos utilizados tanto para evaluar la consistencia de encuesta como tal como para el criterio de diseño para un CMMS fundamentado en las opiniones de expertos en el tema de ingeniería clínica.

Sobre las herramientas e instrumentos de la segunda técnica de estudio, se estableció utilizar el software *Visual Studio*, un IDE multilenguaje desarrollado y distribuido por Microsoft. Asimismo, el software *Dev-C++*, un IDE para los lenguajes de programación C y C++, *PostgreSQL*, un gestor de base de datos SQL, y *DBeaver*, una herramienta de diseño y administración de bases de datos. Finalmente, el desarrollo de la aplicación GUI se realizó utilizando la solución *Winforms*, integrada a *Visual Studio* que permite crear aplicaciones escritas en el lenguaje de programación C#.

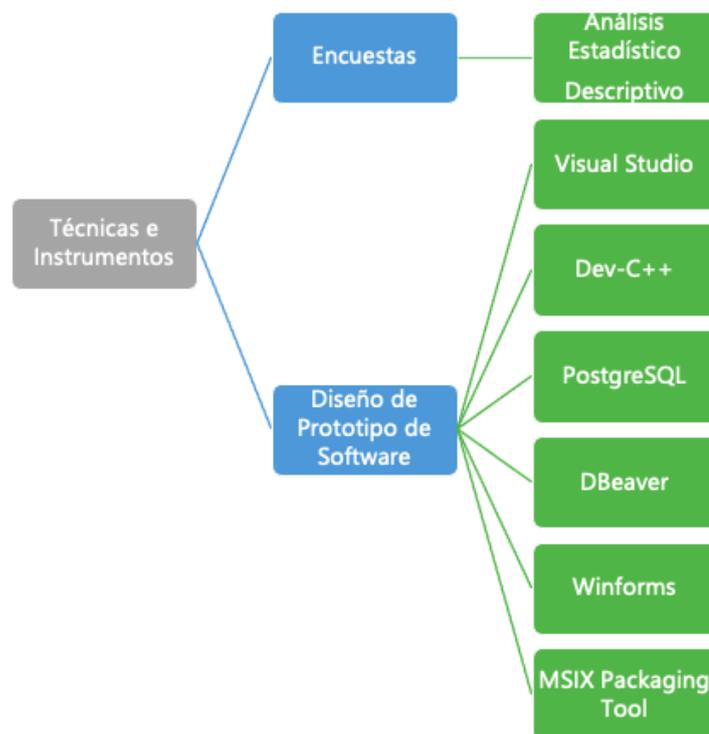


Figura 8 – Técnicas e Instrumentos Establecidos

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.4 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

La Metodología de Desarrollo es aquel proceso estructurado que se sigue para la realización de la investigación. Esta metodología permite seguir desarrollo en etapas predefinidas que facilitan el desarrollo de la investigación. Debido a que esta investigación buscó crear un diseño de un CMMS junto con un prototipo ilustrativo sobre su funcionamiento, se ponderaron dos metodologías de desarrollo: la Metodología en V y el Modelo Cascada. Debido al fuerte eje investigativo teórico, la Metodología en V resulta más adecuada en contraste al Modelo Cascada que se utiliza principalmente para el desarrollo y producción de software de manera directa.

4.4.1 METODOLOGÍA EN V

La Metodología en V es una herramienta de desarrollo en los campos de las ingenierías, siendo comúnmente implementada en el desarrollo de sistemas electromecánicos y el desarrollo de software. Balaji y Murugaiyan (2011) concluyeron que la Metodología en V (Figura 9) para el desarrollo de software es útil para proyectos grandes con cambios y validación realizados en cada etapa de desarrollo, lo cual es adecuado para el desarrollo de un CMMS hospitalario.

Cada fase de la Metodología en V puede verificarse entre sus etapas relacionadas entre las fases de desarrollo y validación, lo cual facilita la iteración sobre el trabajo realizado. Esta iteración agiliza el proceso de mejora de un trabajo o diseño original al seguir una estructura uniforme que puede ser implementada o replicada sin necesitar la intervención de los autores del trabajo original.

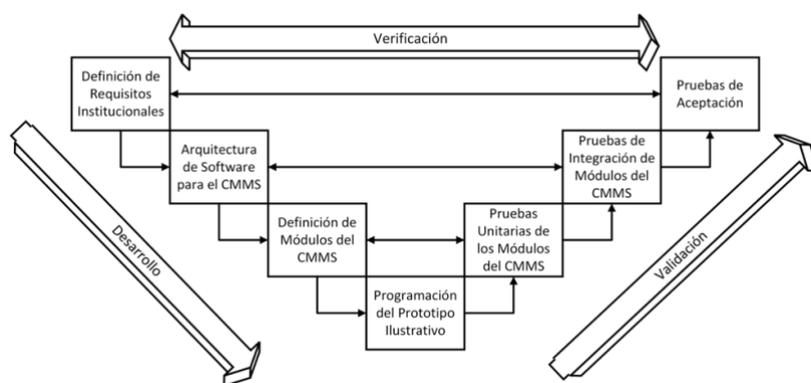


Figura 9 - Metodología en V aplicada al desarrollo de software

Fuente: Elaboración propia con datos de (Balaji & Murugaiyan, 2011).

Durante esta investigación se llegó hasta la etapa de pruebas de integración de módulos del CMMS, puesto que el prototipo presentado sirve únicamente para propósitos ilustrativos. Debido a esto, ciertas funciones, como la implementación de medidas de ciberseguridad, fueron excluidas del prototipo, pero serán requeridas en el desarrollo de un prototipo funcional.

4.4.2 REQUERIMIENTOS BÁSICOS E INSTITUCIONALES

Los requerimientos del CMMS se fundamentan en el modelo de CMMS básico presentado por la Organización Mundial de la Salud (2012) y las necesidades particulares de la institución que solicite el software.

Los requerimientos de la institución pueden ser definidos mediante métodos cuantitativos como el análisis de rendimiento de la unidad o departamento a cargo del mantenimiento de equipos médicos. Algunas métricas o *KPIs* aplicables a este análisis pueden ser el tiempo medio hasta el cumplimiento de órdenes de trabajo, proporción entre mantenimiento correctivo y predictivo, cantidad de mantenimiento preventivo planificado ejecutado durante el año, cantidad de bajas o descartes realizados durante el año, entre otros indicadores. Los requerimientos también pueden definirse por la experiencia de la unidad o departamento (fuente empírica, cualitativa) y pueden solicitarse funciones o criterios de diseño en base al gusto de la institución.

4.4.3 ARQUITECTURA DE SOFTWARE

El prototipo ilustrativo fue programado inicialmente con el lenguaje C++, un superconjunto del lenguaje C y luego con el lenguaje C#, siempre un lenguaje relacionado a C. C++ es un lenguaje de programación de bajo nivel, o sea, hay un bajo nivel de abstracción entre la sintaxis del lenguaje y la ejecución en código máquina. La programación de aplicaciones complejas en un lenguaje como C++ no es recomendada más allá de implementaciones puntuales para el manejo de ciertas tareas, por lo cual el desarrollo de la aplicación se manejó con el lenguaje C#, apoyado en la solución *Winforms* para crear una aplicación ilustrativa. C# es un lenguaje de alto nivel, con una sintaxis más abstracta en comparación con C++, pero ambos idiomas al relacionarse al lenguaje C mantienen el mismo manejo de conceptos básicos como condicionales, bucles y funciones.

Winforms es una solución proporcionada en el paquete de desarrollo en C# para Visual Studio. Como tal, es un elemento gráfico que utiliza varias de las funciones del sistema operativo Windows, por lo cual es una solución monoplataforma. *Winforms* es una solución optimizada para utilizar elementos de diseño gráfico como botones, campos de texto y menús al automáticamente crear el código pertinente para la implementación de cada elemento. Esto expedita considerablemente el proceso de desarrollo de una interfaz gráfica y su conexión a las funciones y procesos que se manejan en cada evento dentro de la aplicación. Cada elemento utilizado puede editarse en diversas formas como, por ejemplo, posicionamiento en la ventana de la aplicación, apariencia, tamaño, fuente, entre otros aspectos.

Como gestor de base de datos se utilizó PostgreSQL, un software gratuito de código abierto. Es de los gestores de bases de datos más populares y existe una gran cantidad de recursos didácticos para su uso e implementación. Al ser uno de los proyectos de código abierto más grandes, cuenta con actualizaciones constantes, más no hay un servicio de soporte técnico en capacidad oficial.

En conjunto con PostgreSQL se utilizó el software DBeaver, el cual es un gestor de bases de datos gráfico, es decir, proporciona una interfaz gráfica que facilita la interacción con la base de datos ya que, para el caso particular de PostgreSQL, de otra forma se tendría que utilizar la consola de comandos para interactuar con la base de datos, lo cual puede dificultar considerablemente su capacidad de uso debido a que es más difícil validar las entradas de datos en la consola de comandos.

Como IDE se utilizó el ambiente proporcionado por Visual Studio para el desarrollo de la aplicación programada en C# debido a su implementación nativa de varios entornos de desarrollo (frameworks) que facilitan considerablemente el desarrollo de software. Se utilizó el IDE Dev-C++ para el desarrollo de un programa de prueba, "dummy", escrito en el lenguaje C++ para simular la funcionalidad básica de la aplicación previo al desarrollo de la aplicación principal.

Para crear un único ejecutable para la aplicación se utilizó MSIX Packaging Tool, una solución integrada a Visual Studio que permite crear archivos de instalación para aplicaciones desarrolladas para el sistema operativo Microsoft Windows.

4.4.4 DEFINICIÓN DE MÓDULOS

Antes de iniciar el desarrollo de software, fue necesario delimitar cuáles son las capacidades deseadas y su funcionamiento, lo cual se hace a través de la definición de módulos de software. Cada módulo debe de ser independiente al otro para que al momento de unificarlos en una única aplicación, estos no generen fallas al "chocar" entre sí.

4.4.4.1 MÓDULO DE ÓRDENES DE TRABAJO

El Módulo de Órdenes de Trabajo es capaz de crear, modificar y eliminar el registro de órdenes de trabajo recibidas por la Unidad de Equipos Médicos. Cabe mencionar que las órdenes de trabajo se realizan en papel y lápiz y tienen que ser transportadas físicamente a la Unidad de Equipos Médicos.

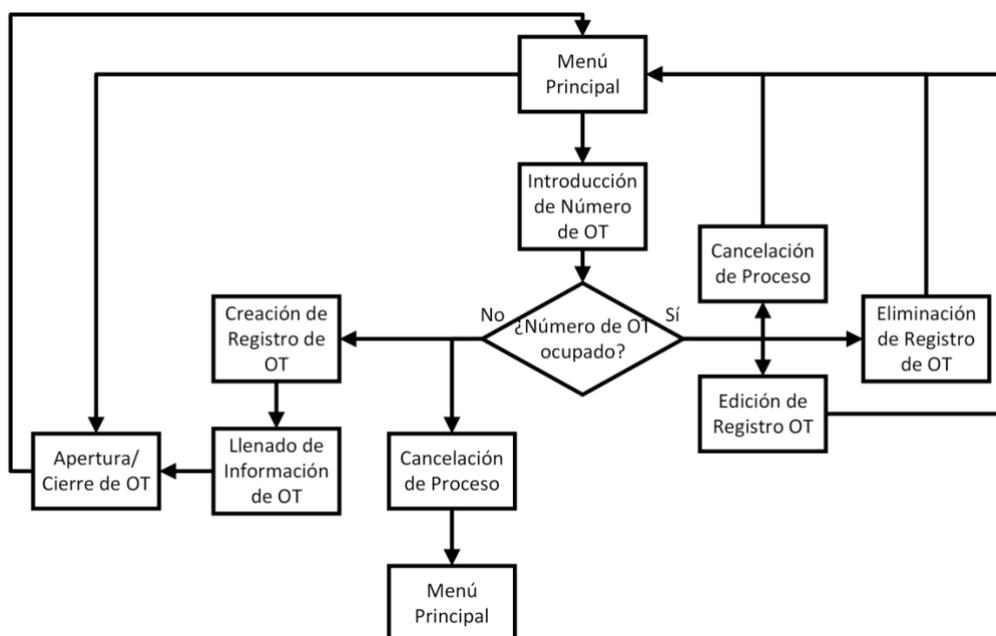


Figura 10 - Módulo de Órdenes de Trabajo

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.4.4.2 MÓDULO DE INVENTARIO

El Módulo de Inventario maneja distintas acciones relacionadas al registro de equipos médicos, incluyendo pero no limitándose a: el registro de fabricantes, el registro de modelos de equipos médicos, el registro de equipos individuales, insumos, refacciones, ubicación del equipo en la institución, responsable sobre el equipo, si se encuentra disponible y la fecha de registro dentro del inventario.

El registro de fabricantes contiene la información relacionada al fabricante junto con un código único que será extraído de su nombre. Los fabricantes podrán ser evaluados y clasificados según el funcionamiento de sus equipos. Por ejemplo, un fabricante poco fiable podría ser colocado en lista negra, lo cual indicaría que de serle ofertado un equipo de ese fabricante a la institución, se podría rechazar inmediatamente o la propuesta puede ser evaluada con un grado de escrutinio mayor. Esta clasificación, sin fundamento, violaría la Ley de Contratación del Estado, por lo cual este listado debe de basarse en criterios cuantitativos como la tasa de fallas para un equipo, tiempo de baja, tiempo medio antes de ser reparado, modos de falla más frecuentes, cantidad de bajas versus existencias, entre otras métricas.

El registro de modelos contiene la información relacionada al modelo de un equipo junto con su clasificación de riesgo, frecuencia de mantenimiento, código de inventario de refacciones y observaciones particulares para ese modelo (ej. tipo de conectores para accesorios).

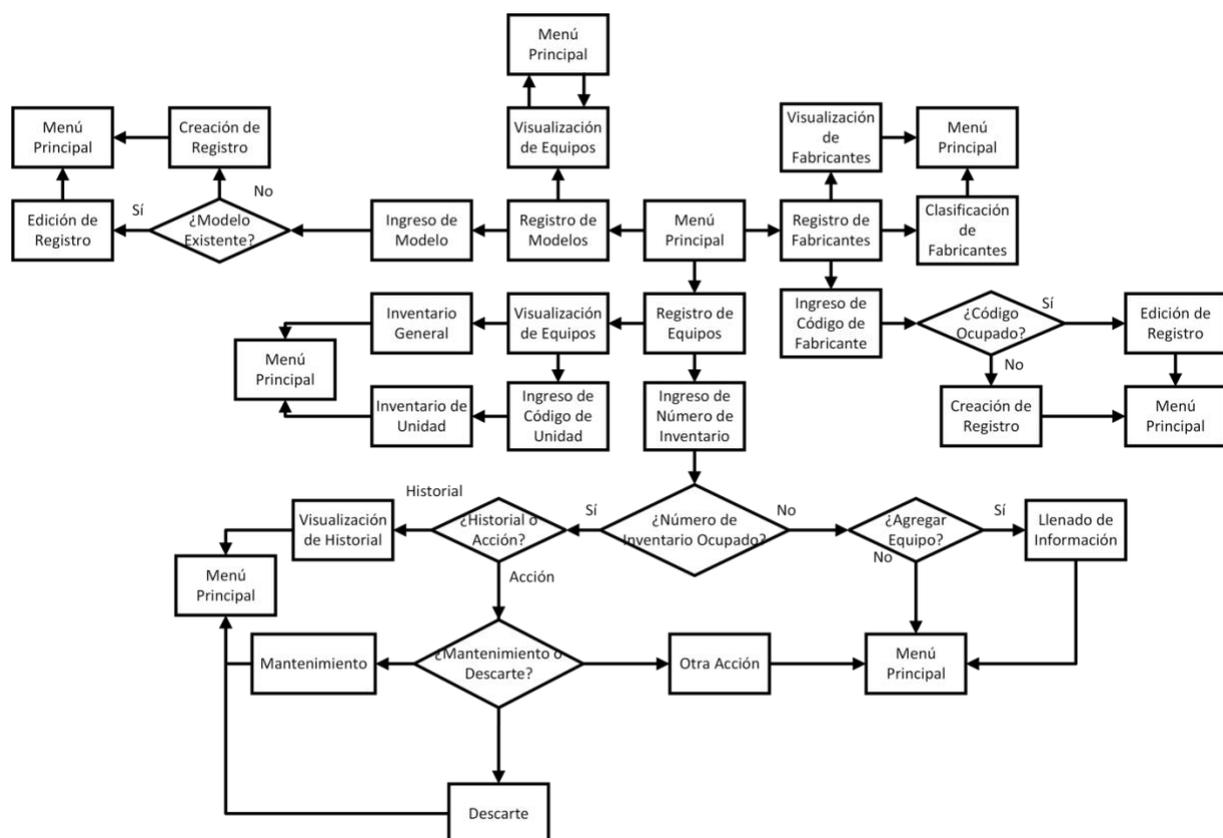


Figura 11 - Módulo de Inventario

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.4.4.3 MÓDULO DE PERSONAL

La administración del recurso humano es de suma importancia en la ingeniería clínica, particularmente en casos donde se cuente con un personal limitado para una base de equipos relativamente amplia. Si bien existe un límite práctico sobre el volumen de trabajo que puede manejar una cierta cantidad de personas, la correcta administración del tiempo laboral y la gestión de tareas asignadas permite que la institución aproveche al máximo el tiempo de trabajo de sus empleados. La implementación de una agenda de trabajo ordenada y sustentada en el protocolo y juicio de una institución (ej. se atenderán primeramente los equipos de soporte de vida) permite que implementar la mejor administración del tiempo laboral posible para la institución recipiente del software.

El módulo de personal permite clasificar el personal, modificar registros y asignar agendas de trabajo. Dentro de las agendas de trabajo, se debe de poder asignar tareas e incluir la capacidad de asignar una agenda para trabajos realizados con entidades externas a la institución.

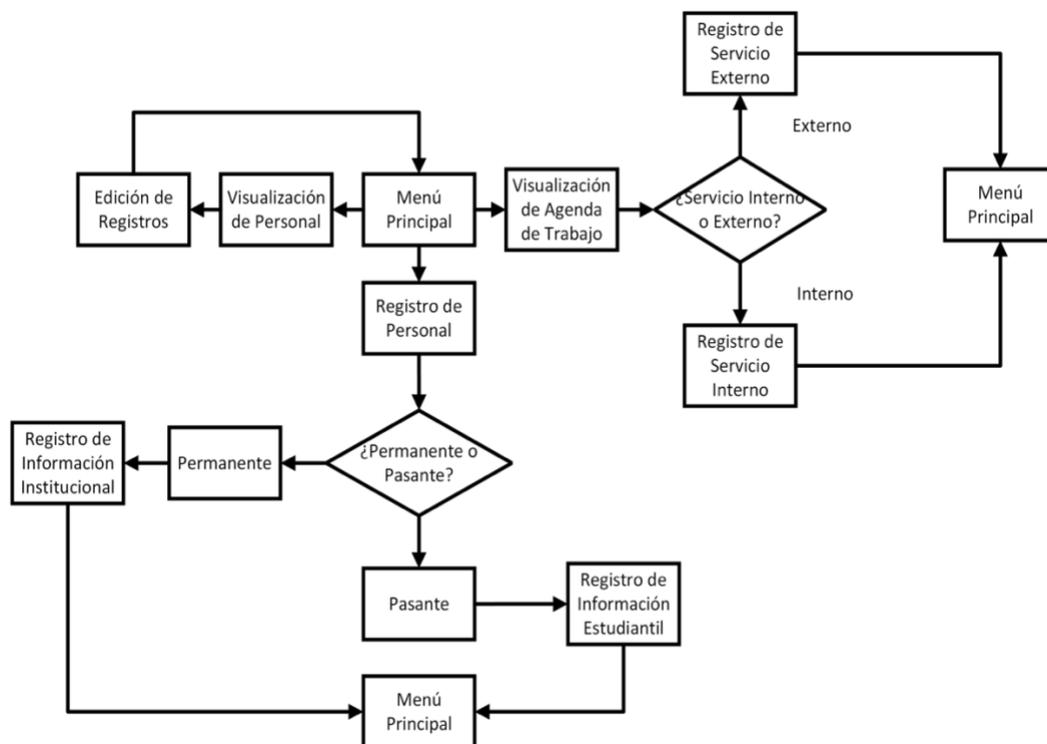


Figura 12 - Módulo de Personal

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.4.4.4 MÓDULO DE MANTENIMIENTO

El módulo de mantenimiento es capaz de gestionar y asignar el recurso humano de la unidad de ingeniería clínica para la ejecución de mantenimiento preventivo que esté en concordancia con las agendas de trabajo generadas en el módulo de personal. También puede manejar los casos de mantenimiento correctivo emergentes en la institución y mantener un registro de los mantenimientos realizados, sean preventivos o correctivos. Interactúa con el módulo de inventario al poder traspasar un equipo del inventario activo al inventario de descartes.

El registro de las actividades permite introducir una descripción sobre el trabajo realizado, lo cual es útil en el caso que sea necesario realizar una investigación de fallas sobre un equipo ya que permite localizar puntualmente los modos de falla que la unidad desee evaluar.

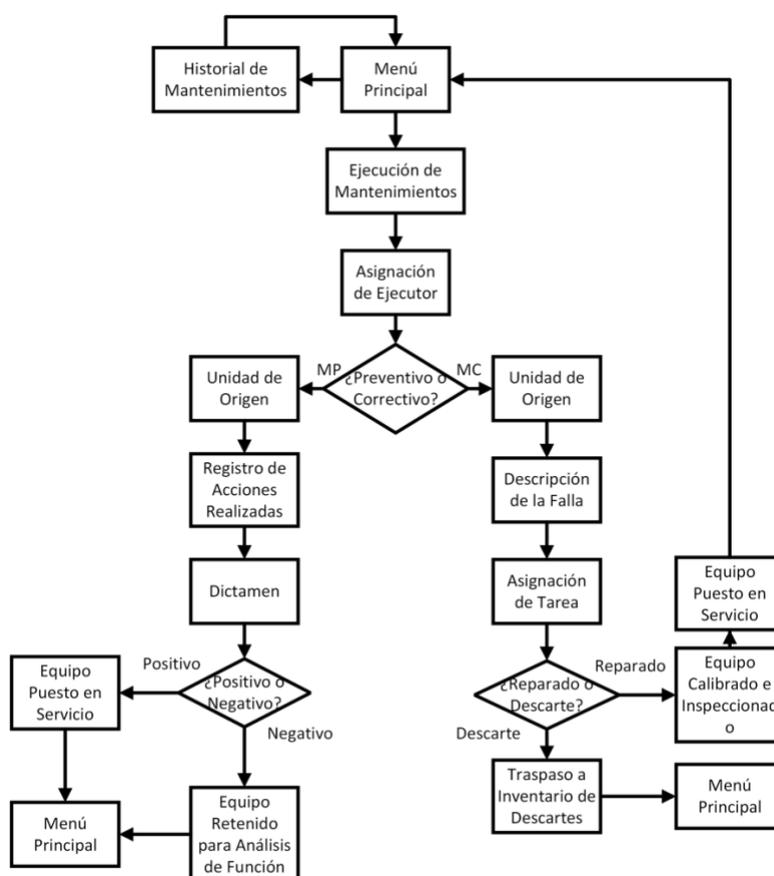


Figura 13 - Módulo de Mantenimiento

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.4.5 DISEÑO DE BASE DE DATOS

El diseño de la base de datos tiene que fundamentarse en los módulos implementados en el CMMS. Cada módulo maneja distintas variables y accede a algunas tablas que pueden ser compartidas con otros módulos. Es necesario, sin embargo, que todas las tablas estén interconectadas una a la otra mediante llaves foráneas, de tal forma de que se forme una red en la cual al seleccionar una tabla cualquiera sea posible llegar a cualquier otra tabla en la base de datos.

Se utilizó como guía de diseño las tablas y campos expuestos por la Organización Mundial de la Salud (2012) junto con todas las demás tablas que resulten necesarias para las funciones implementadas al prototipo ilustrativo.

4.4.6 PROGRAMACIÓN DE PROTOTIPO ILUSTRATIVO

El prototipo ilustrativo tiene como objetivo demostrar la funcionalidad básica del sistema. Por esto mismo su programación no es compleja y obvió ciertas consideraciones, como por ejemplo las medidas de ciberseguridad mencionadas durante el Capítulo III.

Primeramente se desarrolló un prototipo CLI en lenguaje de programación C++. Este prototipo se limita considerablemente al depender totalmente sobre el ingreso de datos vía línea de comandos de parte del usuario, memoria volátil (es decir, no guarda los cambios efectuados) y su navegación de menús secuencial. No tiene una conexión a una base de datos, por lo cual las acciones realizadas sobre la misma utilizan arreglos predefinidos para simular la funcionalidad de una aplicación "real". En el mundo de la programación, esto es conocido como un programa "dummy".

Luego, se diseñó una base de datos relacional basada en los criterios de la institución y las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud (2012). Se utilizará el gestor de bases de datos PostgreSQL en conjunto con DBeaver debido a su versatilidad, popularidad y facilidad de uso. Durante el desarrollo de la CLI se necesitó crear distintos arreglos que luego fueron implementados como tablas propias a la base de datos.

Finalmente, el desarrollo de la aplicación en C# utilizó la base sentada por la CLI e implementó la base de datos para obtener una aplicación no volátil que almacena los cambios efectuados en cada ciclo del programa. Algunos módulos, particularmente el de Ordenes de

Trabajo, tuvieron que ser excluidos o su funcionalidad reducida debido a las implicaciones sobre la programación que su diseño condiciona. En el desarrollo de un prototipo funcional, todos los módulos deberán ser implementados con su funcionalidad intacta.

4.4.7 PRUEBAS UNITARIAS E INTEGRACIÓN DE MÓDULOS DEL CMMS

Las pruebas unitarias sobre los módulos del CMMS son vitales para detectar y corregir bugs en cada módulo. Estas pruebas generalmente se enfocan en las secciones del programa en donde el usuario sea capaz de ingresar datos que no hayan sido predefinidos por el programador, como es el caso cuando se emplea una entrada controlada como una combo box. En esta etapa se ejecuta cada módulo por separado y se ingresan distintos datos en las entradas y se observa la respuesta del programa. Es común en este punto que se pruebe ingresar datos erróneos a propósito (ej. ingresar un número fuera de un rango establecido, ingresar un carácter cuando se solicita un entero, entre otros) para validar que estos datos no rompan el programa.

Luego de que todos los módulos hayan sido validados, se debe probar ejecutarlos todos en un ambiente singular para validar que todos funcionen de la manera esperada. Errores en la programación de los módulos, como lo pueden ser la repetición de variables o una mala definición de estas en distintos módulos puede causar que los módulos, en aislamiento, sean funcionales pero no logren compilarse al juntarlos. Donde dos o más módulos sean incompatibles con el resto, será necesario alterar su programación para que sean coherentes entre sí y puedan ser ejecutados sin problemas.

4.5 ENCUESTA A EXPERTOS

El desarrollo del diseño del CMMS se fundamentó principalmente sobre la base proporcionada por la OMS (2012), sin embargo, para que este sistema sea relevante al ámbito nacional, fue necesario recabar información sobre la gestión del mantenimiento en diversas instituciones sanitarias.

El método para el recabado de la información fue la recolección cualitativa a través de una encuesta dirigida a ingenieros biomédicos que laboren o hayan laborado en hospitales, sean estos administrados por la Secretaría de Salud, Instituto Hondureño de Seguridad Social o pertenezcan al sector privado.

Esta encuesta tuvo que obviar un campo relevante particular: la ciberseguridad. Cualquier realizada sobre este tema podría ser recibida con aprehensión de parte del encuestado al poder interpretarse como una pregunta demasiado crítica o directamente arriesgada de responderse.

La encuesta como tal es de naturaleza cualitativa, sin embargo, fue construida de tal forma que es posible cuantificar ciertas ideas sobre el mantenimiento de equipos médicos. Debido a esto, las respuestas pudieron ser analizadas mediante el análisis estadístico descriptivo.

4.6 METODOLOGÍA DE VALIDACIÓN

Se implementó como metodología de validación el juicio por expertos. El juicio por expertos, según Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2007) es "... una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones". Estas opiniones se recopilaron mediante una encuesta. Los expertos en cuestión son ingenieros biomédicos que desempeñen o hayan desempeñado sus labores en instituciones hospitalarias del país, sean del sector público o privado.

Las respuestas obtenidas de los expertos mediante la encuesta fueron tabuladas y analizadas mediante el análisis estadístico descriptivo para convertir las respuestas cualitativas de los expertos en información cuantificable que pudo utilizarse para fundamentar el diseño de un CMMS para el ámbito hospitalario. Este análisis fue realizado en el software *Minitab* para obtener representaciones visuales de la información recopilada. Con la información en un formato más amigable, la misma será interpretada en el siguiente capítulo de esta investigación.

Debido a que la encuesta fue dirigida exclusivamente a expertos en el tema sobre la gestión de mantenimiento en instituciones sanitarias del país, la encuesta como tal implementa la validación de juicio por expertos, por lo cual no fue necesario revalidar las respuestas obtenidas más allá del análisis estadístico descriptivo.

Cabe mencionar que debido al tiempo limitado para la realización de tanto la encuesta como el prototipo ilustrativo, no se realizó una validación sobre el diseño de la interfaz de usuario del prototipo, por lo cual esta podría ser menos intuitiva de lo deseado.

4.7 CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

A continuación se muestra el cronograma de las actividades realizadas durante el transcurso del proyecto de investigación desarrollado en un periodo de tiempo de diez semanas. (Figura 14).

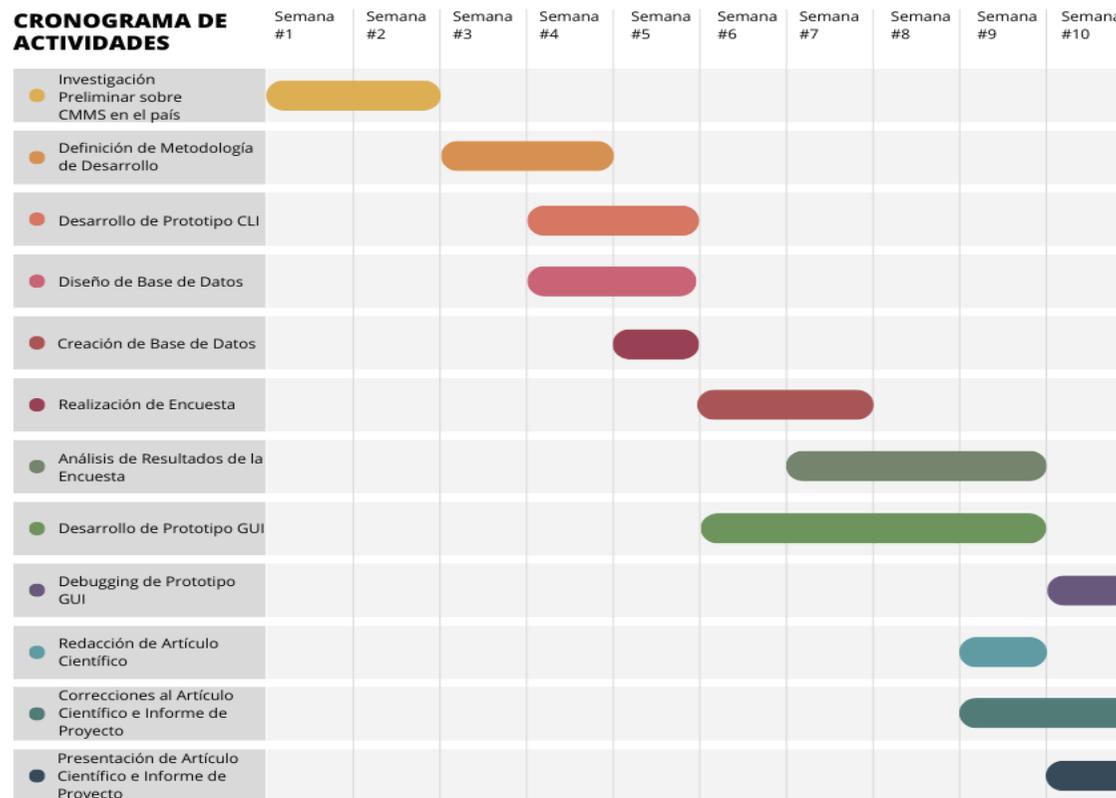


Figura 14 - Cronograma de Actividades

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.8 MATRIZ METODOLÓGICA

Como herramienta de síntesis para la investigación realizada, se creó una matriz metodológica (Tabla 2) que recopila los aspectos más importantes de la investigación, como el problema y preguntas de investigación, objetivos, variables y la metodología utilizada.

Tabla 2 - Matriz Metodológica

Título	Problema de Investigación
Diseño y Prototipado de un CMMS mediante la Metodología en V para Centros de Salud en SPS	La mayoría de las instituciones sanitarias en Honduras carecen de Departamentos de Ingeniería Clínica, por lo cual es común que se empiece a acumular un "inventario" de equipos en mal estado. La reparación de estos recae en brigadas técnicas enviadas por la Secretaría de Salud o entidades privadas. Donde la espera de estas brigadas no sea una opción viable, únicamente queda como recurso la contratación de servicios externos o el descarte de equipos que podrían ser reparados. Las pocas instituciones que sí cuentan con Departamentos de Ingeniería Clínica usualmente manejan un volumen de trabajo excesivo, lo cual dificulta el desempeño de sus labores. El registro, seguimiento y cumplimiento de las gestiones de trabajo, principalmente aquellas relacionadas al mantenimiento de equipos médicos, se dificultan al no contar con sistemas digitales especializados que agilicen estas tareas.

Tabla 2 - Matriz Metodológica, continuación

Preguntas de Investigación	Objetivos	Variables	Metodología y Herramientas
	General	Dependiente	
¿Cuáles es la situación actual, conceptos y teorías que fundamenten la implementación de sistemas CMMS?	Proponer un diseño de CMMS personalizado para aplicaciones de gestión biomédica hospitalaria.	Diseño de CMMS ajustado a las necesidades en el ámbito nacional.	Metodología en V Recolección de Datos Cualitativos
	Específicos	Independiente	Juicio de Expertos
¿Qué tipo de metodologías pueden ser definidas para la investigación y desarrollo de una propuesta de un CMMS a nivel local?	Determinar la situación actual, conceptos y teorías que fundamenten la implementación de sistemas CMMS.	Requerimientos Institucionales	PostgreSQL Visual Studio
¿Qué tipo de características debe tener un CMMS para cumplir con los requerimientos de los usuarios en el ambiente hospitalario local?	Identificar las metodologías más adecuadas para la investigación y desarrollo de una propuesta de un CMMS a nivel local.	Arquitectura de Software Funcionalidad del CMMS	Dev-C++ Winforms
¿Qué nivel de funcionalidad puede tener un CMMS programado en lenguaje C++ a bajo costo?	Investigar las características que los usuarios en el ambiente hospitalario local consideran como requisitos para un CMMS.	Diseño de Base de Datos Módulos del CMMS	DBeaver Minitab
	Estudiar el grado de funcionalidad que se obtiene del desarrollo de un prototipo de CMMS basado en lenguaje de programación C# a bajo costo.	Interfaz de Usuario	MSIX Packaging Tool

Fuente: Elaboración propia (2023).

4.9 OPERACIONALIZACIÓN DE LAS VARIABLES

Se realizó la operacionalización de las variables de investigación (Tabla 3) para definir puntualmente su relación con los objetivos específicos y general.

Tabla 3 - Operacionalización de las Variables de Investigación

Objetivo General	Variable Dependiente	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Proponer un diseño de CMMS personalizado para aplicaciones clínico-hospitalarias	Diseño de CMMS ajustado a las necesidades en el ámbito nacional.	Serie de lineamientos y recomendaciones que forman la base de diseño para un software CMMS por aplicarse en el contexto clínico de Honduras.	Software, CMMS, Ingeniería Clínica, Mantenimiento de Equipos Médicos	Resultados de Encuesta Módulos Seleccionados
Objetivos Específicos	Variabes Independientes	Definición Conceptual	Dimensiones	Indicadores
Investigar las características que los usuarios en el ambiente hospitalario local consideran como requisitos para un CMMS.	Requisitos Institucionales	Recopilación de opiniones de expertos con experiencia en la administración hospitalaria de equipos médicos que será utilizada para formar definir las necesidades de las instituciones a nivel local.	Administración de Equipos, Registro de Datos,	Resultados de Encuesta Plantilla OMS (2012)
	Funcionalidad del CMMS			
	Módulos de CMMS			
	Diseño de Base de Datos			
Estudiar el grado de funcionalidad que se obtiene del desarrollo de un prototipo de CMMS basado en lenguaje de programación C# a bajo costo.	Arquitectura de Software	Creación de prototipo con fines ilustrativos que cumpla con los requerimientos básicos de un CMMS. Sería utilizado para comunicar las necesidades y requerimientos de la institución de una forma más clara a expertos en el desarrollo de software.	IDE, Lenguaje de Programación, Dummy, GUI, Compatibilidad de Software	Resultados de Prototipado
	Prototipo Ilustrativo			
	Interfaz de Usuario			

Fuente: Elaboración propia (2023).

V. RESULTADOS Y ANÁLISIS

Una vez se tabularon los resultados de la encuesta, la información pudo ser analizada mediante métodos estadísticos descriptivos y la información recuperada de esta encuesta, en conjunto con la base presentada por la Organización Mundial de la Salud (2012) fundamentaron el diseño del prototipo ilustrativo con interfaz gráfica.

5.1 RESULTADOS DE ENCUESTA

La encuesta fue aplicada a ingenieros biomédicos que laboren o hayan laborado en hospitales hondureños tanto en San Pedro Sula, Cortés como Tegucigalpa, Francisco Morazán. Se obtuvieron 16 respuestas provenientes de los tres sectores de Salud en Honduras: SESAL (n = 3), IHSS (n = 9) y el Sector Privado (n = 4).

5.1.1 DESCRIPCIÓN DE LA ENCUESTA

Se elaboró una encuesta de 10 preguntas, consistiendo en cinco tipos de preguntas: respuesta única (cinco preguntas), respuesta múltiple (una pregunta), respuesta abierta (una pregunta), respuesta en escala (dos preguntas) y respuesta en Escala de Likert (una pregunta). El tipo de pregunta definió la clase de análisis estadístico que pueden recibir las respuestas obtenidas, donde, por ejemplo, las respuestas únicas solo pudieron recibir un análisis simple de modo y frecuencia, mientras que la Escala de Likert pudo recibir un análisis estadístico descriptivo más robusto e incluso análisis multivariable.

5.1.2 PREGUNTAS, RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA ENCUESTA

La encuesta fue aplicada mediante un formulario de Microsoft Forms, donde las 10 preguntas eran de respuesta obligatoria antes de permitir el envío de respuestas. Las preguntas fueron:

1. ¿En qué hospital desempeñó o desempeña actualmente sus funciones? (Respuesta única con opción abierta).

Las Preguntas #1, #2, #3, #4 y #5 tuvieron como objetivo recabar información simple acerca de los establecimientos de salud en donde laboran o laboraron los encuestados. En la

Figura 15 se muestran los distintos establecimientos recopilados y la cantidad de respuestas obtenidas de cada uno.

Se observó que la mayoría de las respuestas provinieron del Instituto Hondureño de Seguridad Social, particularmente del Hospital de Especialidades "La Granja" y la antigua sede de la institución "Barrio Abajo". Se observa que el 37.5% (n = 6) de los encuestados correspondieron a hospitales en San Pedro Sula, mientras que el complemento (62.5%, n = 10) correspondió a Tegucigalpa.

Se obtuvieron respuestas de los tres sectores de Salud en Honduras, destacaron por cada sector el Hospital Nacional Mario Catarino Rivas (SESAL, n = 2), el Hospital de Especialidades (IHSS, n = 5) y el Honduras Medical Center (Sector Privado, n = 3).

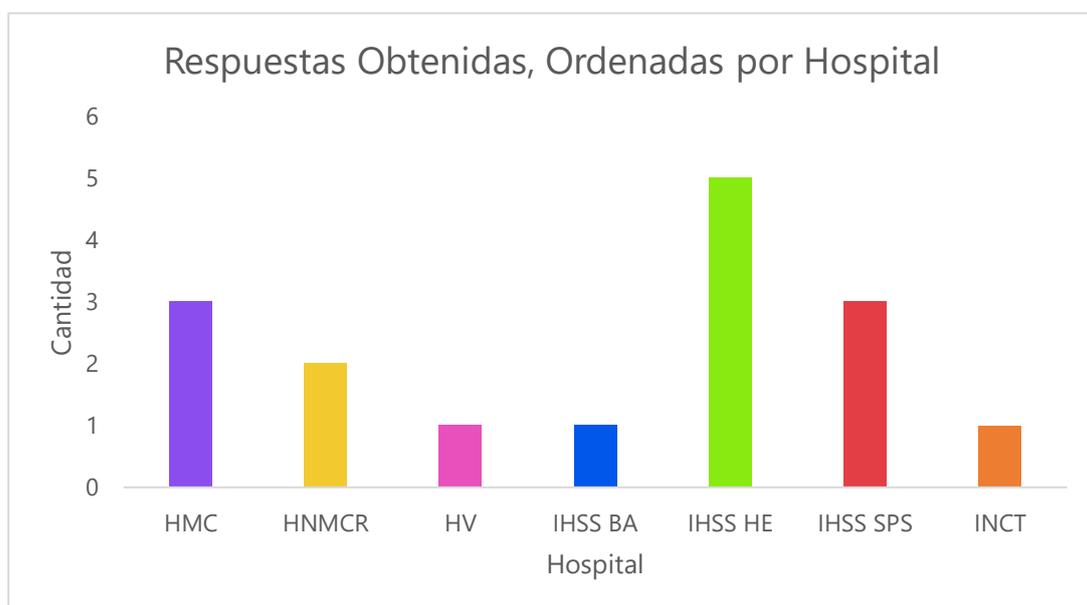


Figura 15 - Respuestas Obtenidas, Ordenadas por Hospital

Fuente: Elaboración propia (2023).

2. Seleccione la categoría (escala de SESAL) del Hospital en el que labora o laboró.
(Respuesta única).

La Pregunta #2 recopiló información sobre el nivel de atención de la institución en la cual laboran o laboraron los encuestados. Debido a la naturaleza de los distintos niveles de atención de salud, únicamente se consideraron opciones correspondientes al segundo y tercer nivel de atención. En la Figura 16 se recopilaron los datos obtenidos por el ente rector y nivel de atención de salud (Preguntas #1 y #2). Se observó que el IHSS tiene una presencia considerable en tanto el segundo como tercer nivel de atención, mientras que los hospitales bajo la administración de la SESAL se concentraron exclusivamente en el tercer nivel de atención.

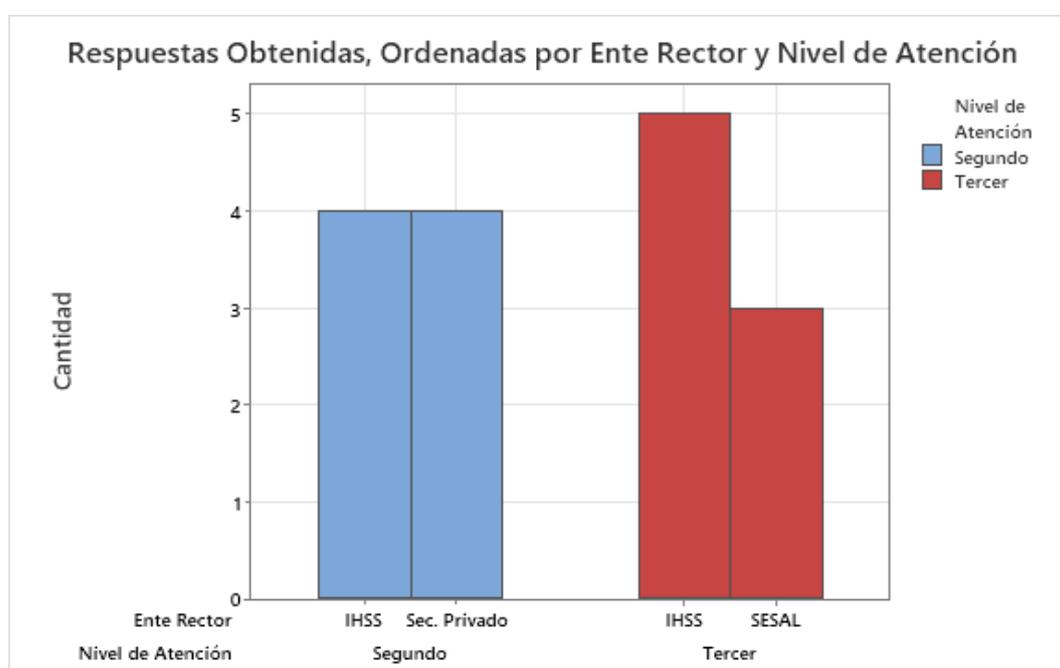


Figura 16 - Respuestas Obtenidas, Ordenadas por Ente Rector y Nivel de Atención

Fuente: Elaboración propia (2023).

3. ¿Su hospital cuenta con una Unidad o Departamento de Ingeniería Biomédica? (Respuesta única).

La Pregunta #3 recibió una respuesta unánime (n = 16), todos los encuestados afirman que la institución donde laboran o laboraron cuenta con una Unidad o Departamento de Ingeniería Clínica formal (Figura 17). Se puede intuir, entonces, que las labores de mantenimiento y gestión de equipos médicos recaen sobre estas unidades, en vez de ser delegadas estas responsabilidades a las unidades de mantenimiento o las unidades clínicas.

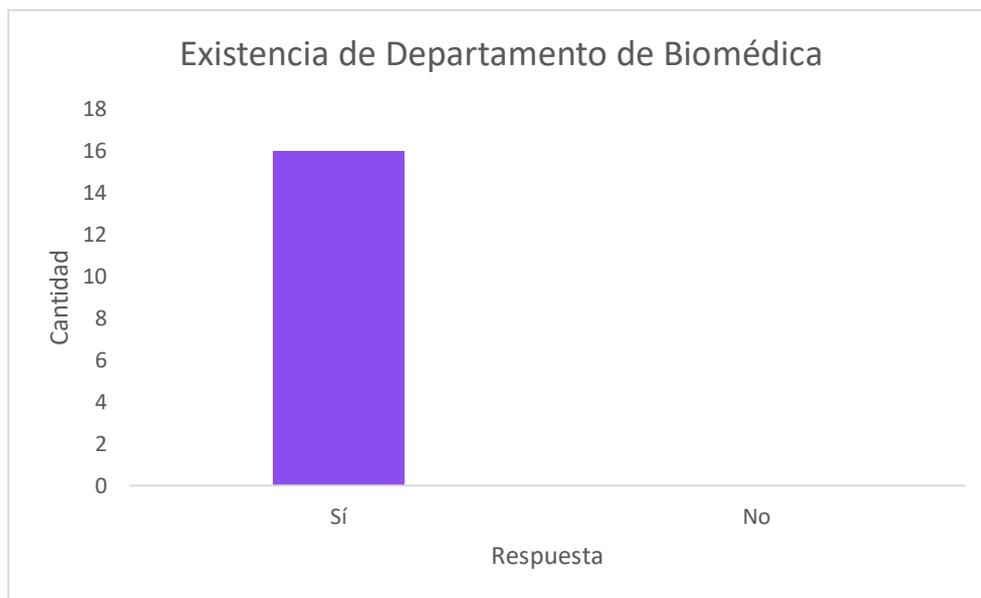


Figura 17 - Existencia de Departamentos de Biomédica

Fuente: Elaboración propia (2023).

4. En dicho hospital, ¿se desarrolla mantenimiento preventivo? (Respuesta única)

La Pregunta #4 recibió una única respuesta negativa, donde el resto de los encuestados afirma que se desarrolla mantenimiento preventivo en la institución donde labora o laboraron (Figura 18). Esta clase de mantenimiento en particular requiere de mayor planeación y depende de la necesidad de la unidad clínica a la cual esté asignado el equipo. Se puede concluir a partir de las encuestas que la mayoría de las instituciones clínicas del país implementan esquemas de mantenimiento preventivo.

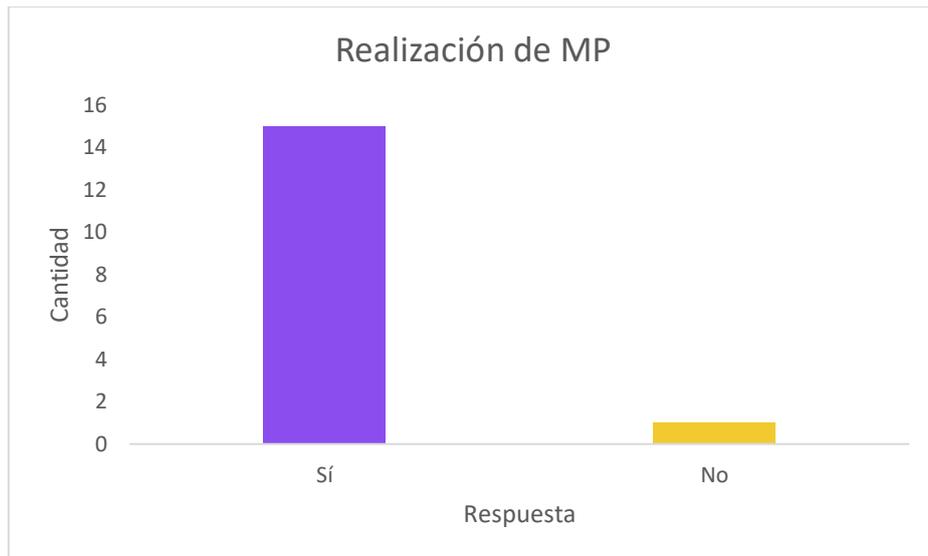


Figura 18 - Realización de Mantenimiento Preventivo

Fuente: Elaboración propia (2023).

5. Escala de Likert (Tema central: gestión de mantenimiento).

La Pregunta #5 se respondió en una Escala de Likert. Contuvo 5 elementos, los cuales fueron:

1. En este hospital siempre se desarrolla mantenimiento preventivo para la base instalada de equipos (Preg. N1).
2. El mantenimiento se desarrolla parcialmente por parte de empresas externas (Preg. N2).
3. Tiene acceso a un inventario en digital conteniendo partes, refacciones e insumos de su área (Preg. N3).
4. Tiene acceso a un inventario en digital conteniendo las herramientas de uso en su área (Preg. N4).
5. Tiene acceso fácil y amigable a un inventario en digital de todos los equipos médicos de la base instalada (Preg. N5).

La escala de respuestas fue de cinco puntos, los cuales fueron:

1. Totalmente en desacuerdo.
2. En desacuerdo.
3. Indiferente.
4. De acuerdo.
5. Totalmente de acuerdo.

Los datos recopilados primeramente fueron analizados mediante métodos estadísticos descriptivos. Las métricas ponderadas corresponden a media, error estándar de la media, desviación estándar, varianza, coeficiente de varianza, cuartiles, rango intercuartílico, mediana, moda y N para moda (Tabla 4).

Tabla 4 - Análisis Estadístico Descriptivo de Resultados de Escala de Likert

Variable	Media	EE de la Media	Desv. Est.	Varianza	Coef. Var.	RIC	Moda	N para Moda
Preg. N1	3.875	0.315	1.258	1.583	32.47	1.750	4, 5	6
Preg. N2	4.250	0.214	0.856	0.733	20.15	1.750	5	8
Preg. N3	2.938	0.382	1.526	2.329	51.95	2.750	2	5
Preg. N4	2.750	0.403	1.612	2.600	58.63	3.000	1	6
Preg. N5	3.375	0.328	1.310	1.717	38.82	1.750	4	6

Fuente: Elaboración propia (2023).

El tamaño de la población ($n = 16$) mitigó considerablemente el error estándar de la media, por lo cual se puede tomar la media como una medida certera para la distribución de los datos recopilados. Las Preguntas N3 y N4 presentaron un coeficiente de varianza relativamente alto y las modas más bajas en la escala. Tres de las preguntas presentaron un RIC menor a 2, una pregunta un RIC menor a 3 y la última pregunta un RIC de exactamente 3. La Pregunta N4 presentó el mayor error estándar, varianza, RIC y la menor moda, indicando que esta fue la pregunta más volátil, a plena vista necesitando un rango amplio de respuestas en tanto las secciones positiva y negativa de la escala presentada.

Las respuestas obtenidas para cada pregunta fueron cuantificadas y representadas en histogramas para propósitos de visualización de datos. El histograma para la Preg. N1 (Figura 19) presentó un distribución de frecuencias concentradas en su sección derecha. La prevalencia del mantenimiento preventivo concuerda con la base teórica de la Ingeniería

Clínica, donde al aumentar la realización de mantenimiento preventivo se reduce la necesidad de realizar mantenimiento correctivo y a su vez se extiende la vida útil del equipo en cuestión.

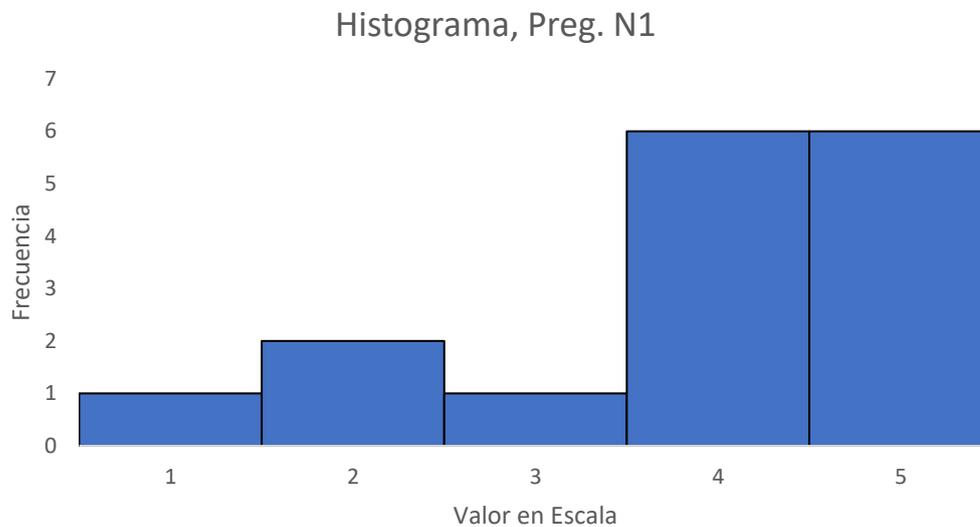


Figura 19 - Histograma, Preg. N1

Fuente: Elaboración propia (2023).

El histograma de la Preg. N2 (Figura 20) mostró una fuerte distribución de frecuencias en su sección derecha, a tal punto que no existen respuestas sobre en la sección izquierda de la escala presentada, mostrando así una prevalencia muy significativa para la ejecución de mantenimiento preventivo por empresas externas a la institución. La dependencia sobre terceros para el desarrollo de mantenimiento preventivo puede darse debido a que los departamentos de biomédica no cuentan con suficiente personal para manejar el volumen de trabajo que reciben o no han recibido la capacitación técnica sobre el mantenimiento de un equipo particular. En cualquier caso, esta dependencia no es positiva para las instituciones, debido a que en casos de gran demanda o demanda crítica no es probable que puedan satisfacer el ritmo de trabajo necesario para atender los equipos médicos de la institución, sumado a la asignación de un presupuesto para costear dichos servicios.



Figura 20 - Histograma, Preg. N2

Fuente: Elaboración propia (2023).

El histograma de la Preg. N3 (Figura 21) mostró una distribución de frecuencias con un grado notable de extensión, con prevalencias fuertes en ambas secciones de evaluación. La mayoría de las instituciones no cuentan con un inventario de refacciones propio ($n = 8$), pero cabe resaltar que hubo una cantidad cercana ($n = 6$) de instituciones que sí cuentan con esta capacidad. Contar con un inventario de refacciones expedita el proceso de reparación de fallas, pero la administración de dicho inventario es compleja debido a la gran cantidad y pequeño tamaño de la mayoría de dichas refacciones.

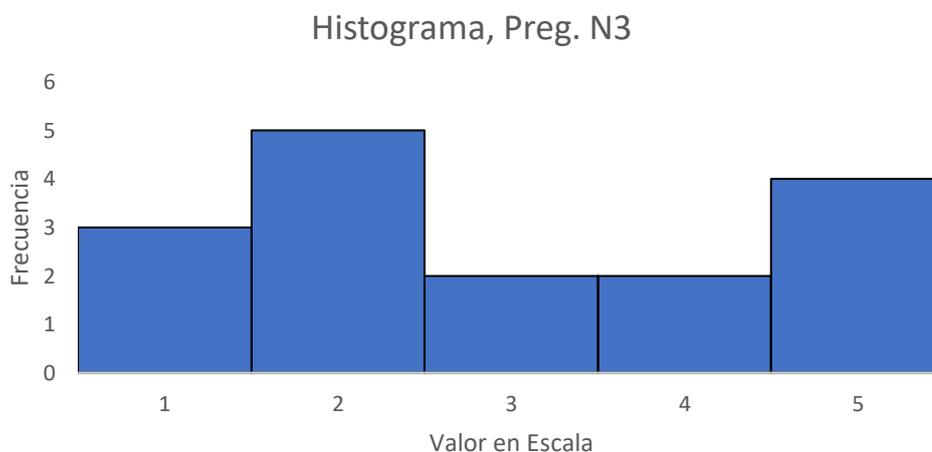


Figura 21 - Histograma, Preg. N3

Fuente: Elaboración propia (2023).

El histograma de la Preg. N4 (Figura 22) mostró una distribución amplia de frecuencias, con una moda fuertemente marcada en 1. Aun así, se dividieron casi equitativamente las respuestas en las secciones negativa y positiva de la escala ($n = 7$ y $n = 6$, respectivamente), por lo cual el inventario de herramientas aparentó ser tratado como un agregado u adicional a la gestión de una unidad de biomédica. Dicho esto, resultó preocupante que en la moda se haya concentrado fuertemente en la sección negativa, ya que esto implica que la unidad de biomédica o ingeniería clínica no tiene conocimiento sobre las herramientas asignadas, lo cual dificulta varias tareas de mantenimiento, como, por ejemplo, no tener los destornilladores correctos para desarmar un equipo.

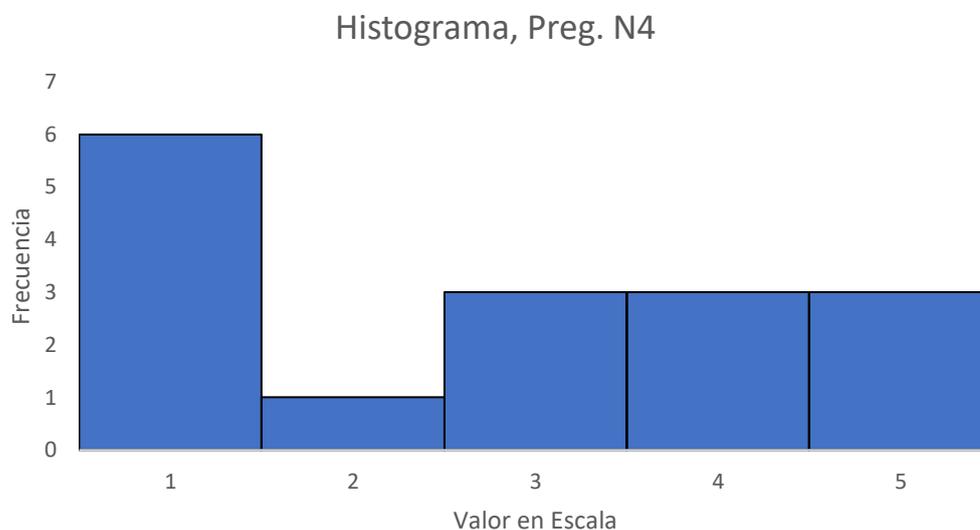


Figura 22 - Histograma, Preg. N4

Fuente: Elaboración propia (2023).

Finalmente, la Preg. N5 (Figura 23) mostró una distribución amplia de frecuencias, mostrando una moda marcada en 4, concentrando más de la mitad de las respuestas en el rango positivo de la escala ($n = 9$). Es preocupante que el complemento ($n = 7$) no cuente con al menos un inventario de equipos digitalizado. La gestión de equipos médicos probablemente se manejó en papel y lápiz en estos casos, pero esto dificulta el recabado de información relacionada a un equipo en particular además de que presenta un riesgo elevado de pérdida de datos al no existir un respaldo digital. Sumado a esto, no contar con un inventario de equipos dificulta considerablemente la gestión de procesos como

mantenimiento preventivo, traslado de equipos entre unidades clínicas, compra de insumos y refacciones e incluso el descarte de equipos en mal estado.

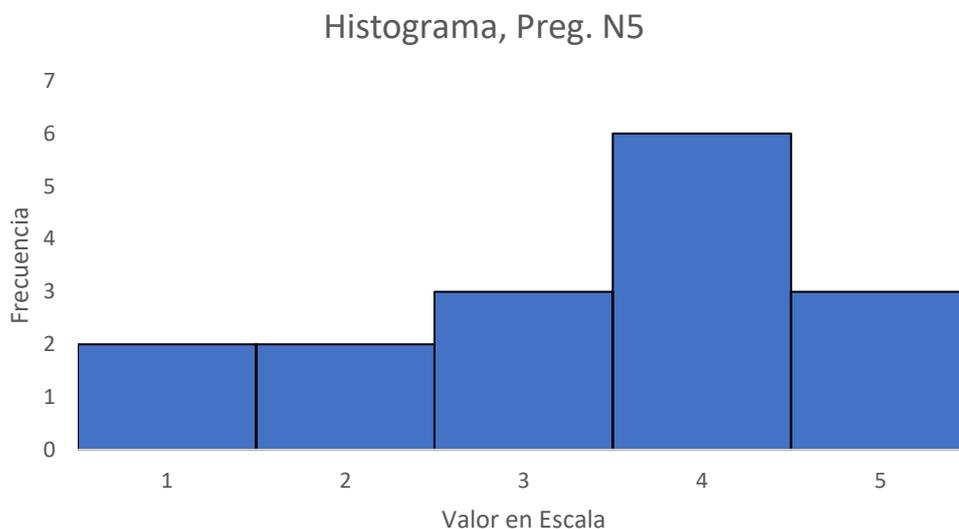


Figura 23 - Histograma, Preg. N5

Fuente: Elaboración propia (2023).

Las Escalas de Likert, como herramienta, intentan cuantificar respuestas que por naturaleza son cualitativas. Esto significa que este tipo de pregunta puede fácilmente crear falsos negativos de no ser validada. En este caso, las respuestas obtenidas se validaron mediante análisis multivariable, el cual entregó una Matriz de Correlación de Pearson, una tabla de Ajuste por Omisión de Elemento, una Matriz de Diagramas de Dispersión y el Alfa de Cronbach para el sistema. Es necesario observar todos estos componentes para determinar dos factores: la consistencia de los elementos de la escala, es decir, la relación de los elementos al tema central de la escala (Gestión de Mantenimiento de Equipos Médicos) y la relación entre los elementos, donde esta última consiste en la coherencia temática entre los elementos en la pregunta.

Si se suman todos los valores de la Matriz de Correlación de Pearson (Tabla 5) y se divide por la cantidad de valores (4.5 y 10, respectivamente) se obtiene una correlación de Pearson para el sistema de 0.45. La Correlación de Pearson se encuentra en un rango $-1 < r_T < 1$, donde r_T es la correlación total para un sistema. Dependiendo sobre donde se ubique r_T en este rango, se puede determinar si existe una correlación inversa ($r_T < 0$) o una correlación directa ($r_T > 0$), donde la distancia a 0 indica el grado de intensidad para la

correlación. En este caso, una correlación total de 0.45 es indicativa de una correlación leve a moderadamente directa entre los elementos del sistema.

Tabla 5 - Matriz de Correlación de Pearson

	Preg. N1	Preg. N2	Preg. N3	Preg. N4
Preg. N2	0.835	-	-	-
Preg. N3	0.378	0.268	-	-
Preg. N4	0.378	0.193	0.643	-
Preg. N5	0.475	0.386	0.613	0.331

Fuente: Elaboración propia (2023).

Para definir si un elemento es consistente dentro de la Escala de Likert, se utiliza el Ajuste por Omisión de Elemento (Tabla 6) para evaluar el impacto del elemento sobre los demás. Particularmente, si una pregunta cuenta con valor de Correlación Total Ajustada bajo (<.50), un valor de Correlación Múltiple Cuadrada bajo (<.50) y un valor para el Alfa de Cronbach substancialmente mayor a los demás, se considera que ese elemento no es consistente con el tema central de la escala. Se observó entonces que las preguntas N4 y N5 son relativamente inconsistentes, teniendo al menos un valor bajo, particularmente la pregunta N4 que si bien supera el umbral para su Correlación Total Ajustada, es demasiado cercano a .50 como para considerarla consistente. En combinación con el valor ajustado para el Alfa de Cronbach substancialmente superior, se determinó que la pregunta N4 es inconsistente en relación con el tema central.

Tabla 6 - Ajuste por Omisión de Elemento

Variable Omitida	Media Total Ajustada	Desv. Est. Ajustada	Total Correlación Total Ajustada	Correlación Múltiple Cuadrada	Alfa de Cronbach
Preg. N1	13.313	4.062	0.6213	0.7590	0.7369
Preg. N2	12.938	4.449	0.5118	0.7162	0.7791
Preg. N3	14.250	3.786	0.6721	0.5952	0.7163
Preg. N4	14.438	3.898	0.5277	0.4821	0.7751
Preg. N5	13.813	4.053	0.5916	0.4628	0.7453

Fuente: Elaboración propia (2023).

En el análisis multivariable se manejan aspectos como la covarianza entre dos elementos, o en otras palabras, dos variables. Esto permite, entonces, que tales datos puedan representarse como diagramas de dispersión. Los diagramas de dispersión en el análisis multivariable reflejan la linealidad del cambio entre dos variables, es decir, la Correlación de

Pearson. En la Figura 24 se mostró una Matriz de Diagramas de Dispersión para todos los elementos de la escala. Se aprecia que en todos los diagramas existe una pendiente positiva, siendo más pronunciada entre los elementos con un alto coeficiente de Correlación de Pearson y más atenuada cuando este coeficiente es bajo.

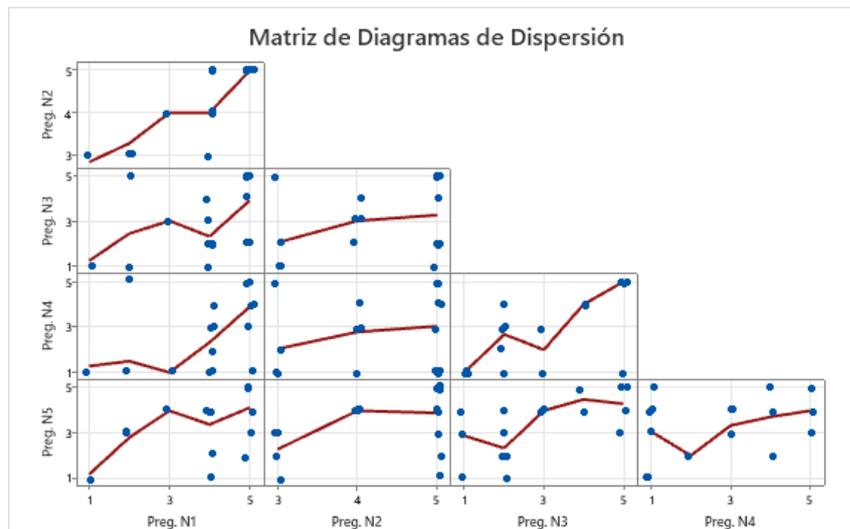


Figura 24 - Matriz de Diagramas de Dispersión

Fuente: Elaboración propia (2023).

Finalmente, el Alfa de Cronbach obtenido para el conjunto de 5 elementos es de 0.7914. Por lo general se sostiene que los Alfa de Cronbach superiores a 0.7 demuestran relevancia, conformidad y coherencia con el tema central evaluado en la Escala de Likert. Los Alfa de Cronbach de 0.7 a 0.79, inclusivo, se consideran "aceptables", de 0.8 a 0.89 se consideran "muy buenos" y a partir de 0.9 se consideran "excelentes". La cercanía del Alfa de Cronbach al rango de "muy bueno", en concordancia con las tendencias expuestas en los Diagramas de Dispersión y la Correlación de Pearson para el sistema indican que las preguntas sí estuvieron relacionadas una a la otra, con esta relación siendo leve a moderadamente positiva.

6. ¿Está familiarizado con el término CMMS «*Computerized Maintenance and Management System*»? (Respuesta única).

La Pregunta #6 obtuvo un 18.75% de respuestas negativas (n = 3) y el complemento (81.25%, n = 13) correspondió a respuestas positivas. La mayoría de los encuestados ya tenía conocimiento previo acerca de los CMMS (Figura 25). La implementación de estos, sin embargo, a nivel nacional sigue siendo pobre, aún si son relativamente bien conocidos por profesionales.

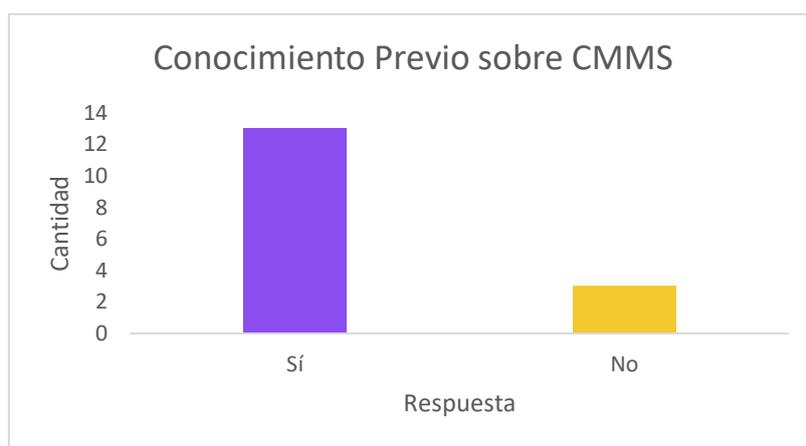


Figura 25 - Conocimiento Previo sobre CMMS

Fuente: Elaboración propia (2023).

7. ¿Qué tan dispuesto se sentiría a utilizar un CMMS para las labores del hospital? (Respuesta en escala).

La Pregunta #7 utilizó el formato NPS o «Net Promoter Score», una herramienta proporcionada por Microsoft Forms. Consiste en una escala del 0 al 10, donde existen tres rangos: detractores (0-6), pasivos (7-8) y promotores (9-10). El objetivo del NPS es determinar el porcentaje de personas que promoverían un objeto o servicio. Alternativamente, también puede indicar de manera más amigable la voluntad de una persona de ese objeto o servicio.

Los resultados obtenidos en esta Pregunta #7 fueron relacionados a los resultados obtenidos de la Pregunta #6 (Figura 26), donde se observa que la gran mayoría de los encuestados tenía conocimiento previo sobre los sistemas CMMS y gran disposición a utilizar estos sistemas. Todos los encuestados que no tenían conocimiento previo sobre estos sistemas muestran una gran disposición a utilizarlos dados únicamente una breve descripción sobre su funcionamiento.

Se observó que los tres encuestados que no tenían conocimiento previo sobre los CMMS están completamente dispuestos a utilizar uno dada la oportunidad. Dentro del campo con conocimiento previo acerca de los CMMS, 11 encuestados están completamente dispuestos a utilizar un CMMS, únicamente habiendo dos encuestados menos convencidos, pero siempre manteniendo un nivel considerable de aceptación a la idea.

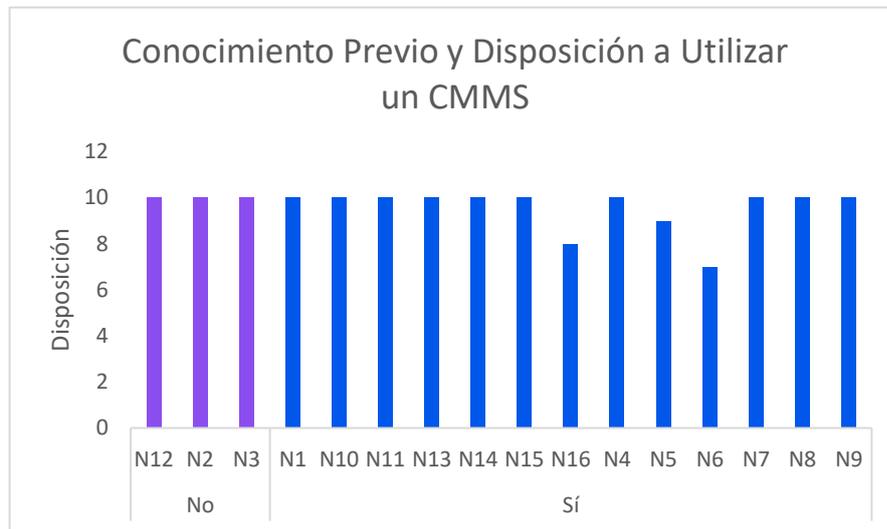


Figura 26 - Conocimiento Previo y Disposición a Utilizar un CMMS

Fuente: Elaboración propia (2023).

8. ¿Cuántas Órdenes de Trabajo o Solicitudes de Servicio reciben en promedio en un año en el Hospital? En el contexto del mantenimiento de la base instalada de equipos médicos. (Respuesta abierta).

La Pregunta #8 recibió respuestas abiertas de los encuestados. Varios encuestados laboran o laboraron en las mismas instituciones, por lo cual se tomó el promedio de las órdenes de trabajo recibidas para cada institución (Figura 27). Las instituciones de las cuales se obtuvo respuesta recibieron las siguientes designaciones:

1. Hospital de Especialidades "La Granja" – (N1).
2. Hospital Regional del Norte – (N2).
3. IHSS "Barrio Abajo" – (N3).
4. Hospital Nacional Mario Catarino Rivas – (N4).
5. Instituto Nacional Cardiopulmonar "Tórax" – (N5).
6. Honduras Medical Center – (N6).
7. Hospital del Valle – (N7).

Se observó que el IHSS atiende el mayor número de órdenes de trabajo, con amplia diferencia al sector público y privado. Se destacó particularmente el Hospital de Especialidades “La Granja”, pero la respuesta obtenida está en concordancia con el nivel de atención del hospital y el tamaño de esta institución en particular. En cualquier caso, la baja cantidad de ordenes de trabajo atendidas en los hospitales bajo la administración de la SESAL es indicativa de un gran déficit entre la capacidad de trabajo de las instituciones y el volumen de trabajo por realizar, debido a que no es probable que tanto el Hospital Nacional Mario Catarino Rivas y el Instituto Nacional Cardiopulmonar “Tórax”, ambas instituciones en el tercer nivel de atención a la salud, mantuvieran un volumen de trabajo tan bajo como el recolectado en la encuesta.

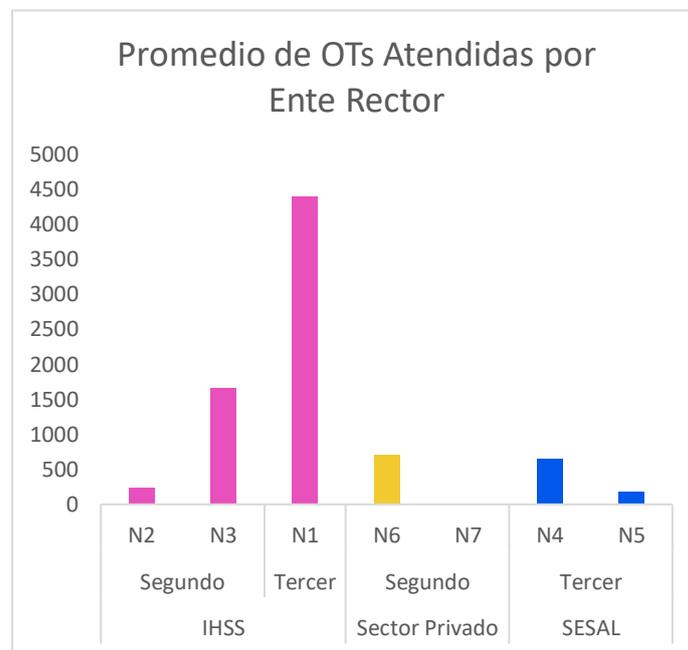


Figura 27 - Promedio de OTs Atendidas por Ente Rector y Nivel de Atención

Fuente: Elaboración propia (2023).

- Si se decidiera implementar un CMMS personalizado para su hospital, ¿Cuáles de las siguientes características generales consideraría indispensables? (Respuesta múltiple con opción abierta).

La Pregunta #9 presentó a los encuestados con las siguientes 8 requisitos de diseño para un CMMS:

1. Aplicación de PC y móvil (Req. N1).
2. Aplicación programada en lenguaje de programación particular (Req. N2).
3. Aplicación web (Req. N3).
4. Compatibilidad con varios sistemas operativos (Req. N4).
5. Creación de órdenes de trabajo digitales desde unidades clínicas (Req. N5).
6. Tiempo de carga de aplicación corto (Req. N6).
7. Interfaz de usuario intuitiva (Req. N7).
8. Respaldo de datos a un servicio de nube (Req. N8).

Uno de los encuestados ingresó en el campo abierto el requisito "Escaneo de ordenes de trabajo (proveedor externo)", al cual se le asignó el nombre Req. N9. La frecuencia con la cual fueron elegidos estos requisitos se recopiló en la Tabla 7 y la Figura 28.

Tabla 7 - Tabla de Frecuencias, Requisitos de Diseño de CMMS

Requisitos	Frec.	Frec. Acumulada	Frec. Relativa	Frec. Rel. Acumulada	%
Aplicación de PC y móvil	15	15	0.2027	0.2027	20.27
Creación de órdenes de trabajo digitales desde unidades clínicas	12	27	0.1622	0.3649	16.22
Aplicación web (acceso a través de navegador de internet)	12	39	0.1622	0.5271	16.22
Respaldo de datos a un servicio de nube	11	50	0.1486	0.6757	14.86
Compatibilidad con varios sistemas operativos	8	58	0.1081	0.7838	10.81
Interfaz de usuario intuitiva	6	64	0.0811	0.8649	8.11
Aplicación programada en lenguaje de programación particular	6	70	0.0811	0.946	8.11
Tiempo de carga de aplicación corto	3	73	0.0405	0.9865	4.05
Escaneo de órdenes de trabajo (proveedor externo)	1	74	0.0135	1	1.35

Fuente: Elaboración propia (2023).

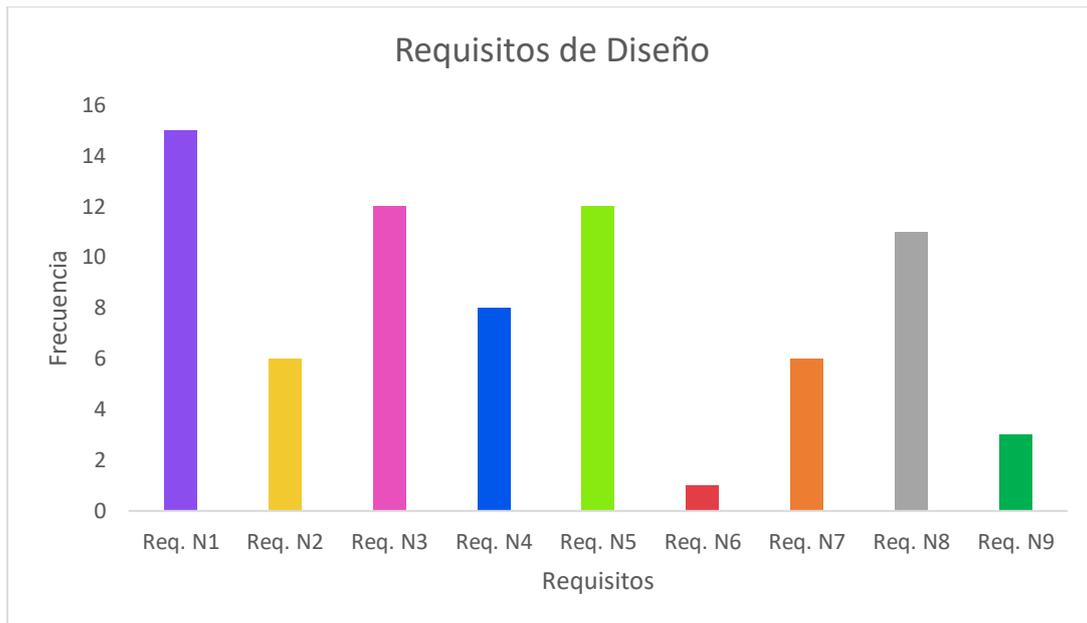


Figura 28 - Requisitos de Diseño

Fuente: Elaboración propia (2023).

Los cuatro requisitos más comunes fueron la implementación de una aplicación de PC y móvil ($n = 15$), una aplicación web ($n = 12$), creación de OTs digitales desde unidades clínicas ($n = 12$) y el respaldo de datos a un servidor nube ($n = 11$). En menor medida, se solicitó la compatibilidad entre varios sistemas operativos ($n = 8$).

La implementación de una aplicación de PC y móvil es altamente requerida, posiblemente debido a la flexibilidad que permite tener acceso al CMMS de forma remota, eliminando así la necesidad de tener que utilizar un punto de acceso definido.

La creación de OTs digitales desde las unidades clínicas reemplaza al sistema en papel y lápiz que se observa en la mayoría de las instituciones del país. Este paso a un sistema digitalizado permite una comunicación más eficaz entre una unidad clínica y la unidad de ingeniería biomédica de la institución.

El respaldo de datos a un servidor nube primeramente protege la integridad de la información almacenada en el CMMS. El almacenaje en nube también puede ser acompañado por almacenaje local, donde los datos respaldados sean de mayor antigüedad. En todo caso, la existencia de un respaldo de datos le permitirá a la unidad mantener una cantidad mayor de registros.

La compatibilidad entre varios sistemas operativos fue solicitada con mayor frecuencia de lo esperado. Es probable que las instituciones clínicas del país manejen infraestructura informática basada en UNIX para tales cuestiones como manejo y gestión de bases de datos.

La Pregunta #10 presentó a los respondientes una selección de diez funciones de sistemas CMMS y se solicitó su valoración de cada una, donde las respuestas disponibles eran "Innecesaria", "Necesaria" e "Indispensable". Para obtener un valor cuantitativo sobre el valor que los respondientes asignaron a cada función se asignaron valores de -1, 1 y 2 a cada respuesta disponible. Se obtuvo un porcentaje para el valor de cada función al multiplicar el valor de la respuesta por la cantidad de respuestas disponibles, con el máximo puntaje posible correspondiendo a 32 puntos y el mínimo a -16 puntos (Tabla 6). Los valores igual o mayores a 80% recibieron la clasificación de "Muy Valiosa", mayor a 70 "Valiosa", mayor a 60 "Indistinta" y menor o igual a 60 "Ineficaz".

Tabla 8 - Valoración de Funciones Específicas

Función	Innecesaria	Necesaria	Indispensable	Valor (%)	Categoría
Generación de reportes de rendimiento	1	5	10	75	Valiosa
Generación de reportes financieros	0	9	7	71	Valiosa
Gestión de inventario de refacciones	0	8	8	75	Valiosa
Gestión de MPP	0	3	13	90	Muy Valiosa
Gestión de OTs	0	4	12	87	Muy Valiosa
Gestión de personal de unidad de Ingeniería Clínica	0	10	6	68	Indistinta
Historial de mantenimientos	0	4	12	87	Muy Valiosa
Rastreo, asignación y gestión de equipos médicos en unidades clínicas	0	10	6	68	Indistinta
Registro de bajas o descartes de equipos médicos	0	9	7	71	Valiosa
Registro de fabricantes y vendedores de equipos médicos	3	6	7	53	Ineficaz

Fuente: Elaboración propia (2023).

Se observó que las funciones de Gestión de MPP, la Gestión de OTs y el Historial de Mantenimientos son las funciones que los encuestados consideran más importantes. Estas tres funciones tienen una incidencia directa en la gestión del volumen de trabajo de una unidad de biomédica.

La Gestión de MPP permite implementar agendas de MPP directamente en el CMMS. Al integrar los módulos de personal e inventario, le es más factible al ingeniero clínico coordinar estos trabajos con las unidades clínicas.

La Gestión de OTs permite a la unidad de biomédica abrir, cerrar, rechazar o trasladar las OTs que recibe. Esto implica, también, la digitalización de estas para la búsqueda rápida de las mismas y la capacidad de filtrar los resultados según diversos parámetros como Estado de Orden, Trabajo Realizado, Responsable, Unidad Clínica, entre otros.

El Historial de Mantenimientos es una herramienta de investigación interna que agiliza el proceso de recabado de información. Si un equipo falla de forma constante, contar con un historial del trabajo realizado sobre este apoyaría a la unidad de biomédica a determinar el posible origen de la falla o determinar si un modelo o tipo de equipo particular presenta problemas cuyas causas puedan ser externas al uso de este (ej. la frecuencia del suministro eléctrico recibido en la institución).

5.2 DISEÑO DE BASE DE DATOS

Se mencionó previamente en el Marco Teórico que el concepto de un CMMS está fuertemente entrelazado con las bases de datos. Los datos contenidos dentro de una BD, en la forma de tablas y vistas, son los factores más importantes dentro del desarrollo de un CMMS. En el modelo básico para un CMMS propuesto por la Organización Mundial de la Salud (2012) se presenta un diseño de BD, el cual fue tomado como referencia pero, a su vez, fue modificado con base en los requerimientos básicos presentados durante la Metodología. El diseño de la BD es, por lo general, independiente a la forma particular de la implementación, es decir, no está limitada por factores como el sistema operativo del usuario ni el lenguaje de programación particular que se emplee para el desarrollo de una aplicación. El tipo de relación entre tablas fue definido de manera secuencial, es decir, tabla por tabla de manera intuitiva (ej. un fabricante puede hacer varios modelos de equipos, lo cual se describe en una relación uno a muchos).

5.2.1 TABLAS DE LA BASE DE DATOS

Se determinó que eran necesarias siete tablas principales (Tabla 9) para cumplir con los requisitos básicos para un CMMS con base en el diseño propuesto por la OMS y los módulos definidos en el Capítulo IV. Se agregaron trece tablas más que apoyan las funciones de las tablas principales (Véase la Tabla 17). Es importante notar que dependiendo de los requisitos institucionales, es posible que se necesiten más tablas de las mencionadas en este documento. Es importante definir las tablas principales de la base de datos y las funciones que se desean cumplir con el CMMS para determinar aspectos más puntuales como campos de datos y tablas auxiliares.

Tabla 9 - Tablas Principales de la Base de Datos

Tabla	Llave Primaria	Resumen
Fabricantes de Equipos	ID (Entero)	En esta tabla se ingresan los fabricantes de equipos. Su inclusión permite filtrar resultados de búsqueda por el fabricante.
Inventario	ID (Entero)	Contiene datos relevantes a cada equipo como identificadores institucionales e identificadores de sala.
Modelos de Equipos	Código (VARCHAR)	En esta tabla se ingresan los modelos de equipos médicos que se manejan en la institución.
Órdenes de Trabajo	Número de OT (Entero)	Esta tabla se compone de varios campos obtenidos de las demás tablas y se utiliza para crear las órdenes de trabajo digitalizadas.
Personal	ID (Entero)	En esta tabla se ingresa el personal de la institución, sea personal clínico o personal técnico.
Unidades Clínicas	Código de Unidad (VARCHAR)	En esta tabla se ingresan las unidades clínicas de la institución, junto con su código de referencia.
Usuarios	Usuario (VARCHAR)	Esta tabla contiene la información y credenciales de ingreso de los usuarios del CMMS.

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.1 FABRICANTES DE EQUIPOS MÉDICOS

La Tabla de Fabricantes de Equipos Médicos (Tabla 10) se utilizó para registrar fabricantes en el CMMS (ej. General Electric, Siemens, Philips). Se incluyó principalmente para evitar que se ingresen modelos de equipos de proveniencia desconocida, es decir, equipos que no "tienen" fabricante. El indicador de "Activo" se utilizó para denotar si la institución, en el momento de realizar una consulta, maneja equipos de ese fabricante.

Tabla 10 - Tabla de Fabricantes de Equipos Médicos

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Fabricantes de Equipos	ID	Entero	*
	Nombre	VARCHAR	
	Activo	Booleano	

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.2 INVENTARIO DE EQUIPOS MÉDICOS

La Tabla de Inventario de Equipos Médicos (Tabla 11) contiene la información de identificación para un equipo médico particular. Es normal que se tengan varios códigos para un equipo, por ejemplo, la unidad a la que esté asignado puede designarlo con un código "local", mientras que la institución le asigna un código "global". Ambos de estos identificadores asignados se usan en conjunción con el identificador integrado del equipo: su número de serie. Se volvió a incluir el campo "Activo" para determinar si el equipo se encontraba disponible o si fue dado de baja (descartado). La inclusión del campo "Código de Bienes Nacionales" se basó en la posible implementación de un CMMS en una institución bajo la administración de la SESAL, pero de no aplicar, simplemente puede ser eliminado mediante el gestor de base de datos.

Tabla 11 - Tabla de Inventario de Equipos Médicos

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Inventario de Equipos Médicos	ID	Entero	*
	Activo	Booleano	
	Fecha de Inactividad	Fecha	
	Fecha de Inventario	Fecha	
	Usuario	VARCHAR	
	ID Hospital	Entero	
	Descripción	VARCHAR	
	Código de Modelo	VARCHAR	
	Código de Unidad Clínica	VARCHAR	
	Código de Bienes Nacionales	VARCHAR	
	Código de Inventario de Sala	VARCHAR	
	Número de Serie	VARCHAR	

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.3 MODELOS DE EQUIPOS MÉDICOS

La Tabla de Modelos de Equipos Médicos (Tabla 12) se utilizó para registrar los distintos modelos de equipos médicos de la institución. Cada modelo recibió un código interno, el cual fue utilizado para diferenciar rápidamente un modelo particular del resto. Se implementaron además campos de apoyo como "Fotografía" y "Descripción" para garantizar que cada modelo registrado sea único. El ID de Fabricante se obtuvo de la Tabla de Fabricantes y fue necesario que cada modelo tenga un fabricante correspondiente, de lo contrario, no se permitió que se agregara el registro incompleto.

Tabla 12 - Tabla de Modelos de Equipos Médicos

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Modelos de Equipos Médicos	Nombre	VARCHAR	
	Código de Tipo de Equipo	VARCHAR	
	Código	VARCHAR	*
	Activo	Booleano	
	Fotografía	Fotografía	
	ID de Fabricante	Entero	
	Descripción	VARCHAR	

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.4 ÓRDENES DE TRABAJO

La Tabla de Órdenes de Trabajo (Tabla 13) contuvo toda la información pertinente para la creación de una OT digital. El campo "Activo" se utilizó para inhabilitar la edición de una orden de trabajo que haya sido cerrada. Los campos utilizados en esta tabla se basaron en la información recolectada en el formato de orden de trabajo del HNMCR (Anexo II).

Tabla 13 - Tabla de Órdenes de Trabajo

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Órdenes de Trabajo	Habitación o Estancia	VARCHAR	
	Observación	VARCHAR	
	Activo	Booleano	
	Usuario	VARCHAR	
	Fecha de Orden de Trabajo	Fecha	
	ID de Responsable de Unidad de Biomédica	Entero	
	Funciona	VARCHAR	
	ID del Responsable	Entero	

Tabla 13 - Tabla de Órdenes de Trabajo, continuación

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Órdenes de Trabajo	ID del Estado de la Orden de Trabajo	Entero	
	ID de Nivel de Prioridad	Entero	
	ID de Turno Hospitalario	Entero	
	ID de Motivo Orden Trabajo	Entero	
	ID de Hospital	Entero	
	Numero de Orden de Trabajo	VARCHAR	*
	Código de Unidad	VARCHAR	

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.5 PERSONAL DE LA INSTITUCIÓN

La Tabla de Personal de la Institución (Tabla 14) contuvo la información acerca de los empleados de la institución. Se utilizó principalmente para validar a las personas mencionadas en la Orden de Trabajo. El personal incluido se limita a médicos, enfermeras y los miembros del personal biomédico. Es importante incluir al personal clínico para que pueda ser registrado quién reportó la falla de un equipo, permitiendo, de ser necesario, solicitar más información sobre un evento particular.

Tabla 14 - Tabla de Personal de la Institución

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Personal de la Institución	Primer Apellido	VARCHAR	
	Segundo Apellido	VARCHAR	
	Segundo Nombre	VARCHAR	
	Correo Electrónico	VARCHAR	
	Teléfono	VARCHAR	
	Celular	VARCHAR	
	Activo	Booleano	
	Fotografía	Fotografía	
	ID	Entero	*
	Dirección	VARCHAR	
	Primer Nombre	VARCHAR	
Identidad	VARCHAR		

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.6 UNIDADES CLÍNICAS

La Tabla de Unidades Clínicas de la Institución (Tabla 15) contuvo la información sobre las distintas áreas de atención del hospital, como, por ejemplo, Emergencia, Quirófano, UCI, entre otras. Esta tabla se destacó por tener dos llaves primarias, es decir, una llave compuesta. En este caso, el campo “Código de la Unidad” indicó la abreviatura de la sala (ej. Emergencia – EME) mientras que el campo “ID del Hospital” especificó a cuál institución le pertenecen estas unidades. El campo “Activo” se utilizó para activar o desactivar ciertas unidades, como, por ejemplo, una Unidad Covid-19 o Unidad de Dengue, siendo estas implementadas de forma temporal según la prevalencia de dichas enfermedades en un momento dado.

Tabla 15 - Tabla de Unidades Clínicas de la Institución

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Unidades Clínicas de la Institución	Código de la Unidad	VARCHAR	*
	Nombre	VARCHAR	
	ID del Hospital	Entero	*
	Activo	Booleano	

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.7 USUARIOS DEL CMMS

La Tabla de Usuarios del CMMS (Tabla 16) fue de las tablas más importantes de la BD al utilizarse para validar la entrada al sistema como tal. Los usuarios, a diferencia del personal general de la institución, son aquellas personas que hayan sido designadas por las Unidades Clínicas o la Unidad de Biomédica para utilizar el sistema. Por razones de integridad de la información almacenada en la base de datos, algunos campos como “Nombre Completo” son similares a los campos en la Tabla de Personal de la Institución. El campo “Activo” se utilizó para validar que el usuario en cuestión tenga permitido el ingreso a la base de datos, donde este campo fue inhabilitado cuando el usuario ya no forme parte de la institución.

Tabla 16 - Tabla de Usuarios del CMMS

Tabla	Campos de Datos	Tipo de Dato	Llave Primaria
Usuarios del CMMS	Celular	VARCHAR	
	Teléfono	VARCHAR	
	Nombre Completo	VARCHAR	
	Contraseña	VARCHAR	
	Usuario	VARCHAR	*
	Activo	Booleano	
	Correo Electrónico	VARCHAR	

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.8 TABLAS AUXILIARES

Las Tablas Auxiliares (Tabla 17) fueron aquellas que contienen datos relacionados a una de las tablas principales. En algunos casos es conveniente separar las tablas de tal forma que ciertos campos se almacenen de forma independiente a la tabla principal. Por ejemplo, los campos de descripción, usualmente extensos y relativamente pesados en una base de datos, son un punto de riesgo para la pérdida y corrupción de registros. Por ende, este campo se maneja en una tabla auxiliar para no comprometer la integridad de la tabla principal.

Los datos en la mayoría de estas tablas no pueden ser editados directamente desde la aplicación, necesitando que la adición, edición o eliminación de registros se realice mediante la manipulación directa de la base de datos a través de un gestor de base de datos. Es necesario, entonces, que al momento de crear la base de datos, esta tenga un usuario y contraseña definidos.

Tabla 17 - Tablas Auxiliares de la Base de Datos

Tabla Auxiliar	Llave(s) Primaria(s)	Resumen
Estados de Orden de Trabajo	ID (Entero)	Esta tabla contiene los distintos estados en los que se puede encontrar una orden de trabajo. Comúnmente son abierta, cerrada y rechazada.
Hospitales	ID (Entero)	Contiene datos relevantes a una institución clínica en particular. La inclusión de esta tabla permite, de ser solicitado, la interconexión de su propio sistema al de otras instituciones.
Personal de Hospitales	ID de Personal (Entero), ID de Hospital (Entero), ID de Tipo de Personal (Entero)	Identifica al personal por cada institución, de no conectarse a más de una institución, esta tabla podría ser descartada en la implementación final del CMMS.
Personal de Inventario	ID de Personal (Entero) ID de Inventario (Entero)	En esta tabla se almacena la información relacionada al personal al cual se le ha asignado la responsabilidad sobre la integridad de un equipo médico.
Motivos de Orden de Trabajo	ID (Entero)	Esta tabla almacena el motivo de una orden de trabajo. Debido a la gran cantidad de caracteres que puede ocupar una descripción del problema, se maneja por separado a la Tabla de Órdenes de Trabajo por motivos de integridad de la base de datos.
Niveles de Prioridad de Orden de Trabajo	ID (Entero)	Esta tabla almacena los distintos niveles de prioridad que puede tener una solicitud de una orden de trabajo. Estos usualmente son no urgente, urgente y crítico.

Tabla 17 - Tablas Auxiliares de la Base de Datos, continuación

Tabla Auxiliar	Llave(s) Primaria(s)	Resumen
Ordenes de Trabajo (Equipos)	ID de Inventario (Entero) Número de Orden de Trabajo (Entero)	Esta tabla contiene la información relacionada a un equipo y la orden de trabajo relacionada a este. Se utiliza para crear un historial de mantenimiento para cada equipo atendido.
Roles	ID (Entero)	Esta tabla contiene los distintos roles de usuario que pueden asignarse dentro del programa. Estos controlarían los privilegios de los usuarios, es decir, sus acciones dentro del CMMS y que información se les presenta.
Tareas	ID (Entero)	Esta tabla contiene las distintas tareas que puede realizar el personal de la unidad de biomédica sobre un equipo. Por lo general, estas tareas incluirían mantenimiento correctivo, mantenimiento preventivo, cambio de insumo, inspección, calibración o el descarte del equipo.
Tipo de Equipo Médico	Código (VARCHAR)	Esta tabla contiene los distintos tipos de equipos médicos que maneja la institución. La información de esta tabla se utiliza para crear un registro en la Tabla de Modelos de Equipos Médicos.
Tipo de Personal	ID (Entero)	Esta tabla contiene los distintos puestos y responsabilidades que se manejan en la institución como, por ejemplo, médicos, personal administrativo y personal técnico.
Turnos Hospitalarios	ID (Entero)	Esta tabla contiene la información acerca de los distintos turnos hospitalarios que maneje una institución. Por lo general se manejan tres turnos de ocho horas cada uno, categorizados como Turnos A, B y C.
Roles de Usuario	Usuario (VARCHAR) ID de Rol (Entero)	Esta tabla es la que conecta la Tabla de Roles con la Tabla de Usuarios, asignando así el rol pertinente al usuario del CMMS.

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.2.2.9 DIAGRAMA DE ENTIDAD-RELACIÓN

El Diagrama de Entidad-Relación (DER) es una representación gráfica de las relaciones que existen dentro de una base de datos relacional. En el diseño de base de datos es común utilizar esta herramienta para tener un recurso gráfico por el cual guiarse, con el beneficio agregado de que es más fácil presentar un DER a una persona inexperta en el tema y mantener un buen nivel de entendimiento sobre la propuesta de diseño. Para las tablas expuestas anteriormente, en su DER (Figura 29) se apreció que la tabla de Órdenes de Trabajo se compuso principalmente de información obtenida de otras tablas y tampoco se registraron tablas completamente aisladas, conocidas como "islas". Las líneas sólidas indican relaciones uno a uno, las líneas punteadas relaciones uno a muchos, y los puntos negros indican el "inicio" u orientación de la relación.

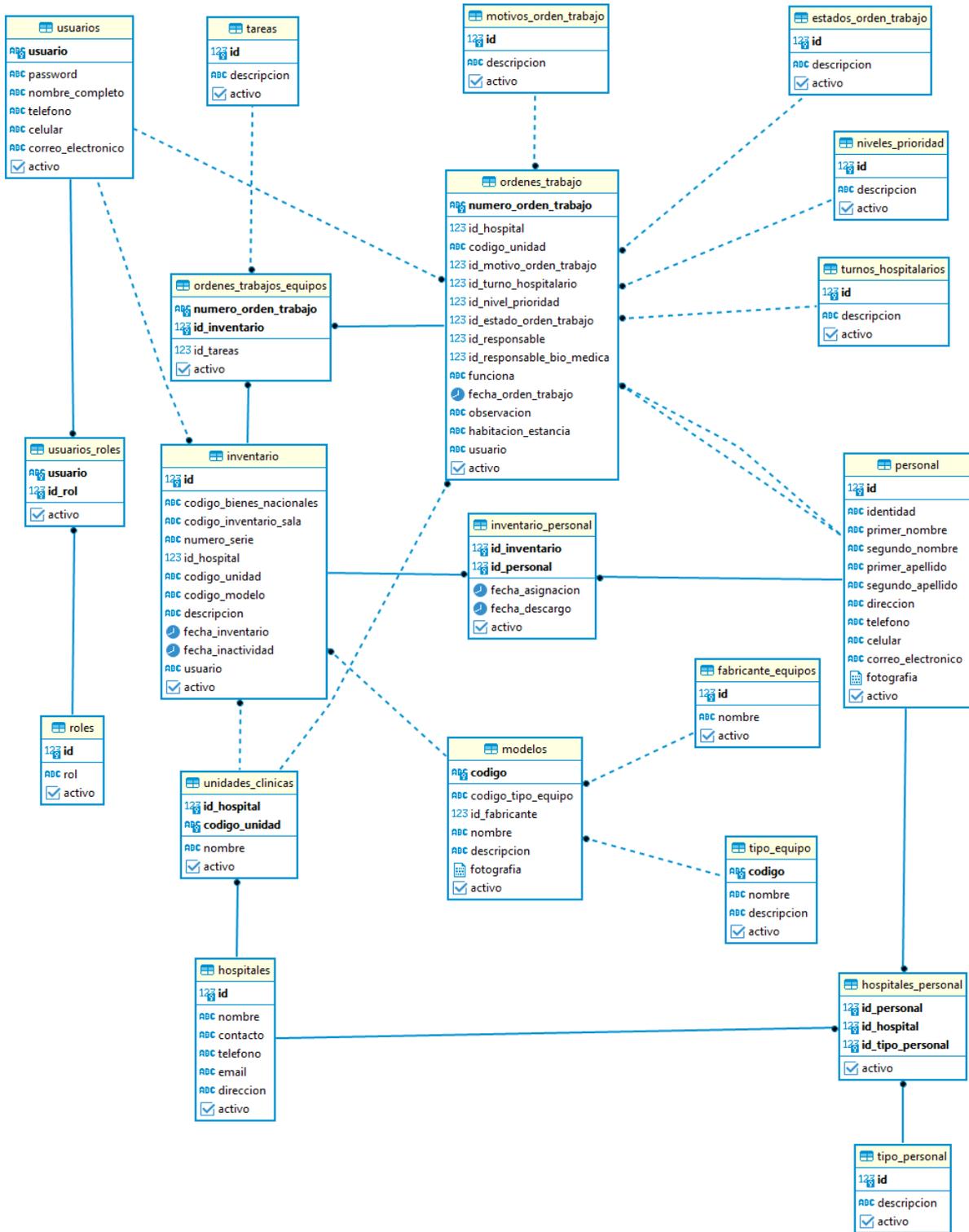


Figura 29 - Diagrama de Entidad-Relación de la Base de Datos Propuesta

Fuente: Elaboración propia (2023).

5.3 DESARROLLO DE PROTOTIPO ILUSTRATIVO

El desarrollo del prototipo se dividió en dos etapas: el desarrollo de una aplicación por CLI y una aplicación con una GUI. La CLI fue utilizada como un programa de pruebas para validar el diseño de la aplicación. La GUI implementa algunos, pero no todos, los módulos expuestos en el Capítulo IV.

5.3.1 DESARROLLO DE CLI PROGRAMADA EN C++

La CLI fue desarrollada en el IDE Dev-C++, con el propósito de crear un programa "dummy", es decir, un programa que simulara la funcionalidad de una aplicación más robusta. Por ejemplo, en vez de enlazarse a una base de datos, la CLI utiliza un arreglo predefinido y realiza cambios sobre este, con la particularidad que todos los cambios realizados eran de naturaleza volátil; se pierden los cambios efectuados entre cada ejecución del programa.

El desarrollo de la CLI permitió encontrar errores de manera temprana en un ambiente simplificado. Estos errores no necesariamente hacen referencia a errores de syntax, más bien al enfoque e implementación de ciertas funciones en el programa. Por ejemplo, durante esta etapa se determinó que era necesario desarrollar un conjunto de funciones que pudieran ser implementadas en varios módulos con modificaciones mínimas.

C++ es un lenguaje de programación increíblemente versátil y su bajo nivel de abstracción permite crear implementaciones sumamente rápidas. Sin embargo, C++ resulta ser más "hostil" en varios aspectos. Por ejemplo, es necesario asignar memoria manualmente para cada variable utilizada y esta memoria debe de ser destruida manualmente para evitar que siga consumiendo recursos aun cuando la variable en cuestión ya no esté siendo utilizada. Si bien es posible crear aplicaciones GUI o enlazar una solución a una base de datos en C++, dicha acción resultará más complicada debido a la naturaleza del lenguaje.

Para evitar la pérdida total de la programación realizada en C++, se determinó que se utilizaría el lenguaje C# para la creación de la aplicación GUI. Esto debido a que la programación en C++ permite cierto grado de persistencia entre la CLI a una conversión a GUI programada en C# debido a las similitudes en syntax, forma y funciones básicas entre ambos lenguajes.

5.3.2 DESARROLLO DE APLICACIÓN CON GUI PROGRAMADA EN C#

Una vez se finalizó el prototipado inicial de la aplicación CLI, se utilizó el código escrito en C++ como base para crear una aplicación GUI. Utilizando el IDE Visual Studio, se implementó una solución por medio de Winforms para agilizar el proceso de desarrollo y conversión de la aplicación CLI a GUI. La solución Winforms utiliza el lenguaje de programación C#.

Primeramente se creó la base de datos en PostgreSQL para poder conectarla a la solución en Winforms para poder interactuar con los datos almacenados en esta. Esta interacción se rige mediante la Asignación Objeto-Relacional, una técnica de programación utilizada para entrelazar un objeto, como una función, con una acción sobre la base de datos. Esta asignación crea un "puente" entre la aplicación y la base de datos.

Para la manipulación de la base de datos, sin embargo, se debe de especificar un método de interacción. Uno de los métodos más populares se conoce como CRUD, un acrónimo para los comandos *Create* (Crear), *Read* (Leer), *Update* (Actualizar), y *Delete* (Eliminar). Estos comandos interactúan con los registros encontrados en la base de datos, definidos comúnmente como el conjunto de datos encontrado sobre una fila de la tabla de origen de datos. El método CRUD define las cuatro interacciones fundamentales entre la aplicación y las tablas en la base de datos. Este método luego se implementa en servicios, componentes del código utilizados para "personalizar" el método CRUD a la tabla pertinente (Anexo IV).

Una vez se definen los servicios para cada tabla se puede proceder con la creación de la interfaz gráfica. Los elementos gráficos se denominan contenedores, donde estos, como su nombre lo indica, contienen código que se ejecuta al ocurrir determinada acción. Los contenedores proporcionados por Visual Studio ya contienen su mecanismo de ejecución integrado al código. Por ejemplo, los botones, al seleccionarse, automáticamente generan el código pertinente que define que la ejecución del código que contienen se dará al presionarse el botón.

Los contenedores también incluyen varias características que pueden ser manipuladas por temas de vistosidad y estética. Por ejemplo, se pueden agregar íconos a botones, un fondo para las ventanas de la aplicación, tamaño de la ventana, ubicación en la pantalla del usuario, entre otras características.

La aplicación se conforma de varias ventanas, separadas en cuatro módulos que se intercomunican con la base de datos (Figura 30). La base de datos se manipuló mediante el método CRUD definido para cada tabla de la base de datos. Se incluyeron dos ventanas adicionales, una de inicio de sesión que se utiliza para validar el ingreso de usuarios a la aplicación al solicitarles su nombre de usuario y contraseña. No se implementaron técnicas criptográficas para cifrar las contraseñas de los usuarios, dejándose en texto plano, pero esto, como fue expuesto con anterioridad en el Capítulo IV, no implica que deba de obviarse este proceso en un prototipo funcional.

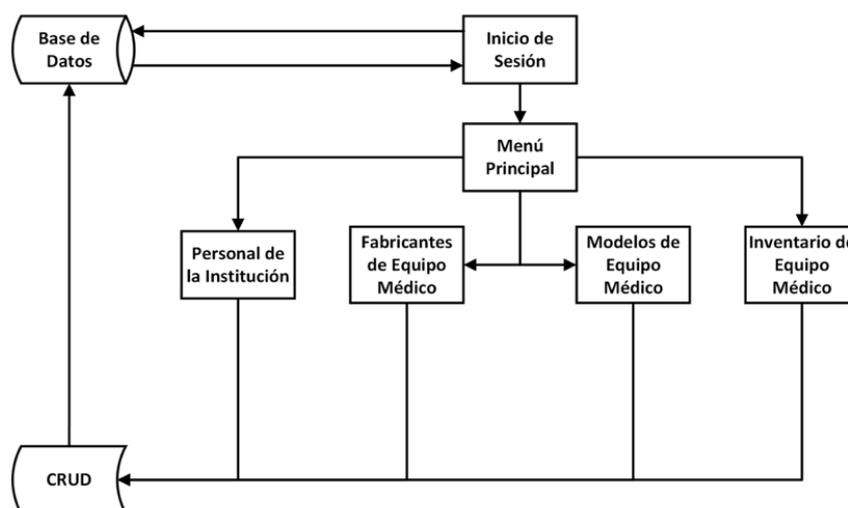


Figura 30 - Diagrama de Ventanas del Prototipo Ilustrativo

Fuente: Elaboración propia (2023).

La aplicación contó con un menú principal (Figura 31) desde el cual se pudo acceder a las distintas funciones del CMMS. Se obtuvo un control más estricto sobre el ingreso de datos al programa como, por ejemplo, evitar que se agregaran equipos al inventario sin que estos contaran con un fabricante. Se pudo interactuar los módulos de la aplicación a través de un menú strip en la parte superior de la pantalla principal.



Figura 31 - Pantalla Principal del Prototipo Ilustrativo

Fuente: Elaboración propia (2023).

VI. CONCLUSIONES

1. El diseño propuesto para un CMMS, fundamentado en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y la opinión informada de los expertos encuestados, fue mínimamente funcional al no cumplir en su totalidad con las funciones expuestas en los módulos del diseño, sin embargo, la naturaleza modular del diseño en conjunto con su metodología de desarrollo resultó en un diseño prometedor. Las consideraciones particulares para la gestión de mantenimiento de equipos médicos fueron implementadas como base fundamental del diseño y se consideró apto para ser implementado en el contexto biomédico.
2. Durante la investigación se determinó que no hay instancias documentadas sobre la implementación de sistemas CMMS en el país, tanto al nivel industrial como el sanitario. Sin embargo, sí se manejan ciertos componentes de un CMMS, como lo son el inventario de equipos médicos de una institución e inventarios de refacciones. Contrastando con la prevalencia del conocimiento previo de los encuestados sobre los sistemas CMMS, es probable que el bajo o nulo nivel de implementación de estos sistemas se deba a la deficiencia de la infraestructura informática en la mayoría de los centros de salud del país en conjunto con el bajo presupuesto que se maneja para el sector salud, imposibilitando la implementación de soluciones comerciales (SESAL, 2005).
3. En el transcurso de la investigación se determinó que la metodología más adecuada para el desarrollo de un CMMS es la Metodología en V debido a la naturaleza modular de estos sistemas. Esta metodología, utilizada en el desarrollo de distintos tipos de software, define al menos tres etapas de desarrollo y tres etapas de validación, donde estas dos fases se entrelazan con el objetivo de encontrar discrepancias entre el diseño planteado del software y su rendimiento real. En conjunto con el Juicio de Expertos, se llegó a una metodología de proyecto funcional y prometedora para el desarrollo de software en el contexto biomédico. Fue ponderado también el Modelo Cascada, pero esta herramienta hace un énfasis en las características técnicas del componente de programación, mientras que esta investigación necesita un mayor balance técnico-teórico.

4. A través de la encuesta realizada se definió que los requisitos más populares para un CMMS son la implementación de una aplicación móvil, el respaldo de la base de datos a un servicio de nube, la compatibilidad con varios sistemas operativos y la creación de órdenes de trabajo digitales desde las unidades clínicas. Las funciones del CMMS que se consideran indispensables son la gestión de MPP, la gestión de órdenes de trabajo y el historial de mantenimientos realizados a cada equipo en el inventario. Para los requisitos destacan que se desea un grado de flexibilidad considerable, requiriéndose la aplicación móvil para tener acceso remoto al CMMS y la compatibilidad con diversos sistemas operativos, lo cual por lo general indica que se maneja Microsoft Windows y una distribución de Linux, donde este último se implementa en la operación de servidores internos.
5. Se determinó que el prototipo ilustrativo para el CMMS expuesto, escrito en el lenguaje de programación C#, no cumple con la mínima funcionalidad requerida para un programa de este tipo. Al no haberse implementado el módulo de órdenes de trabajo no es posible llevar un control adecuado del mantenimiento realizado a la base de equipos. Sin embargo, el tiempo de desarrollo limitado para este programa, correspondiendo a cinco semanas, produjo resultados positivos debido a la naturaleza modular de la solución Winforms.

VII. RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio descriptivo observacional sobre el estado de la infraestructura informática en distintas instituciones clínico-hospitalarias en Honduras en el segundo y tercer nivel de atención para obtener una visión concreta sobre las capacidades técnicas del sector salud. Conociendo estas deficiencias, en primera instancia se apoyaría el desarrollo de la infraestructura informática.

Se recomienda la implementación de la Metodología en V para la iteración sobre el trabajo presentado para crear nuevos módulos, optimizar ciertas tareas en los módulos presentados y expandir el diseño de la base de datos para que esta se acople a los requerimientos más comunes según el criterio de los encuestados.

Se recomienda el traslado de la solución Winforms a una solución escrita en el lenguaje Java para obtener una aplicación multiplataforma y la implementación de las medidas de ciberseguridad expuestas en el Capítulo III.

VIII. APLICABILIDAD

Un sistema CMMS puede ser aplicado a cualquier centro de salud que cuente con un departamento de mantenimiento, sin embargo, debido a que el diseño expuesto tiene como objetivo la gestión del mantenimiento de equipos médicos, este solo podría implementarse en aquellas instituciones que cuenten con un departamento de ingeniería biomédica. La implementación del diseño propuesto agilizaría los procesos de mantenimiento y la gestión de equipos en concordancia con los hallazgos presentados en el Capítulo III.

El diseño propuesto también permitiría que el sistema CMMS sea implementado en redes hospitalarias, por ejemplo, el Hospital del Valle podría comunicarse con el Hospital del Caribe, ambos hospitales estando en la misma red. Esta comunicación facilita procesos de auditoría y de soporte técnico proveniente del ente rector u organización superior en la red.

IX. TRABAJO FUTURO

Durante el desarrollo del prototipo ilustrativo se determinó que ciertas funciones, como la implementación del módulo de órdenes de trabajo, no serían posibles debido al elevado grado de complejidad sobre la programación requerida para dicho módulo. En primera instancia, se podría completar el desarrollo del prototipo ilustrativo para que sea conforme con los requerimientos delineados en el Capítulo IV, para luego este ser expandido en referencia a los resultados obtenidos de la encuesta a expertos para crear un prototipo funcional viable. Es necesario también realizar una validación sobre el diseño de la GUI para determinar si los usuarios sienten que es intuitiva o no.

Seguiría, entonces, la fase de implementación y evaluación del programa en un ambiente real, preferiblemente en el sector público, para validar el diseño del CMMS y corregir o añadir capacidades para que este obtenga un rendimiento aceptable para la institución recipiente.

X. CONCORDANCIA DE LOS SEGMENTOS DE LA TESIS CON LA INVESTIGACIÓN

A continuación se presenta la Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación realizada (Tabla 18) como una síntesis del trabajo realizado durante el transcurso de diez semanas.

Tabla 18 - Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación

Capítulo I
Introducción
<p>En el ambiente clínico-hospitalario existen dos categorías que pueden describir las máquinas y herramientas utilizadas para el cuidado de la salud: dispositivos y equipos médicos. La primera categoría, según la Organización Mundial de la Salud (2012), se comprende por cualquier "... producto, instrumento, aparato o máquina que se usa para la prevención, el diagnóstico o el tratamiento de enfermedades y dolencias, o para detectar, medir, restaurar, corregir o modificar la anatomía o función del organismo con un fin sanitario" (p. 6). La segunda categoría se ve englobada dentro de la primera, con la particularidad de que "... exige[n] calibración, mantenimiento, reparación, capacitación del usuario y desmantelamiento, actividades que por lo general están a cargo de ingenieros clínicos" (p. 6).</p>
<p>Los procesos de mantenimiento de equipos médicos pueden ser planificados o no planificados (Rani et al., 2014). Es importante para la institución tener un registro de las labores realizadas sobre el equipo, reemplazo de piezas o consumibles, garantías, información identificadora, entre otros datos. Para ello se puede emplear un CMMS, «Computerized Maintenance Management System», Sistema Computarizado de Gestión de Mantenimiento en español. Esta es una herramienta de software que permite recolectar registros de mantenimiento, registros de inventario, crear agendas de mantenimiento planificado, crear un inventario de refacciones, entre otras características (Phillips, 2002). Al tratarse de un sistema digital, se cuenta con la ventaja de que todos sus datos pueden ser indexados en una base de datos que permite buscar información de manera más eficiente en comparación con un mismo registro en papel y lápiz.</p>
<p>En este trabajo se presentarán los resultados obtenidos de un periodo de 10 semanas de desarrollo para el diseño y prototipado de un CMMS, junto con una recolección de información cualitativa obtenida de una muestra de expertos en el área de ingeniería clínica. Se espera que los resultados de este proyecto puedan ser utilizados para crear una herramienta informática eficiente y modular para agilizar la gestión de equipos médicos y su mantenimiento en las instituciones clínico-hospitalarias de Honduras.</p>

Tabla 18 - Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación, continuación

Capítulo II	
Preguntas de Investigación	Objetivos
General	General
Debido a la naturaleza de la investigación, no existe una pregunta general propiamente. Por tanto, el objetivo general se sintetiza a partir de la recolección de las preguntas de investigación específicas.	Proponer un diseño de CMMS personalizado para aplicaciones de gestión biomédica hospitalaria.
Específicos	Específicos
¿Cuáles es la situación actual, conceptos y teorías que fundamenten la implementación de sistemas CMMS?	Determinar la situación actual, conceptos y teorías que fundamenten la implementación de sistemas CMMS.
¿Qué tipo de metodologías pueden ser definidas para la investigación y desarrollo de una propuesta de un CMMS a nivel local?	Identificar las metodologías más adecuadas para la investigación y desarrollo de una propuesta de un CMMS a nivel local.
¿Qué tipo de características debe tener un CMMS para cumplir con los requerimientos de los usuarios en el ambiente hospitalario local?	Investigar las características que los usuarios en el ambiente hospitalario local consideran como requisitos para un CMMS.
¿Qué nivel de funcionalidad puede tener un CMMS programado en lenguaje C# a bajo costo?	Estudiar el grado de funcionalidad que se obtiene del desarrollo de un CMMS basado en lenguaje de programación C# a bajo costo.

Tabla 18 - Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación, continuación

Capítulo III	Capítulo IV		Capítulo V
Marco Teórico	Variables	Metodologías Implementadas	Resultados
<p>En este capítulo se abordan las bases teóricas y conceptos que engloban al concepto del sistema CMMS. Durante su elaboración se recopiló información de fuentes indexadas en Scopus o, fallando esto, de bases de archivos como Elsevier o IEEE Xplore. Se presenta la situación sobre la implementación de sistemas CMMS en el contexto clínico-hospitalario y se expone acerca de las condiciones particulares del país que predisponen a las fallas de equipo médico que, por consecuente, requieren de mantenimiento para ser puestos en servicio.</p>	<p>Dependiente</p>	<p>Metodología de Desarrollo</p> <p>La Metodología en V es una herramienta de desarrollo en los campos de las ingenierías, siendo comúnmente implementada en el desarrollo de sistemas electromecánicos y el desarrollo de software. Balaji y Murugaiyan (2011) concluyeron que la Metodología en V para el desarrollo de software es útil para proyectos grandes con cambios y validación realizados en cada etapa de desarrollo, lo cual es adecuado para el desarrollo de un CMMS hospitalario. Cada fase de la Metodología en V puede verificarse entre sus etapas relacionadas entre las fases de desarrollo y validación, lo cual facilita la iteración sobre el trabajo realizado. Esta iteración agiliza el proceso de mejora de un trabajo o diseño original al seguir una estructura uniforme que puede ser implementada o replicada sin necesitar la intervención de los autores del trabajo original.</p>	<p>En este capítulo se presentan los hallazgos de la encuesta y los resultados del proceso de prototipaje de software. Utilizando los resultados de la encuesta, en conjunto con la plantilla de la OMS (2012), se creó un diseño para una base de datos que sirve como la fundación para el desarrollo de una aplicación con una interfaz gráfica de usuario para la manipulación de los datos en la base de datos. Luego, se desarrolló un prototipo ilustrativo sobre un CMMS, sin embargo, este no llegó a cumplir con los requisitos planteados en el Capítulo IV para obtener un presentable mínimamente viable.</p>
	<p>Independientes</p> <p>Diseño del CMMS</p>	<p>Metodología de Validación</p> <p>Se implementó como metodología de validación el juicio por expertos. El juicio por expertos, según Escobar-Pérez y Cuervo-Martínez (2007) es "... una opinión informada de personas con trayectoria en el tema, que son reconocidas por otros como expertos cualificados en éste, y que pueden dar información, evidencia, juicios y valoraciones". Estas opiniones se recopilaron mediante una encuesta. Los expertos en cuestión son ingenieros biomédicos que desempeñen o hayan desempeñado sus labores en instituciones hospitalarias del país, sean del sector público o privado. Debido a que la encuesta fue dirigida exclusivamente a expertos en el tema sobre la gestión de mantenimiento en instituciones sanitarias del país, la encuesta como tal implementa la validación de juicio por expertos, por lo cual no fue necesario revalidar las respuestas obtenidas más allá del análisis estadístico descriptivo.</p>	
	<p>Diseño de Base de Datos</p> <p>Requisitos de la Institución</p> <p>Funciones del CMMS</p> <p>Interfaz de Usuario</p> <p>Arquitectura de Software</p> <p>Módulos del CMMS</p>		

Tabla 18 - Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación, continuación

Capítulo VI
Conclusiones
<p>El diseño propuesto para un CMMS, fundamentado en las recomendaciones de la Organización Mundial de la Salud y la opinión informada de los expertos encuestados, es mínimamente funcional, sin embargo, la naturaleza modular del diseño en conjunto con su metodología de desarrollo permite la rápida iteración y mejora sobre el mismo. Las consideraciones particulares para la gestión de mantenimiento de equipos médicos fueron implementadas como base fundamental del diseño y se considera apto para ser implementado en el contexto biomédico.</p>
<p>Durante la investigación se determinó que no hay instancias documentadas sobre la implementación de sistemas CMMS en el país, tanto al nivel industrial como el médico. Sin embargo, sí se manejan ciertos componentes de un CMMS, como lo son el inventario de equipos médicos para una institución e inventarios de refacciones. Contrastando con la prevalencia del conocimiento previo de los encuestados sobre los sistemas CMMS, es probable que el bajo o nulo nivel de implementación de estos sistemas se deba a la deficiencia de la infraestructura informática en la mayoría de los centros de salud del país en conjunto con el bajo presupuesto que se maneja para el sector salud, imposibilitando la implementación de soluciones comerciales.</p>
<p>En el transcurso de la investigación se determinó que la metodología más adecuada para el desarrollo de un CMMS es la Metodología en V debido a la naturaleza modular de estos sistemas. Esta metodología, utilizada en el desarrollo de distintos tipos de software, define al menos tres etapas de desarrollo y tres etapas de validación, donde estas dos fases se entrelazan con el objetivo de encontrar discrepancias entre el diseño planteado del software y su rendimiento real.</p>
<p>A través de la encuesta realizada se determinó que los requisitos más populares para un CMMS son la implementación de una aplicación móvil, el respaldo de la base de datos a un servicio de nube, la compatibilidad con varios sistemas operativos y la creación de órdenes de trabajo digitales desde las unidades clínicas. Las funciones del CMMS que se consideran indispensables son la gestión de MPP, la gestión de órdenes de trabajo y el historial de mantenimientos realizados a cada equipo en el inventario. Para los requisitos destacan que se desea un grado de flexibilidad considerable, requiriéndose la aplicación móvil para tener acceso remoto al CMMS y la compatibilidad con diversos sistemas operativos, lo cual por lo general indica que se maneja Microsoft Windows y una distribución de Linux, donde este último se implementa en la operación de servidores internos.</p>
<p>El desarrollo del prototipo ilustrativo para el CMMS expuesto, escrito en el lenguaje de programación C#, no cumple con la mínima funcionalidad requerida para un programa de este tipo. Al no poderse crear el módulo de órdenes de trabajo no se puede llevar un control adecuado del mantenimiento realizado a la base de equipos. Sin embargo, el tiempo de desarrollo limitado para este programa, correspondiendo a cinco semanas, produjo resultados positivos debido a la naturaleza modular de la solución Winforms.</p>

Tabla 18 - Concordancia de los Segmentos de la Tesis con la Investigación, continuación

Capítulo VII	Capítulo VIII	Capítulo IX
Recomendaciones	Aplicabilidad	Trabajo a Futuro
<p>Se recomienda realizar un estudio descriptivo observacional sobre el estado de la infraestructura informática en distintas instituciones clínico-hospitalarias en Honduras en el segundo y tercer nivel de atención para obtener una visión concreta sobre las capacidades técnicas del sector salud. Conociendo estas deficiencias, en primera instancia se apoyaría el desarrollo de la infraestructura informática.</p> <p>Utilizando la Metodología en V y los resultados obtenidos a través de la encuesta, sería posible iterar sobre el trabajo presentado para crear nuevos módulos, optimizar ciertas tareas en los módulos presentados y expandir el diseño de la base de datos para que esta se acople a los requerimientos más comunes según el criterio de los encuestados para crear un CMMS cuya implementación pueda ser general, es decir, que sea aplicable a diversos centros de salud, independiente del ente rector o nivel de atención.</p> <p>Para el desarrollo de un prototipo funcional, se trasladaría la implementación de la solución Winforms (exclusiva a Windows) a un programa escrito en el lenguaje Java el cual sería independiente al sistema operativo del usuario. Se implementarían las medidas de ciberseguridad expuestas en el Capítulo III y se implementaría la base de datos expandida en base al criterio de los encuestados.</p>	<p>Un sistema CMMS puede ser aplicado a cualquier centro de salud que cuente con un departamento de mantenimiento, sin embargo, debido a que el diseño expuesto tiene como objetivo la gestión del mantenimiento de equipos médicos, este solo podría implementarse en aquellas instituciones que cuenten con un departamento de ingeniería biomédica. La implementación del diseño propuesto agilizaría los procesos de mantenimiento y la gestión de equipos en concordancia con los hallazgos presentados en el Capítulo III.</p> <p>El diseño propuesto también permitiría que el sistema CMMS sea implementado en redes hospitalarias, por ejemplo, el Hospital del Valle podría comunicarse con el Hospital del Caribe, ambos hospitales estando en la misma red. Esta comunicación facilita procesos de auditoría y de soporte técnico proveniente del ente rector u organización superior en la red.</p>	<p>Durante el desarrollo del prototipo ilustrativo se determinó que ciertas funciones, como la implementación del módulo de órdenes de trabajo, no serían posibles debido al elevado grado de complejidad sobre la programación requerida para dicho módulo. En primera instancia, se podría completar el desarrollo del prototipo ilustrativo para que sea conforme con los requerimientos delineados en el Capítulo IV, para luego este ser expandido en referencia a los resultados obtenidos de la encuesta a expertos para crear un prototipo funcional viable.</p> <p>Seguiría, entonces, la fase de implementación y evaluación del programa en un ambiente real, preferiblemente en el sector público, para validar el diseño del CMMS y corregir o añadir capacidades para que este obtenga un rendimiento aceptable para la institución recipiente.</p>

Fuente: Elaboración propia (2023).

BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, F., Fuentes, J., & Enderle, J. (2005). Design of computerized maintenance management system for the Chilean naval hospital biomedical engineering department. Conference Proceedings: Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual Conference, 2006, 174–177.
<https://doi.org/10.1109/IEMBS.2005.1616370>
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. (2017). Ventilation and Heating of Health Care Facilities 170-2017, Addendum N. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers. (2017). Ventilation and Heating of Health Care Facilities 170-2017, Addendum P. American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
- Arendt, D. (2016). Medical-Grade Network Security - Air-Gap Isolation and Possible Weak Points. Journal of Applied Computer Science, 24(3), 7-19.
<https://doi.org/10.34658/jacs.2016.24.3.7-19>
- Ayala, L. (2016). Cybersecurity for Hospitals and Healthcare Facilities: A Guide to Detection and Prevention. Apress.
- Balaji, S., & Murugaiyan, M. (2011). WATERFALL Vs V-MODEL Vs AGILE: A COMPARATIVE STUDY ON SDLC. International Journal of Information Technology and Business Management.
<https://mediaweb.saintleo.edu/Courses/COM430/M2Readings/WATEERFALLVs%20V-MODEL%20Vs%20AGILE%20A%20COMPARATIVE%20STUDY%20ON%20SDLC.pdf>
- BBC News. (2017, 13 mayo). NHS cyber-attack: GPs and hospitals hit by ransomware. BBC News. <https://www.bbc.com/news/health-39899646>

- Bermúdez-Madriz, J. L. (2011). Sistema de Salud de Honduras. www.scielosp.org.
<https://doi.org/10.1590/S0036-36342011000800016>
- British Standards Institution. (1984). British Standard Glossary of Maintenance Management Terms in Terotechnology (BSI Standard No. 3811:1984).
- Buchbinder, S. B., & Shanks, N. H. (2016). Introduction to Health Care Management (English Edition). (3.a ed.). Jones & Bartlett Learning.
- Decreto No. 144-83, de 24 de abril de 2008, de la Aplicación de la Ley Penal. Tegucigalpa, 24 de abril de 2008, No. 24,264, pp. 48-49.
- Decreto No. 274-210, de 16 de marzo de 2011, de la Dirección General de Bienes Nacionales. Tegucigalpa, 16 de marzo de 2011, No. 32,468, p. 2.
- De Lemos, Z. (2004). FMEA software program for managing preventive maintenance of medical equipment. IEEE 30th Annual Northeast Bioengineering Conference, 2004. Proceedings of the, Springfield, MA, USA, 2004, pp. 247-248, DOI: 10.1109/NEBC.2004.1300087.
- Derrico, P., Ritrovato, M., Nocchi, F., Faggiano, F., Capussotto, C., Franchin, T., & De, L. (2011). Clinical Engineering. Applied Biomedical Engineering.
<https://doi.org/10.5772/19763>
- Escobar-Pérez, J., & Cuervo-Martínez, A. (2007). Validez de contenido y juicio de expertos: una aproximación a su utilización. Avances en medición, 6(1), 27-36.
- Harrington, J. L. (2009). Relational Database Design and Implementation: Clearly Explained. Elsevier Gezondheidszorg.
- Hospital Nacional Mario Catarino Rivas. (s. f.). Orden de Trabajo, Hospital Nacional Mario Catarino Rivas.
- Instituto Hondureño de Ciencias de la Tierra, UNAH (noviembre, 2012). Atlas Climático de Honduras. Universidad Autónoma de Honduras.
<https://ihcit.unah.edu.hn/productos/atlas-climatico/#:~:text=2020%20%3A02pm-,DESCARGAR,-Productos>
- Instituto Nacional de Ciberseguridad [INCIBE]. (2016). Guía de Almacenamiento Seguro de la Información [PDF]. Ministerio de Energía, Turismo y Agenda

Digital.

https://www.incibe.es/sites/default/files/contenidos/guias/doc/guia_ciberseguridad_almacenamiento_seguro_metad.pdf

İlknur Baylakoğlu, Aleksandra Fortier, San Kyeong, Rajan Ambat, Helene Conseil-Gudla, Michael H. Azarian, Michael G. Pecht. (2021). The detrimental effects of water on electronic devices. e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy. <https://doi.org/10.1016/j.prime.2021.100016>.

Kernighan, B. W., & Ritchie, D. M. (1988b). The C Programming Language. Prentice Hall.

Ley del Sistema Nacional de Salud. Art. 43. 2005 (Honduras).

Lie, C. H., & Chun, Y. H. (1986). An Algorithm for Preventive Maintenance Policy. IEEE Transactions on Reliability, 35(1), 71-75.
<https://doi.org/10.1109/tr.1986.4335352>

Mather, D. (2002). CMMS: A Timesaving Implementation Process. Taylor & Francis.

Medina, D., Suárez, Y., & Hernández, P. (2015). Sistema automatizado para la gestión del mantenimiento de equipos (módulos patrimonio y órdenes de trabajo). Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 24, 79-84.
<https://www.redalyc.org/pdf/932/93243475014.pdf>

Montúfar, L. S. (2006). Informática I: Un Enfoque Constructivista. Pearson Educación.

Nirapai, A., Wongkamhang, A., Sangworasil, M., Saosuwan, R., Yotthuan, P., & Chaikot, P. (2018). Computerized Medical Device Management System. 2018 3rd Technology Innovation Management and Engineering Science International Conference (TIMES-iCON). <https://doi.org/10.1109/times-icon.2018.8621812>

Oppel, A., & Sheldon, R. (2008). SQL: A BEGINNER'S GUIDE 3/E. McGraw-Hill Education.

Oracle Corp. (2008). Oracle® Role Manager User's Guide (10g (10.1.4)) [PDF].

Organización Mundial de la Salud (2012). Computerized Maintenance Management System. Organización Mundial de la Salud.

- Organización Mundial de la Salud. (2012). Introducción Al Programa de Mantenimiento de Equipos Médicos. Organización Mundial de la Salud.
- Phillips, P. (2002). More than maintenance in CMMS: CMMS software programs not only help organize maintenance work, but also play a key role in meeting the documentation requirements of various regulatory and standards initiatives in industry. *Machinery & Equipment*, 18(6), 42.
- Rani, N. A. A., Baharum, M. R., Akbar, A. R. N., & Nawawi, A. H. (2015). Perception of Maintenance Management Strategy on Healthcare Facilities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 170, 272-281.
<https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.01.037>
- Ross, R., Pillitteri, V., Graubart, R., Bodeau, D., & McQuaid, R. (2021). Developing Cyber-Resilient Systems: NIST Special Publication 800-160, Volume 2.
<https://doi.org/10.6028/nist.sp.800-160v2r1>
- Rühlig, T., & Björk, M. (2020). What to Make of the Huawei Debate? 5G Network Security and Technology Dependency in Europe. Utrikespolitiska Institutet Paper, 16. <https://www.ui.se/globalassets/ui.se-eng/publications/ui-publications/2020/ui-paper-no.-1-2020.pdf>
- Salamit, N. N. A., & Abdul Wahid, E. A. Z. (2021). Implementation of The Computerized Maintenance Management System (CMMS) In Government Hospital Facility Management Services (FMS). *Progress in Engineering Application and Technology*, 2(2), 204–213. Retrieved from <https://publisher.uthm.edu.my/periodicals/index.php/peat/article/view/984>
- Sampieri, R. H., Collado, C. F., Lucio, P. B., Valencia, S. M., & Torres, C. P. M. (2014). *Metodología de la investigación*. McGraw-Hill Education.
- SESAL, OPS, & FUTSH. (2005). Anteproyecto de la Ley del Sistema Nacional de Salud [PDF].
- SESAL (2005). Plan Nacional de Salud, 2021. Tegucigalpa, Secretaría de Salud.
- Siliceo, A. (2006). *Capacitación y desarrollo de personal*. Limusa.

- Terry, K. (2012, 15 agosto). Medical Device Integration Software Surges In Hospitals. InformationWeek. <https://www.informationweek.com/electronic-health-records/medical-device-integration-software-surges-in-hospitals>
- Thain, D. (2020). Introduction to Compilers and Language Design: Second Edition. Publicado Independientemente.
- United States Department of Energy. (2010). Operations and Maintenance Best Practices: A Guide to Achieving Operational Efficiency - August 2010. Van Haren Publishing.
- Villar, M. L. G. (2006). Sistemas y Aplicaciones Informáticas. Alianza Editorial.
- Wienker, M., Henderson, K., & Volkerts, J. (2016). The Computerized Maintenance Management System an Essential Tool for World Class Maintenance. Procedia Engineering, 138, 413-420. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.02.100>

ANEXOS

ANEXO I – PANTALLAS DEL PROTOTIPO ILUSTRATIVO DE CMMS

A continuación se muestra la secuencia de pantallas vistas en el prototipo ilustrativo, iniciando en la pantalla de autenticación de usuario y mostrando la pantalla de creación (Create), lectura (Read), edición (Update) y eliminación (Delete) para los Tipos de Equipos Médicos. La estructura de las pantallas es similar a los demás tipos.

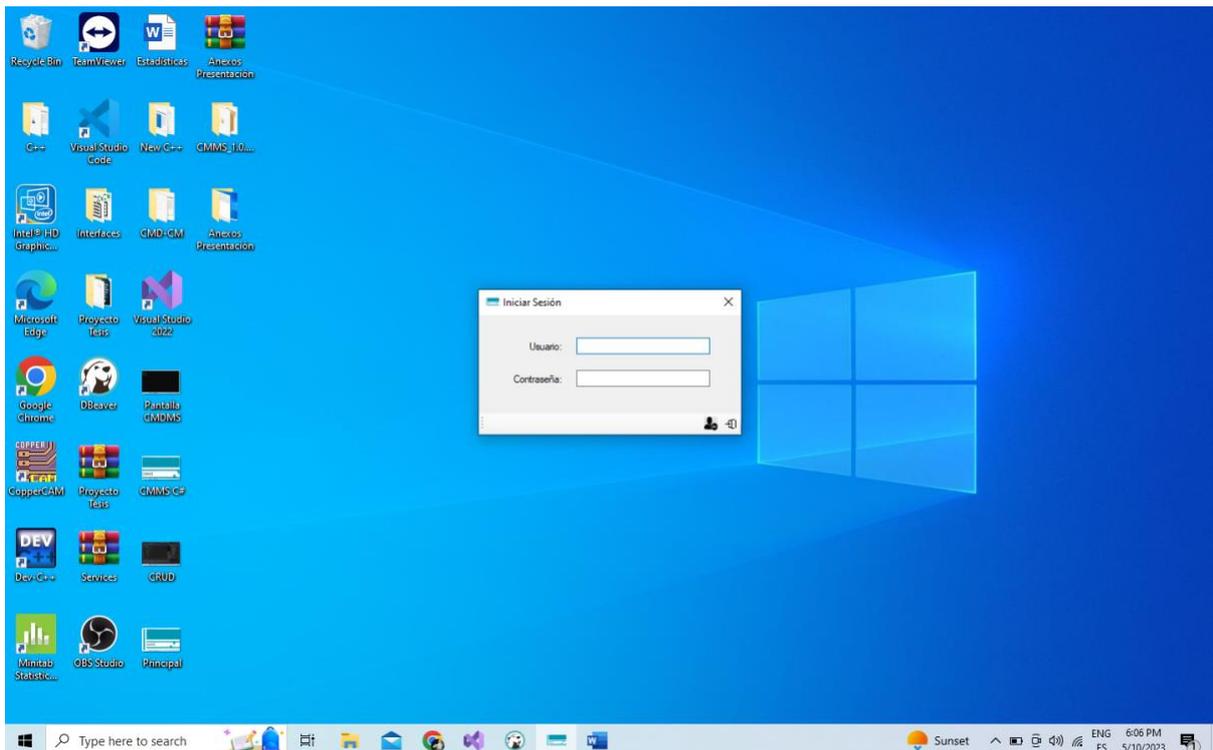


Figura 32 – Pantalla de Autenticación de Usuarios

Fuente: Elaboración propia (2023).

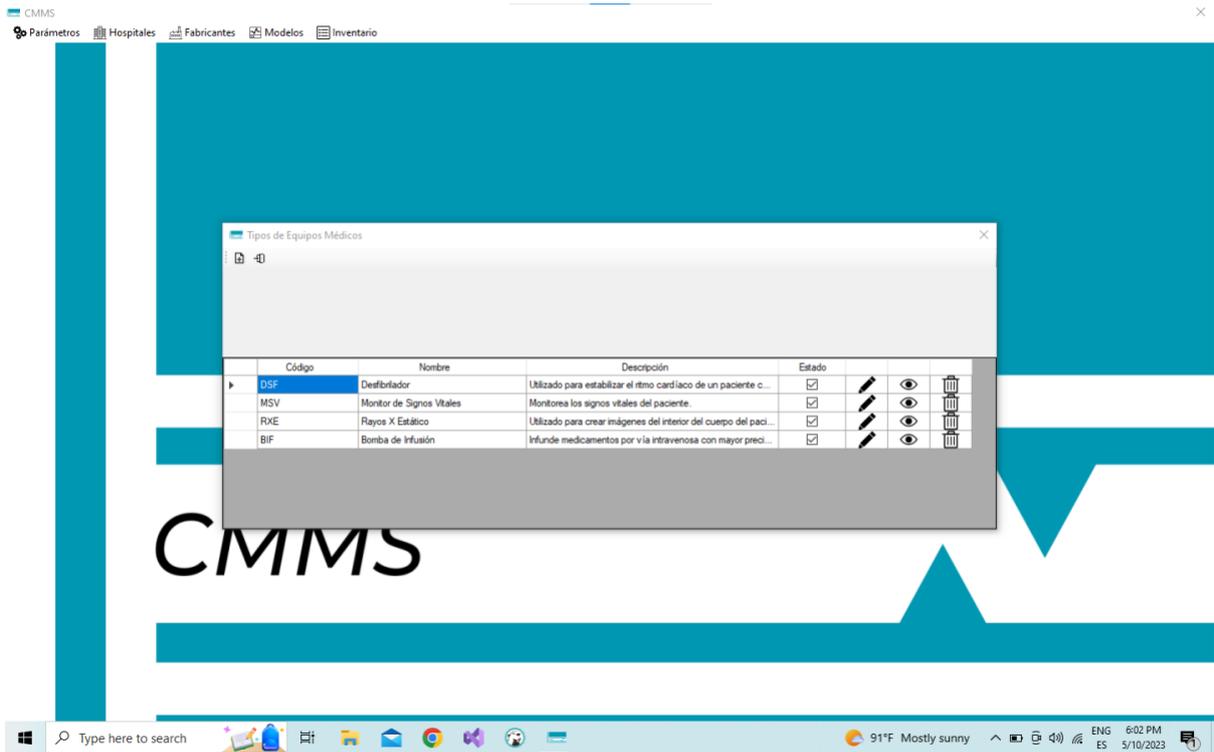


Figura 33 - Pantalla de Módulo de Tipos de Equipos

Fuente: Elaboración propia (2023).

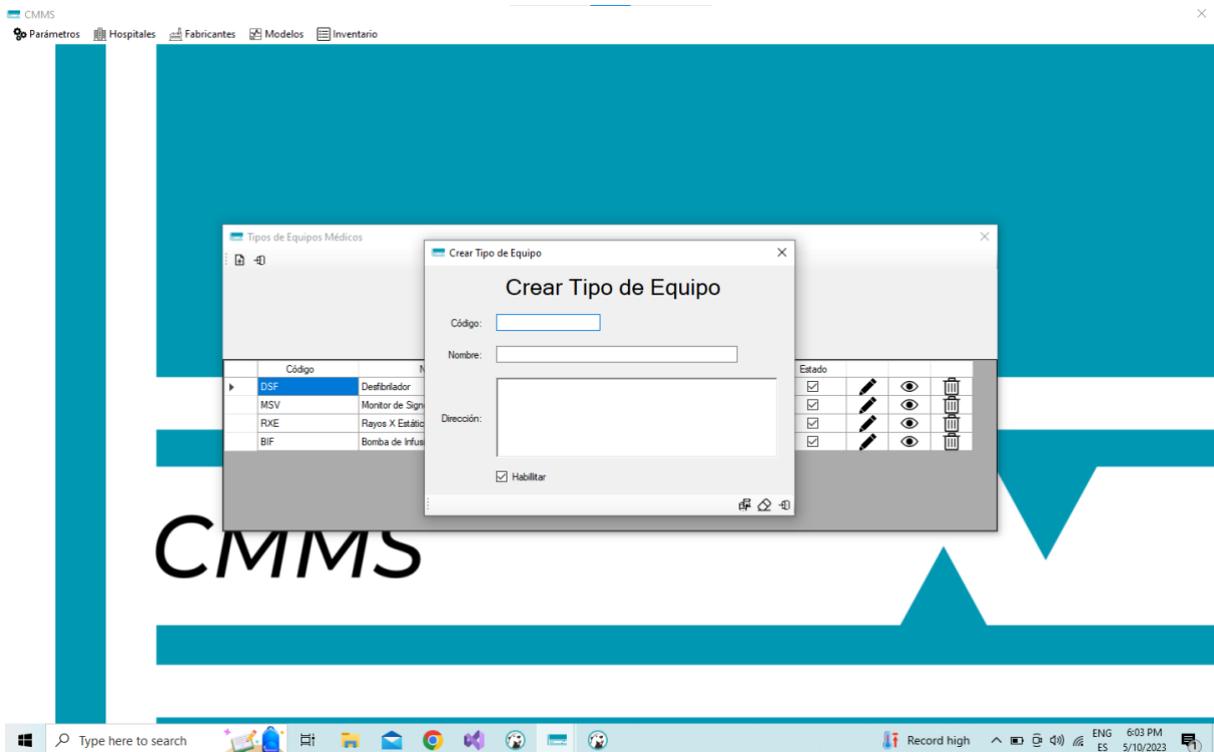


Figura 34 - Pantalla de Creación de Registro (Create)

Fuente: Elaboración propia (2023).

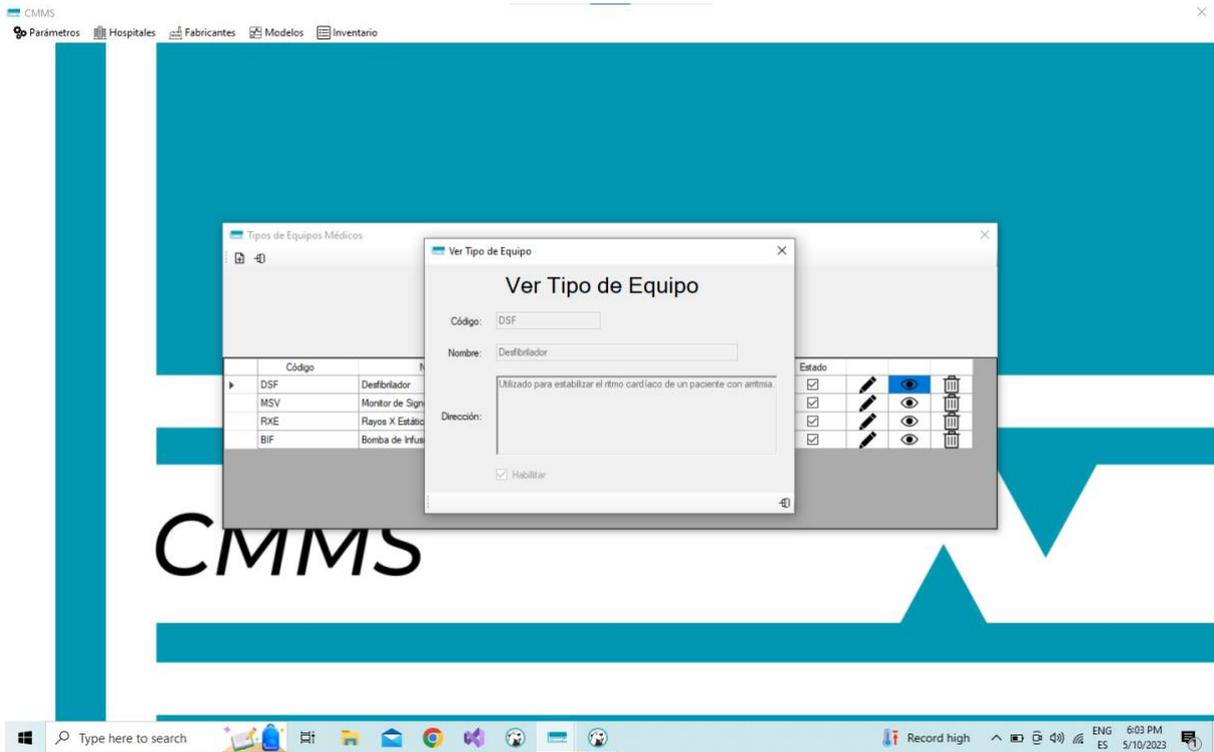


Figura 35 - Pantalla de Lectura de Registro (Read)

Fuente: Elaboración propia (2023).

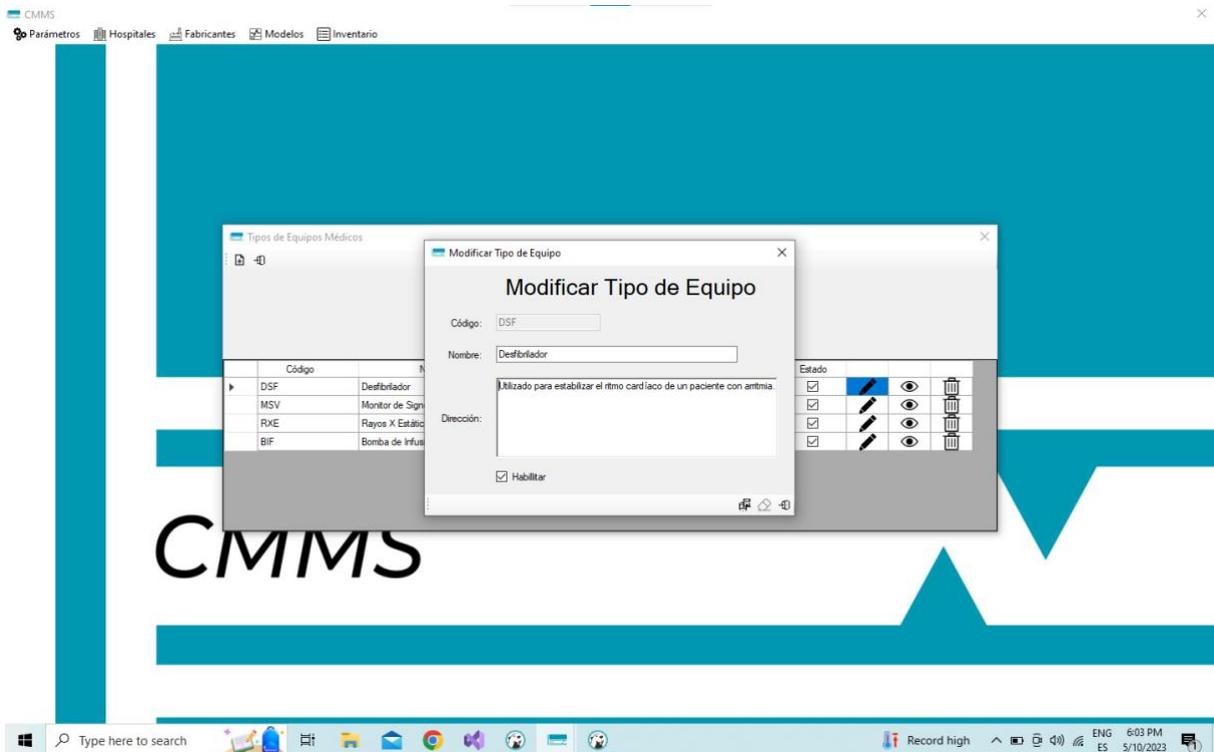


Figura 36 - Pantalla de Edición de Registros (Update)

Fuente: Elaboración propia (2023).

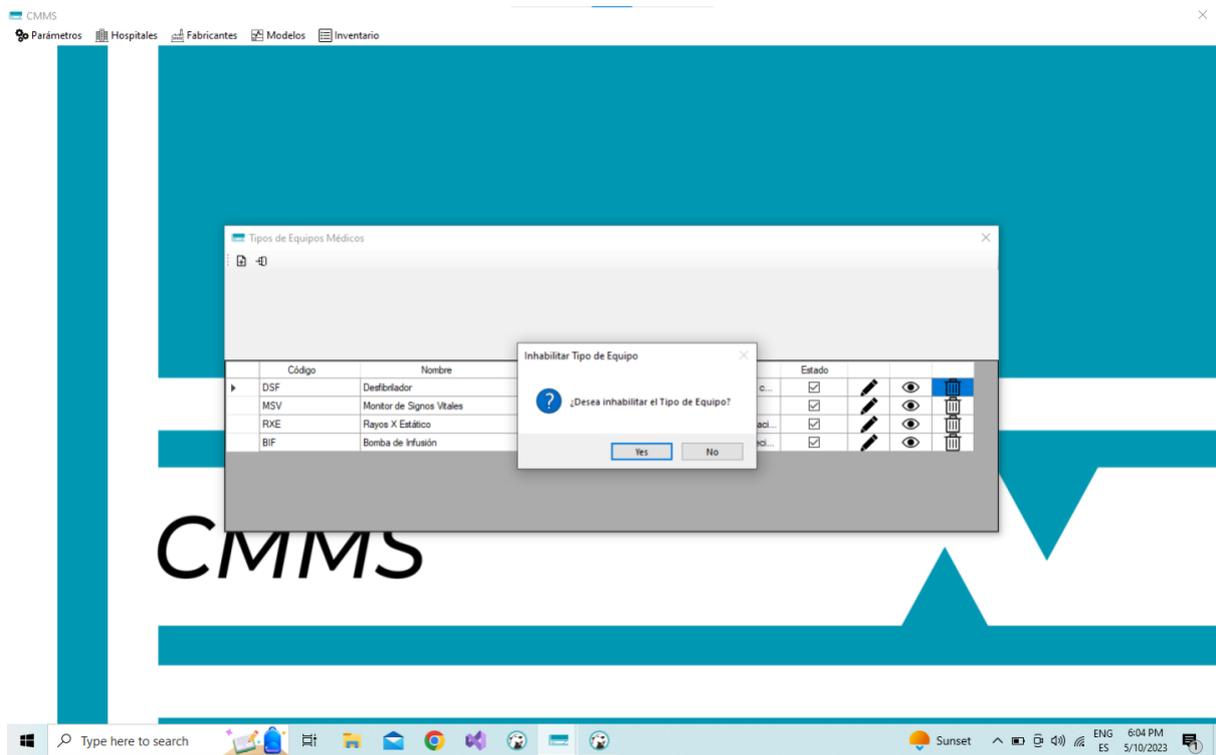


Figura 37 - Pantalla de Eliminación de Registros (Delete)

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXO II – FORMATO DE ORDEN DE TRABAJO, HNMCR

SECRETARÍA DE SALUD

HOSPITAL: MARIO CATARINO RIVAS
MUNICIPIO, DEPARTAMENTO: SAN PEDRO SULA, CORTES

PROPUESTA ORDEN DE TRABAJO

Responsable de la petición: Lic. Dinara Calvez

Fecha: 04-11-22

Sala/Departamento: Pediatría

Habitación / Estancia: Emergencia

Motivo de la Solicitud
Reparación de 2 monitores
1. Se apaga
2. No funciona para conectar SPO2.

Persona de contacto: Ing. Roberto Sanchez

Propuesta de horario: Matutino

Prioridad: Normal Urgente

El equipo funciona: Si No No aplica

Cod. Activo: 1.0989 2.4017833

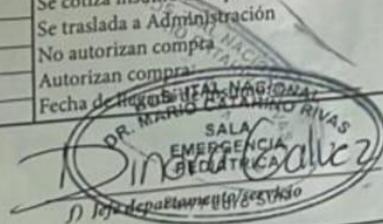
DATOS A RELLENAR SERVICIO DE MANTENIMIENTO

Estado: Rechazada Aceptada Cerrada

N° Orden de Trabajo:

Observaciones

<input type="checkbox"/>	Se trasladó al taller	<input type="checkbox"/>	Reparado
<input type="checkbox"/>	Se cotiza insumo de reparación	<input type="checkbox"/>	Irreparable
<input type="checkbox"/>	Se traslada a Administración	<input type="checkbox"/>	Trámite baja de equipo (informe de baja)
<input type="checkbox"/>	No autorizan compra	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	Autorizan compra	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/>	Fecha de llegada	<input type="checkbox"/>	


N° 034253

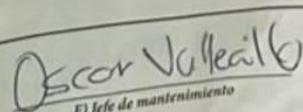

 F) jefe de mantenimiento

Figura 38 - Orden de Trabajo, HNMCR

Fuente: (Hospital Nacional Mario Catarino Rivas, s.f.).

ANEXO III – ENCUESTA APLICADA, FORMATO VISTO POR RESPONDIENTES

← Atrás PC Móvil

Encuesta sobre mantenimiento de equipos médicos y CMMS

Esta encuesta fue diseñada con el objetivo de conocer de mejor manera las necesidades del personal técnico relacionado a las labores de gestión y mantenimiento de tecnología médica en algunos hospitales de Honduras. La información es para uso estrictamente académico, para el desarrollo de un trabajo de tesis en pregrado de Ingeniería Biomédica.

* Obligatorio

1. ¿En qué hospital desempeñó o desempeña actualmente sus funciones? *

- Hospital Escuela
- Hospital Mario Catarino Rivas
- IHSS TGU
- IHSS SPS
- Hospital Leonardo Martínez
- Hospital San Felipe
- Otras

Figura 39 - Encuesta Aplicada a Respondientes

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXO IV – MÉTODO CRUD Y SERVICIOS

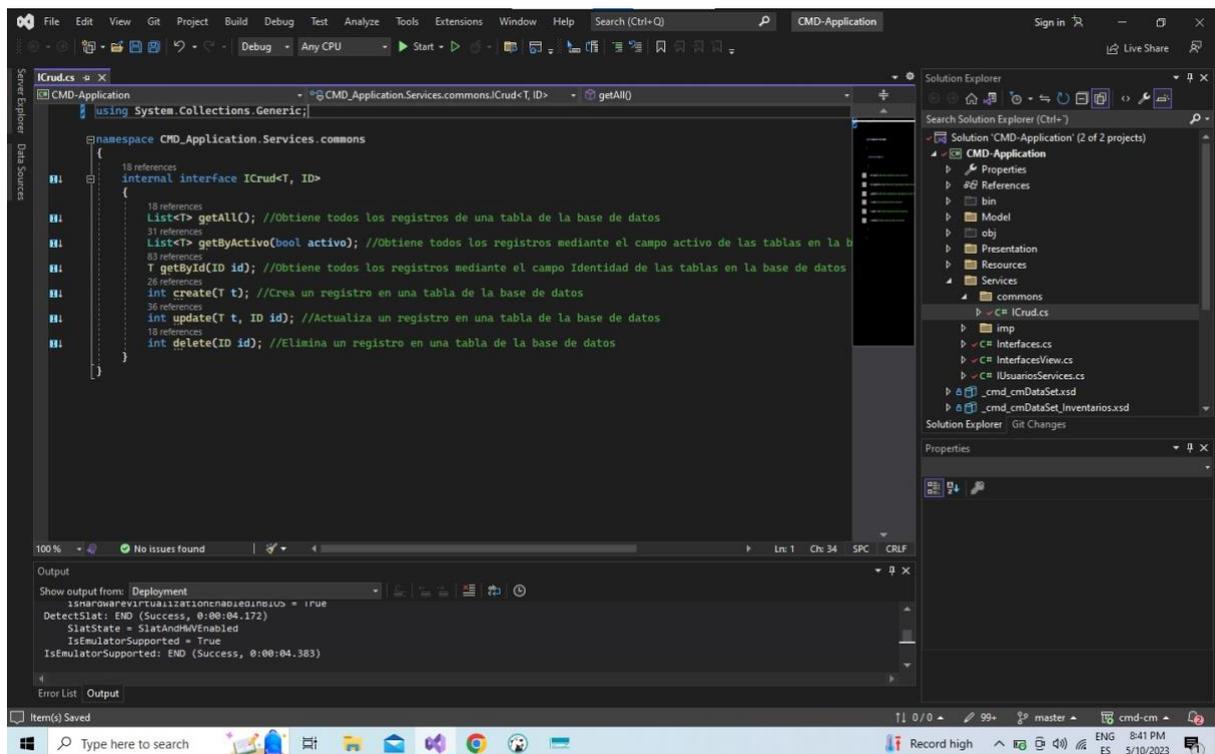


Figura 40 - Método CRUD y Servicios

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXO V – PANTALLA PRINCIPAL, PROTOTIPO CLI

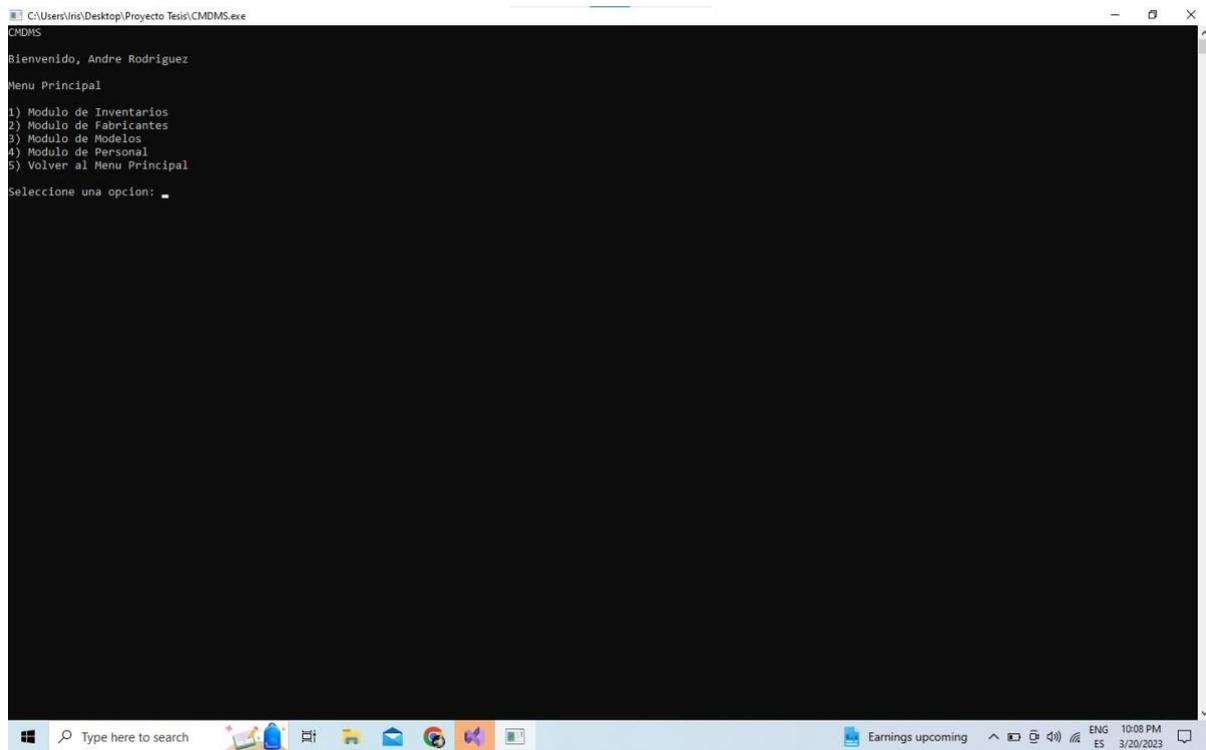


Figura 41 - Pantalla Principal, Prototipo CLI

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXO VI – VISUALIZACIÓN DE BASE DE DATOS EN DBEAVER

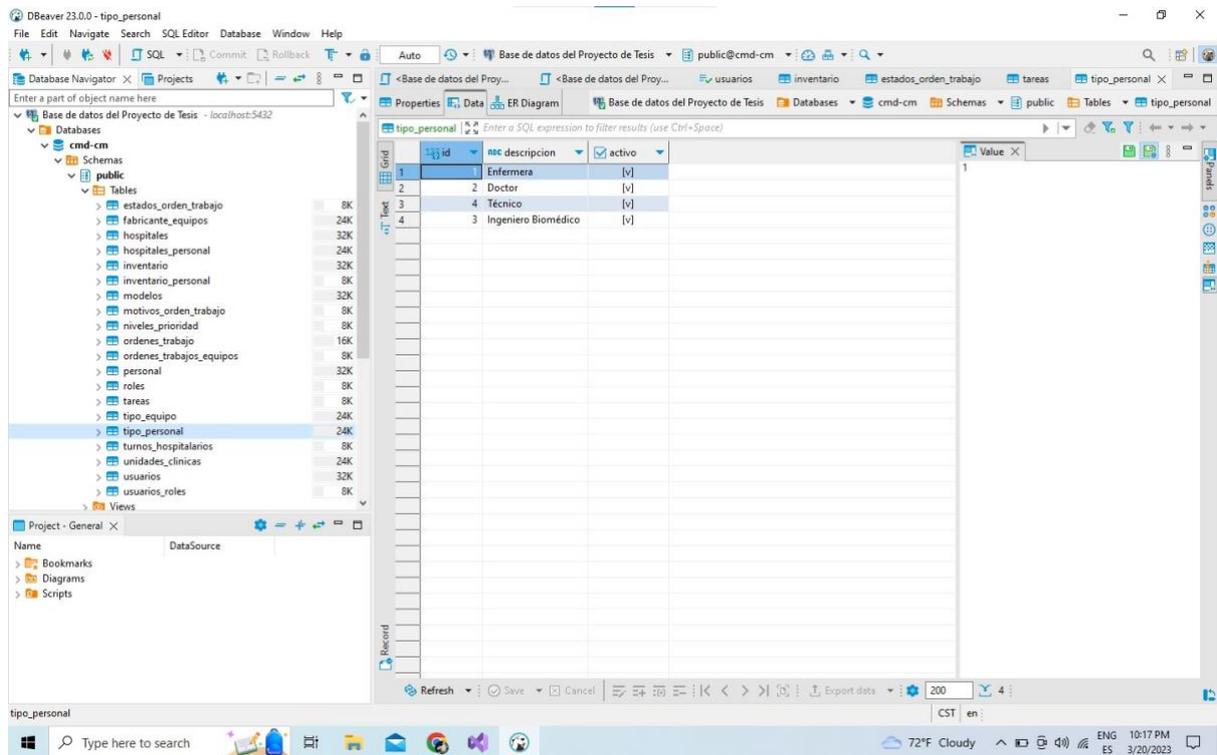


Figura 42 - Visualización de Datos en DBeaver

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXO VII – GRÁFICA DE VALOR (%) DE FUNCIONES DE UN CMMS

Las etiquetas en el eje X corresponden a las siguientes funciones:

1. Fn. N1 – Gestión de MPP.
2. Fn. N2 – Gestión de OTs.
3. Fn. N3 – Gestión de inventario de refacciones
4. Fn. N4 – Rastreo, asignación y gestión de equipos médicos en unidades clínicas.
5. Fn. N5 – Gestión de personal de unidad de Ingeniería Clínica.
6. Fn. N6 – Historial de mantenimientos.
7. Fn. N7 – Generación de reportes financieros.
8. Fn. N8 – Generación de reportes de rendimiento.
9. Fn. N9 – Registro de fabricantes y vendedores de equipos médicos.
10. Fn. N10 – Registro de bajas o descartes de equipos médicos.

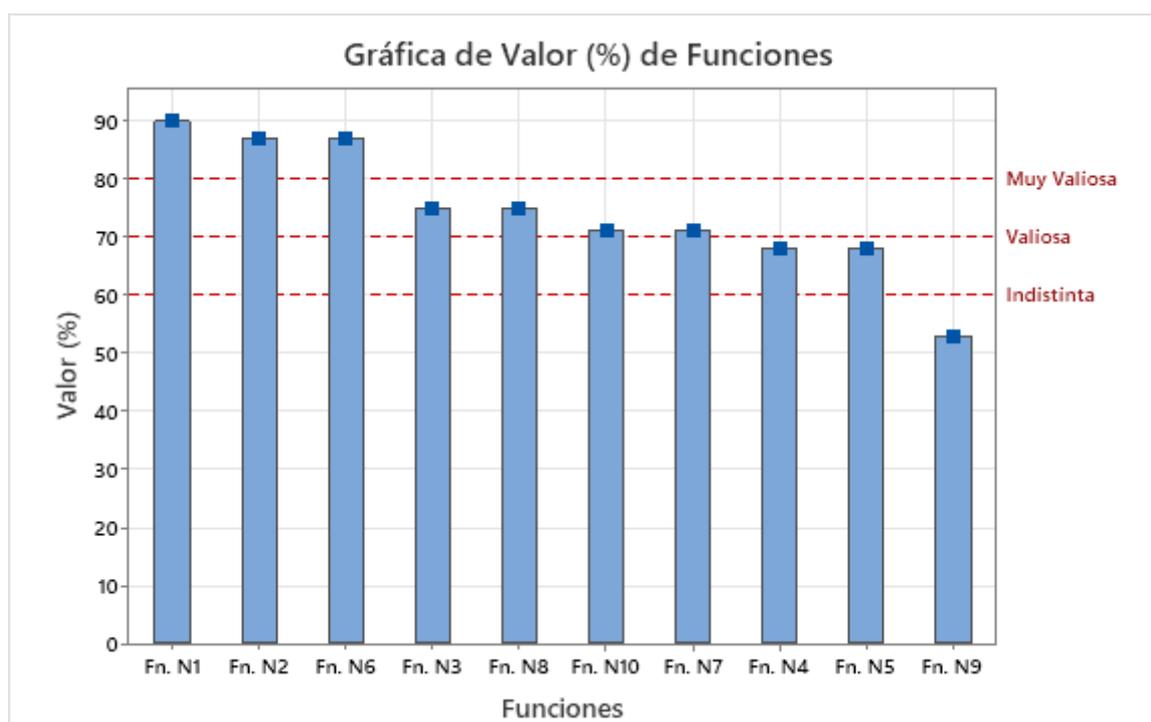


Figura 43 - Gráfica de Valor (%) de Funciones

Fuente: Elaboración propia (2023).

ANEXO VIII – SÍNTESIS DE REFERENCIAS DEL MARCO TEÓRICO

La construcción del marco teórico involucró una gama de distintas literaturas compiladas primariamente de bases de datos indizadas en *Scopus*. Sin embargo, para establecer contenido asociado a conceptos, bases teóricas e información de microentorno y/o legal; se requirió de fuentes fuera de dichas bases de datos.

Las referencias que fueron tomadas de las bases de datos indizadas se consideran como elementos pilares dentro de la construcción de la literatura académica del presente trabajo. Es así, que se desarrolló una matriz que permite visualizar todas las referencias de este tipo con la información básica asociada a cada uno de estos trabajos (Tabla 19).

Tabla 19 - Resumen de Referencias Indizadas en el Marco Teórico

Autor	Región Geográfica	Tipo de Estudio	Referencias Empleadas	Ranking Scopus	Resumen
Rani et al. (2015)	Malasia	Descriptivo	27	N/A*	Estado del Arte acerca de la implementación de estrategias de gestión de mantenimiento en el sistema de salud público y privado de Malasia.
Acevedo et al. (2005)	Chile	Cuasi Experimental	2	Q3	Descripción y diseño de un CMMS para el Hospital Naval Almirante Nef, Viña del Mar, Chile. Detallan la funcionalidad del sistema, pero omiten los fundamentos de diseño.
Salamit & Wahid (2021)	Malasia	Descriptivo	9	N/A	Estudio estadístico sobre el uso e implementación de sistemas CMMS en tres hospitales públicos en Malasia Peninsular.
Nirapai et al. (2018)	Tailandia	Cuasi Experimental	5	N/A**	Descripción y diseño de CMMS para el Hospital de Pathum Thani, Tailandia. Simplifican el CMMS al convertirlo a un CMDMS.
De Lemos (2004)	Estados Unidos	Descriptivo	4	N/A**	Estudio estadístico sobre modos de falla y la planificación de un modelo de mantenimiento preventivo alrededor de los resultados recabados.

Tabla 19 – Resumen de Referencias Indizadas en el Marco Teórico, continuación

Autor	Región Geográfica	Tipo de Estudio	Referencias Empleadas	Ranking Scopus	Resumen
Lie & Chun (1986)	Corea del Sur	Descriptivo	8	Q2	Estado del Arte acerca de las estrategias de mantenimiento correctivo y predictivo que fundamenta la creación de un algoritmo para mantenimiento correctivo.
Baylakoğlu (2021)	Turquía	Explicativo	104	N/A***	Estudio explicativo que expone acerca de los efectos negativos del ingreso de agua a sistemas electrónicos.
Medina et al. (2015)	Cuba	Cuasi Experimental	13	N/A	Descripción y diseño de módulos para un sistema de gestión de mantenimiento para la Universidad Agraria de La Habana, Cuba.

Nota: Elaboración propia con información de los autores citados.

* Revista indexada hasta el 2012, sin información de cuartil.

** Actas de congresos auspiciados por la IEEE.

*** Artículo publicado por Elsevier.