
Innovación en la gestión hospitalaria: optimización de mantenimiento de equipos biomédicos y reducción de costos en hospitales de Guatemala

Héctor Andrés Ortiz Reyes



UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería




**Innovación en la gestión hospitalaria: optimización de
mantenimiento de equipos biomédicos y reducción de costos
en hospitales de Guatemala**

Trabajo de graduación presentado por Héctor Andrés Ortiz Reyes para
optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería Biomédica

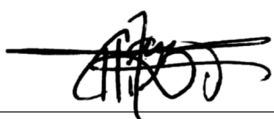
Guatemala,

2025

Vo.Bo.:

(f) 

Dr.-Ing. Jose Leal

(f) 

M.Sc. Carlos Esquit

La motivación para este trabajo de graduación nació de la experiencia como practicante y trabajador dentro del sistema de salud de Guatemala. Durante mi práctica en Servicios Quirúrgicos y Diagnostika Médica S.A., pude observar de cerca la realidad operativa de los equipos médicos en hospitales públicos y privados. Sin embargo, fue mi tiempo en la Liga Nacional contra el Cáncer (INCAN) lo que fundamentó mi propósito. Allí, al presenciar el sacrificio de pacientes que viajan desde lugares tan lejanos, levantándose en la madrugada para recibir un tratamiento, comprendí la dependencia hospitalaria detrás de la tecnología. Esta realidad me motivó a proponer una solución que ayude a los hospitales a evolucionar los procesos obsoletos, como la dependencia de mantenimientos correctivos y el descarte prematuro de equipos por fallos, que generan acumulación y desconfianza en el sistema de salud.

Quiero expresar mi más profunda gratitud a mis padres, a quienes les debo la oportunidad de haber completado esta etapa. Su apoyo incondicional en los buenos y malos momentos, así como su sacrificio para que pudiera continuar, ha sido el mayor de los regalos que un padre le puede dejar a un hijo. Valoro especialmente las lecciones de vida que me brindaron, las cuales han sido fundamentales para formar mi carácter. Agradezco también a mis amigos, quienes convirtieron mi tiempo en la universidad en un segundo hogar. Por compartir las mismas alegrías y desafíos, construimos una hermandad basada en el apoyo mutuo, no solo en lo académico, sino también en lo emocional y personal. A ellos, que les debo muchas cosas por ser mi segunda familia.

En el plano académico, agradezco al Departamento de Ingeniería Biomédica por la confianza y por permitirme enfocar este trabajo en una necesidad de los hospitales del país. Le agradezco al Ing. Carlos Tabarini, cuyo curso de Ingeniería Económica me brindó la oportunidad de colaborar con el personal de Blue Medical y a través de esa iniciativa, agradezco a la Lic. Alejandra Jump, quien fue un enlace fundamental para contactar a todas las sedes, y a todo el equipo de Blue Medical por abrirme sus puertas y compartir generosamente sus experiencias e información. Sobre todo, expreso mi más profundo agradecimiento a mi asesor y supervisor, el Dr. José Andrés Leal. Su tiempo, conocimiento y exigencia académica fueron indispensables para culminar este

proyecto, el cual marca el cierre de una etapa fundamental en mi vida y da comienzo a mi camino como profesional, con el firme propósito de seguir aprendiendo y aportando.

| | |
|---|-------------|
| Prefacio | II |
| Índice de figuras | VI |
| Índice de cuadros | VII |
| Resumen | VIII |
| Abstract | IX |
| 1. Introducción | 1 |
| 2. Antecedentes | 2 |
| 3. Justificación | 4 |
| 4. Objetivos | 6 |
| 4.1. Objetivo general | 6 |
| 4.2. Objetivos específicos | 6 |
| 5. Alcance | 7 |
| 6. Marco teórico | 8 |
| 6.1. Hospitales en Guatemala | 8 |
| 6.2. Mantenimiento hospitalario | 11 |
| 6.3. Sistema de base de datos | 13 |
| 6.4. Programación de interfaz y base de datos digital | 14 |
| 7. Metodología | 17 |
| 7.1. Evaluación de la necesidad | 17 |
| 7.2. Estructura de la base de datos | 18 |
| 7.3. Interfaz gráfica de usuario | 21 |
| 7.4. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUI) | 25 |

| | |
|--|-----------|
| 7.5. Experiencia del usuario | 28 |
| 7.6. Cuestionario final del prototipo para Blue Medical: | 30 |
| 8. Resultados y discusión | 32 |
| 8.1. Base de datos | 34 |
| 8.2. Evaluación del prototipo en un entorno clínico | 51 |
| 9. Conclusiones | 56 |
| 10.Recomendaciones | 58 |
| 11.Bibliografía | 61 |
| 12.Anexos | 64 |

Índice de figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 1. | Pirámide de nivel de atención hospitalaria | 9 |
| 2. | Comparación de equipos con mantenimientos... Adaptado de [15] . . . | 12 |
| 3. | Esquema del funcionamiento de un MVC | 15 |
| 4. | Esquema del funcionamiento de los códigos QR | 16 |
| 5. | Resumen realizado en Microsoft Inc. de cuatro equipos médicos en la sede Américas de Blue Medical Guatemala | 20 |
| 6. | Diagrama de flujo que muestra la arquitectura modular del prototipo TechMed | 22 |
| 7. | Funcionamiento de los códigos QR antes y después de su creación . . | 23 |
| 8. | Proceso de ingreso de notificaciones del módulo calendario y notas . . | 24 |
| 9. | Funcionamiento del ingreso de equipos nuevos en la base de datos . . | 25 |
| 10. | Funcionamiento de uno de los bloques de la lista de proveedores . . . | 26 |
| 11. | Diagrama de flujo del prototipo funcional | 33 |
| 12. | Diagrama de flujo de la base de datos | 34 |
| 13. | Versión final de la base de datos | 35 |
| 14. | Herramientas de la base de datos A. ventana de proveedores, B. ventana de detalles técnicos de los equipos médicos, C. ventana de programación de mantenimientos, D. almacenador de manuales y reportes técnicos . | 38 |
| 15. | Diagrama de flujo del gestor de códigos QR | 40 |
| 16. | Menú interno del gestor de códigos QR | 41 |
| 17. | Versión final del módulo gestor de códigos QR, a. historial de usos de ejemplo | 42 |
| 18. | Ejemplo del código QR y el menú para cada equipo médico | 43 |
| 19. | Diagrama de flujo de la lista de proveedores | 45 |
| 20. | Versión final de lista de proveedores | 46 |
| 21. | Ventanas para cada proveedor, 1. Lista de equipos, 2. Contrato y fecha de actualización de contrato, 3. Información de los proveedores | 47 |
| 22. | Diagrama de flujo de Calendario y Notas | 48 |
| 23. | Versión final de Calendario y Notas | 49 |
| 24. | Diagrama de la comunicación de los módulos con el menú principal . | 50 |

| | | |
|-----|--|----|
| 25. | Menú principal con el gestor de tareas | 51 |
| 26. | Base de datos de equipos médicos de Blue Medical, realizada en una hoja de Excel | 53 |
| 27. | Logotipo del prototipo TechMed y código de almacenamiento del prototipo por medio de MySQL | 54 |

Índice de cuadros

1. Tablas utilizadas en MySQL para almacenar los módulos del prototipo 21

La gestión de equipos biomédicos en Guatemala presenta deficiencias significativas, caracterizadas por un manejo inadecuado de los activos, la ausencia de programas de mantenimiento preventivo y la carencia de herramientas de control administrativo. Esta situación provoca gastos innecesarios y la acumulación de equipos inoperativos, comprometiendo su disponibilidad en momentos críticos. Las prácticas actuales se limitan al mantenimiento correctivo, los cuales son solicitados únicamente durante una falla, y al abandono de equipos que podrían ser recuperados. Aunque estas prácticas reactivas pueden representar un aparente ahorro inmediato, a largo plazo incrementa los riesgos para la seguridad del paciente y genera la pérdida de control sobre el inventario hospitalario.

Para abordar esta problemática, se desarrolló un prototipo de software orientado a la gestión de equipos médicos, diseñado para apoyar al área administrativa de Blue Medical. Esta herramienta integra un calendario para notificar sobre mantenimientos preventivos, correctivos y la actualización de contratos con proveedores, siendo su principal innovación un sistema de seguimiento de procesos mediante códigos QR que registra los retiros y usos de cada equipo para garantizar un control riguroso. El objetivo del proyecto es optimizar el control de activos, reducir la carga de procesos administrativos y analizar si su implementación permitirá reasignar el presupuesto mensual a otras funciones. Con este fin, se realizó una prueba piloto a través de la presentación del prototipo para validar su viabilidad y eficacia como solución de gestión en entornos hospitalarios, tanto públicos como privados.

The management of biomedical equipment in Guatemala presents significant deficiencies, characterized by an inadequate management of assets, the absence of preventive maintenance programs, and the lack of administrative control tools. This situation causes unnecessary expenses and the accumulation of inoperative equipment, compromising its availability at critical moments. Current practices are limited to corrective maintenance, which are requested only during a failure, and to the abandonment of equipment that could be recovered. Although these reactive practices may represent an apparent immediate saving, in the long term it increases the risks to patient safety and generates the loss of control over hospital inventory.

To address this problem, a software prototype was developed, oriented to the management of medical equipment, designed to support the administrative area of Blue Medical. This tool integrates a calendar to notify about preventive and corrective maintenance and the updating of contracts with suppliers, its main innovation being a process tracking system using QR codes that registers the withdrawals and uses of each piece of equipment to guarantee a rigorous control. The objective of the project is to optimize the control of assets, reduce the load of administrative processes, and analyze if its implementation will allow reallocating the monthly budget to other functions. To this end, a pilot test was carried out through the presentation of the prototype to validate its viability and efficacy as a management solution in hospital environments, both public and private.

La gestión de equipos médicos en Guatemala presenta deficiencias significativas caracterizadas por un manejo inadecuado de los activos, la ausencia de programas de mantenimiento preventivo y la carencia de herramientas de control administrativo. Esta situación, limitada debido a la dependencia de los mantenimientos correctivos, provoca gastos innecesarios y compromete la disponibilidad de los equipos en momentos importantes. Este proyecto aborda dicha problemática mediante el desarrollo de un prototipo de software diseñado para optimizar el control de inventarios y romper el ciclo de ineficiencia mediante la automatización de procesos.

Para alcanzar estos objetivos, se implementó una solución tecnológica que integra una base de datos centralizada para registrar el historial de cada equipo, un calendario automatizado que notifica fechas de mantenimiento para prolongar la vida útil de los activos, y un sistema de seguimiento por códigos QR como innovación principal. La construcción del prototipo siguió una metodología estructurada que inició con una fase de diagnóstico mediante entrevistas y análisis de inventario, evolucionando hacia un diseño físico en MySQL. El alcance del trabajo se centró en validar las funcionalidades principales a través de un prototipo funcional para una red de área local (LAN), sin incluir mecanismos complejos de autenticación o implementación clínica definitiva en esta etapa.

En los capítulos 2 y 3 presenta la problemática mediante los antecedentes y la justificación, definiendo los objetivos y el alcance operativo considerando las limitaciones del hospital por medio de los capítulos 4 y 5. Para comprender los conceptos necesarios, el capítulo 6 explica por medio del marco teórico sobre gestión hospitalaria y sistemas de bases de datos, lo cual es esencial para comprender la metodología descrita en el capítulo 7, donde se detalla la construcción de la herramienta. El análisis de la efectividad se presenta en el capítulo 8 a través de los resultados y su discusión, finalizando con los capítulos 9 y 10 los cuales presentan las conclusiones del proyecto y las recomendaciones para futuras mejoras y escalabilidad del software.

El manejo eficiente de equipos biomédicos ha sido identificado como un factor crítico para optimizar recursos en instituciones de salud, especialmente en contextos con presupuestos limitados. En Guatemala, se realizó un estudio en el Hospital Roosevelt en el año 2014, que demostró que la implementación de un área especializada para el mantenimiento interno redujo significativamente los costos operativos, permitiendo la reasignación de fondos a áreas prioritarias como infraestructura y adquisición de insumos [1]. Sin embargo, se identificó que la dependencia de proveedores externos y la compra de repuestos en el extranjero generaron gastos elevados, lo que limitó la eficiencia financiera del hospital [1].

La falta de mantenimiento preventivo ha sido asociada con consecuencias graves en diversos países. En Venezuela, por ejemplo, "se reportó que el 70% de los quirófanos y el 100% de los equipos de imagenología estuvieron inoperativos debido a la falta de mantenimiento adecuado"[2, parr. 3]. Además, se observó que la escasez de insumos médicos limitó el uso de equipos esenciales, como los de endoscopia, y se registraron problemas como la falta de agua y apagones frecuentes en los hospitales. De esta manera, la literatura académica corrobora que una gestión deficiente del mantenimiento, incluyendo la falta de acciones preventivas y una calibración incorrecta del equipo, conduce directamente al aumento de los costos y a un deterioro en la calidad de la atención sanitaria [3, 4].

En Guatemala, se han establecido normativas para regular el mantenimiento de equipos médicos, como el Acuerdo Gubernativo 258-98, que estableció lineamientos para equipos de radiación ionizante, y el Decreto 27-2003 enfatizó la protección de niños y adolescentes en áreas pediátricas [5]. Sin embargo, no se ha clarificado la obligatoriedad de implementar programas de mantenimiento preventivo y correctivo de manera sistemática, lo que ha generado vacíos en la gestión de recursos hospitalarios [5].

A nivel internacional, la respuesta a estos desafíos ha sido consolidado en la gestión

de tecnología de la salud (HTM) como una disciplina formal. Este enfoque va más allá de simplemente proporcionar un servicio de mantenimiento; incluye la gestión del ciclo de vida completo del equipo que incorpora la planificación, adquisición, capacitación del personal, monitoreo del rendimiento y desmantelamiento seguro. En este sentido, las directrices de organizaciones globales demuestran que una gestión integral es fundamental para garantizar retornos sostenibles, seguros y rentables de las inversiones en tecnología de la salud, evitando al mismo tiempo fallos operativos [6]. Este capítulo explica la relación del proyecto con trabajos anteriores. Por lo tanto, se presenta qué se ha hecho antes. Solo se incluyen y citan los trabajos relacionados directamente con el objeto de estudio.

La carencia de infraestructuras hospitalarias de Guatemala representa un problema que impacta negativamente tanto al sector público como al privado, restringiendo el acceso de la población a servicios médicos de calidad. El país cuenta con menos de cincuenta hospitales públicos. . . según ciertos informes del año 2022 – 2023, en donde gran parte de ellos funcionan con instalaciones obsoletas y equipamiento insuficiente debido a décadas de inversión insuficiente [7]. Se evidencia que más del 50 % de la red hospitalaria fue construida con más de 30 años, lo que demuestra una gran cantidad de equipos con desactualizaciones y versiones antiguas en pésimas condiciones, limitando la capacidad de respuesta del sistema ante las crecientes demandas sanitarias. Esta situación empeora al considerar la falta de transparencia en la gestión gubernamental, ya que la asignación inadecuada de presupuestos para mantenimiento y actualización tecnológica ha provocado estas deficiencias en los equipos [8, p. 16].

Debido a la inversión insuficiente en infraestructura, no solo compromete la calidad del servicio ciudadano, sino que también afecta la eficiencia del sistema de salud. La modernización de las instalaciones son una necesidad muy importante para garantizar una atención médica eficiente y de alta calidad. Este problema adquiere mayor relevancia al analizar la importancia de los equipos médicos especializados, cuyo funcionamiento óptimo es crucial para muchos de los procesos de signos vitales. Con ello, la organización mundial de la salud destaca la necesidad de seguir protocolos rigurosos para prevenir los riesgos del uso de equipos médicos descalibrados o con fallas, y prevenir incidentes que pongan en peligro la seguridad del paciente y del operador. No obstante, en el contexto guatemalteco, la falta de protocolos de mantenimiento y la escasa capacitación del personal elevan la probabilidad de fallos críticos, generando un círculo vicioso que compromete tanto la seguridad de los pacientes como la sostenibilidad financiera del sistema.

Una gestión óptima de los equipos médicos exige un cambio de enfoque que combine capacitación, acceso a manuales técnicos y la intervención profesional especializada.

Este modelo ideal contrasta con la realidad de Guatemala, donde los hospitales a menudo dependen de proveedores externos para el mantenimiento, una práctica que no siempre es sostenible y que requiere protocolos rigurosos para evitar riesgos [6]. Es común que las instituciones almacenen equipos defectuosos en lugar de repararlos, algo que se puede entender ya que, al guardar estos equipos, a corto plazo no representa ninguna clase de inversión de activos, lo que vincula directamente con el desgaste generalizado de la red pública [9]. En este caso al estar en algunas de las sedes de Blue Medical, se observa una gran diferencia a comparación de algunos hospitales públicos, pero que comparten algunos problemas relacionados con el control de mantenimientos que se deben de realizar mensual o semestralmente. A pesar de contar con personal capacitado, hay ciertos desafíos sistémicos que se pueden prevenir como el protocolo que se lleva a cabo cuando uno de los equipos reporta alguna falla, ya que es común que dentro del hospital se espere que el equipo tenga alguna falla para que empiece el proceso de retirar y brindar mantenimiento al equipo, sin embargo este sistema tiene demasiados fallos, ya que al esperar a que los equipos reporten alguna falla, el personal se arriesga a perder un equipo durante un proceso importante, y a largo plazo puede arruinar el tiempo de vida de la mayoría de los equipos, volviéndose cargas económicas que se podrían evitar si se realizaran mantenimientos preventivos semestralmente para evitar estos defectos, de la misma forma poder predecir cuando un equipo pueda reportar alguna falla para poder contactar con los técnicos de una manera mas eficaz en vez de esperar el fallo de equipos que pueden costar miles de dólares por algún componente dañado.

Para abordar esta problemática, se propone es el desarrollo de una aplicación diseñada para optimizar la gestión de equipos médicos de las sedes de Blue Medical, en donde el sistema permitirá recopilar y organizar la información de cada equipo por número de serie y tipo de mantenimiento según su estado (en uso o almacenado) para predecir los momentos óptimos para realizar cualquier mantenimiento de manera simultánea. Dicha plataforma se complementará con la digitalización y organización de los reportes técnicos, lo que facilitará un seguimiento sistemático de las intervenciones. La aplicación también contará con un almacenamiento de información adicional para que los administradores puedan reportar si el malfuncionamiento de algunos equipos, los cuales podrían ser a la falta de mantenimiento, averías en componentes o daños irreparables. Esto generará informes detallados para la administración, facilitando la toma de decisiones fundamentadas sobre la sustitución de equipos y la reducción de costos al poder mandar varios equipos de manera simultánea en vez de mandar un equipo al día. La relevancia de esta propuesta tecnológica radica en su capacidad para superar las limitaciones de los métodos manuales, los cuales son propensos a errores humanos como no tener en cuenta quiénes son los proveedores que revisan algún modelo de equipo en específico o la complejidad de tener un seguimiento de los equipos en funcionamiento, incrementando el riesgo para la integridad de los equipos y la seguridad del paciente.

4.1. Objetivo general

Desarrollar e implementar un prototipo de gestión para el control, mantenimiento y seguimiento de equipos médicos. Este sistema busca que ayude a optimizar la planificación de mantenimientos, mejorar el control del inventario y retiro de equipos.

4.2. Objetivos específicos

- Implementar un prototipo de base de datos centralizada que registre individualmente cada equipo médico, incluyendo información identificativa, especificaciones técnicas y almacenar su historial de mantenimientos realizados durante su ciclo de vida.
- Integrar un sistema de calendario automatizado que notifique las fechas programadas para mantenimiento preventivo y correctivo, prolongando la vida útil de los equipos y evitar su inmovilización o retiro innecesario.
- Optimizar el control de inventario y mantenimiento mediante análisis de datos que ayude a cuantificar el ahorro anual derivado de una gestión eficiente, facilitando la reasignación de recursos hacia la adquisición estratégica de equipos.
- Evaluar el impacto operativo del sistema en los procesos del hospital, identificando oportunidades de mejora continua, factores de optimización para el equipo técnico y posibles retrasos en los flujos de trabajo.

El presente proyecto se centra en el desarrollo de un prototipo de software para la gestión y el seguimiento de equipos médicos en un entorno hospitalario. El sistema integra funcionalidades para el almacenamiento de inventario, la programación de mantenimientos, la administración de proveedores y el seguimiento de uso mediante la generación de códigos QR.

La delimitación de este trabajo se enfoca en la funcionalidad del prototipo como herramienta para la gestión de mantenimientos de activos médicos. El sistema incluye módulos diseñados para registrar fallas de equipos y monitorear los tiempos de respuesta del personal hospitalario. El diseño de estas funcionalidades se basará en los requerimientos identificados durante el análisis de los procesos de gestión de fallos existentes. La validación del prototipo se limitó a pruebas de funcionalidad y a una evaluación mediante un cuestionario estructurado, sin incluir una implementación en un entorno clínico real.

El alcance del proyecto presenta las siguientes delimitaciones técnicas. Primero, el almacenamiento de datos se implementó exclusivamente en una red de área local (LAN). No se contempla el desarrollo de una infraestructura de servidor o almacenamiento en la nube. Segundo, el prototipo no incluye mecanismos de seguridad como la autenticación de usuarios mediante contraseñas o perfiles con distintos niveles de acceso. Finalmente, la funcionalidad de los códigos QR se validó con una interfaz de prueba que utiliza enlaces de acceso público, por lo que la implementación de protocolos de encriptación para su uso en un entorno clínico real queda fuera de los límites de este trabajo.

En resumen, el presente trabajo entrega un prototipo funcional para la gestión de equipos médicos, y con ello, los resultados presentados permitirán evaluar la utilidad de la arquitectura de software propuesta y la interfaz en un entorno controlado. Este estudio sienta las bases para futuros desarrollos que podrían incluir la implementación en entornos clínicos y la integración de módulos de seguridad avanzados.

6.1. Hospitales en Guatemala

La red hospitalaria guatemalteca presenta una estructura compleja con deficiencias significativas. Datos históricos y reportes indican que la red está compuesta por 43 a 46 hospitales, clasificados en niveles que van desde distritales hasta de especialidades. Sin embargo, esta infraestructura es insuficiente para las necesidades de la población, lo que se evidencia en un indicador de apenas 6 camas por cada 10,000 habitantes, lo que posiciona al país con una de las capacidades de internación más bajas de la región [10]. Esta carencia estructural se agrava por una distribución desigual de los recursos, lo cual limita severamente el acceso a la atención médica para una gran parte de la población.

La infraestructura sanitaria sufre de deficiencias crónicas tanto en cantidad como en calidad. Un análisis institucional revela que más del 35 % de los sectores del país carecen de cualquier tipo de infraestructura de salud; la red hospitalaria, en particular, presenta problemas en la calidad de las obras [11]. Durante la pandemia de COVID-19, se habilitaron cinco hospitales temporales, los cuales enfrentaron demoras sustanciales y dificultades para cumplir con los estándares de funcionamiento [10]. Adicionalmente, la distribución del personal médico es inequitativa: el 73 % de los médicos se concentra en el departamento de Guatemala, dejando al resto del país con una cobertura precaria [10].

Actualmente, los hospitales de Guatemala operan bajo una sobrecarga constante debido a las debilidades del primer nivel de atención [11]. La falta de una atención primaria en salud (APS) resolutiva y con base territorial provoca que los hospitales se ocupen en atender casos que se podrían resolver en otros puntos de la red impidiendo que cumplan su función de ofrecer cuidados especializados de alta densidad tecnológica [11]. Esta situación es consecuencia directa de la falta de inversión en

infraestructura y de un modelo de atención que no logra contener la demanda en los niveles más básicos, generando itinerarios terapéuticos desordenados y muy poco eficaces para los pacientes [12].

6.1.1. Organización del sistema de salud de Guatemala

El sistema de salud de Guatemala se caracteriza por su fragmentación y segmentación, estando compuesto por un sector público y uno privado [10]. El sector público, liderado por el Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social (MSPAS) como ente rector, cubre aproximadamente al 70% de la población [10]. Este sector también incluye al Instituto Guatemalteco de Seguridad Social (IGSS), que brinda cobertura a cerca del 18% de la población afiliada, y a la sanidad militar [10]. Una de las fallas organizacionales más evidentes es la falta de coordinación y enlaces funcionales entre los subsistemas del MSPAS y el IGSS, los cuales operan de manera separada con redes de servicios propias y sin una articulación efectiva [10].

La estructura del sistema se organiza formalmente en 3 niveles de atención (Figura 1). El primer nivel está conformado por puestos y centros comunitarios de salud, el segundo incluye centros de salud y hospitales generales, y el tercer nivel está compuesto por hospitales de referencia nacional [10]. Sin embargo, esta estructura ha sido moldeada por múltiples reformas de carácter aditivo y parcial, caracterizadas por la discontinuidad en su implementación [11]. Esto ha resultado en una falta de mecanismos de continuidad definidos entre los niveles, donde la atención ocurre mayormente por demanda espontánea en lugar de seguir un flujo organizado en red [11].

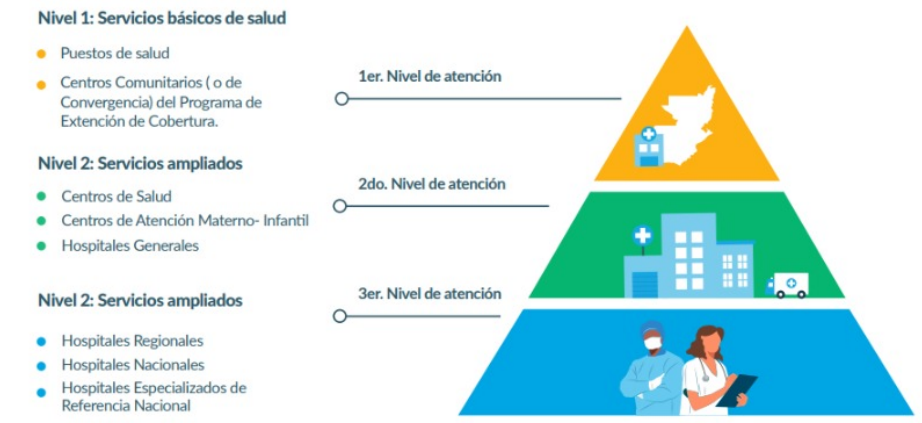


Figura 1. Pirámide de nivel de atención hospitalaria [10]

La capacidad institucional del MSPAS para organizar el sistema es débil y se basa en un enfoque histórico biomédico-hegemónico y hospitalocéntrico [11]. Esta baja capacidad se refleja en la escasa participación del subsector comunitario, la falta de una cultura de evaluación y, notablemente, la ausencia de una sala situacional estandarizada en muchos hospitales, un instrumento clave para el análisis y la planificación en salud que no se aplica de manera uniforme [12]. En conjunto, estas debilidades orga-

nizativas impiden que el MSPAS actúe eficazmente como el ente rector que debería ser [11].

6.1.2. Métodos de financiamiento

El financiamiento del sistema de salud guatemalteco es precario y altamente dependiente del gasto privado, lo que genera profundas inequidades [10]. El gasto público en salud ha sido históricamente ineficiente, promediando apenas un 1.29 % del PIB entre 2008 y 2021 [11]. En comparación, el gasto total en salud asciende a un 7.1 % del PIB, pero un 62.1 % de este corresponde a gasto privado, del cual el 90 % es gasto de bolsillo [10]. Esto posiciona a Guatemala como el país de América Latina con mayor dependencia del pago directo de los ciudadanos, lo que impone barreras de acceso y puede generar gastos catastróficos para las familias [10].

La gestión del presupuesto público en salud se caracteriza por la inestabilidad y la baja capacidad de ejecución [11]. Los aumentos en el gasto, como el ocurrido durante la pandemia de COVID-19, se realizan mediante modificaciones presupuestarias en lugar de un financiamiento estructural robusto, lo que resulta en una baja confiabilidad [11]. A pesar de estas ampliaciones, la capacidad de ejecución fue limitada, alcanzando un 86.5 % en 2020. Esto demuestra que un aumento financiero no se traduce necesariamente en mayor capacidad de respuesta debido a fallas en la coordinación y la logística, como se evidenció con la pérdida de vacunas debido a fallas en la cadena de distribución [11].

La asignación de recursos financieros dentro del MSPAS refuerza un modelo centrado en la atención hospitalaria: un 32.24 % se concentra en los hospitales nacionales, mientras que solo una cuarta parte se destina a la APS [11]. Esta distribución, junto con la práctica de pagos informales por parte de los usuarios para cubrir insumos en servicios públicos, evidencia una capacidad institucional financiera limitada que no solo falla en garantizar el derecho a la salud, sino que también refuerza las desigualdades sociales [11].

6.1.3. Falta de protocolos estandarizados

La ausencia de protocolos estandarizados es una debilidad crítica que afecta a todo el sistema de salud de Guatemala [12]. Un ejemplo claro es la carencia de un formato normativo para el análisis institucional a nivel hospitalario. La sala situacional, una herramienta diseñada para el análisis de información en salud se implementa de manera inconsistente en la red hospitalaria: en algunos hospitales está ausente, en otros no se actualiza y en pocos se utiliza para un análisis estadístico real [12]. Esta falta de estandarización en la recolección y análisis de datos impide la planificación basada en evidencia y el fortalecimiento de una cultura de evaluación.

A nivel operativo, la falta de protocolos se manifiesta en la gestión de recursos y en la prestación de servicios [10]. El modelo de atención, afectado por reformas

discontinuas, carece de mecanismos definidos para la referencia y continuidad entre niveles [11]. Los procesos de adquisición pública también carecen de estandarización, como lo demuestran los altos porcentajes de compras anuladas durante emergencias [10]. Asimismo, la capacitación del personal sobre el uso de tecnología biomédica no sigue un plan estructurado, lo que aumenta el riesgo de mal uso de equipos y fallas de diagnóstico, afectando directamente la seguridad del paciente.

Las consecuencias de esta falta de estandarización son un sistema reactivo e ineficiente que perpetúa las desigualdades [12]. En lugar de un modelo preventivo y organizado, el sistema responde a la “demanda espontánea” con un enfoque centrado en el daño [11]. La ausencia de protocolos claros para la atención, la gestión de suministros, la ejecución presupuestaria y la evaluación de desempeño genera itinerarios terapéuticos discontinuos para los pacientes y un uso irracional de los recursos [12]. En última instancia, esta carencia de estandarización limita severamente la capacidad del MSPAS para garantizar el derecho a la salud de manera consistente.

6.2. Mantenimiento hospitalario

6.2.1. Tipos de mantenimiento hospitalario

El mantenimiento hospitalario se puede clasificar en 3 enfoques principales los cuales dependerá según el trabajo que requiera algún equipo:

- El mantenimiento preventivo es un método proactivo que se basa en un calendario de inspecciones y servicios programados para evitar problemas y defectos, aumentando la fiabilidad y la vida útil de los equipos [13, p. 1].
- El mantenimiento correctivo es la estrategia reactiva, donde las reparaciones se realizan solo después de que el equipo haya tenido fallos, lo que genera alto riesgo de seguridad y costos por paradas no planificadas [13, p. 2].
- El mantenimiento predictivo representa el nivel más avanzado a comparación de los anteriores, ya que utilizando datos y tecnología para monitorear el estado del equipo en tiempo real y predecir fallos, permitiendo intervenciones justo en el momento necesario para maximizar la eficiencia.

6.2.2. Impacto del mantenimiento preventivo en la reducción de costos y fallos críticos

Según estudios comparativos en el sector de la ingeniería, aplicables al entorno hospitalario por su dependencia de equipos complejos, puede generar reducciones de costos entre un 20% y 30% [13, p. 3]. Esta optimización económica no solo proviene del ahorro en reparaciones de emergencia, que suelen implicar mayores costos de

mano de obra y piezas, sino también de la capacidad de planificar y presupuestar las intervenciones con antelación.

Mas allá del beneficio financiero, el impacto más significativo del mantenimiento preventivo en los hospitales se observa en la reducción de fallos críticos y la mejora de la seguridad del paciente (Figura 2). Un fallo en un equipo de soporte vital, como un ventilador o una máquina de anestesia, tiene consecuencias directas sobre la vida de los pacientes. De hecho, la literatura académica identifica la gestión deficiente del mantenimiento como un factor clave que contribuye a la ocurrencia de eventos adversos en el entorno clínico. Por lo tanto, la implementación de un programa de mantenimiento preventivo robusto es fundamental para asegurar la confiabilidad y disponibilidad de la tecnología médica, mitigando riesgos y protegiendo directamente la seguridad del paciente [14].

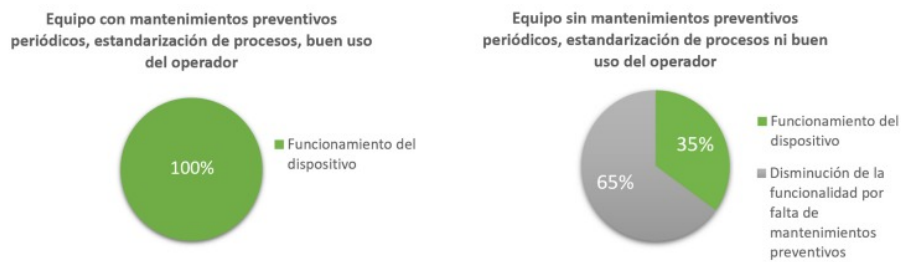


Figura 2. Comparación de equipos con mantenimientos... Adaptado de [15]

En contextos como el guatemalteco, donde los informes de organizaciones como red ciudadana y análisis académicos señalan debilidades institucionales y desfinanciamiento crónico del sistema de salud [10], [11], asegurar la operatividad de los equipos entre un 20% y 30%, permite a los hospitales maximizar sus recursos limitados y garantizar la continuidad de servicios esenciales, evitando paradas no planificadas que pueden colapsar áreas críticas [12].

6.2.3. Análisis de datos para toma de decisiones

La gestión moderna del mantenimiento hospitalario trasciende la simple ejecución de tareas, se fundamenta en el análisis de datos para una toma de decisiones informada y estratégica. La recopilación sistemática de indicadores clave del rendimiento (KPI), como el tiempo medio entre fallos (MTBF), el tiempo medio de reparación (MTTR), los costos del mantenimiento por equipo y las horas de inactividad, permite a los administradores hospitalarios obtener una visión clara del estado de su infraestructura y equipamiento [13]. Este enfoque cuantitativo, transforma el mantenimiento de un centro de costos reactivo a una función estratégica que puede identificar patrones de fallo, evaluar la eficacia de los protocolos actuales y optimizar la asignación de recursos humanos financieros.

6.3. Sistema de base de datos

6.3.1. Bases de datos para inventario médico

Un sistema de base de datos es una herramienta fundamental para almacenar, organizar y gestionar grandes volúmenes de información de manera estructurada y segura. En el entorno hospitalario, los sistemas de bases de datos permiten estructurar y gestionar información crítica relacionada con inventarios médicos [14]. Este enfoque permite centralizar toda la información relevante de los activos tecnológicos de la institución, facilitando un acceso rápido y eficiente que resulta vital para garantizar la continuidad y seguridad de la atención al paciente. Las bases de datos modernas para estos fines suelen implementarse sobre arquitecturas seguras para proteger la integridad y confidencialidad de la información, cumpliendo con las normas sanitarias vigentes.

Llevando a la práctica, este control se materializa en un seguimiento detallado del ciclo de vida y estado operativo de cada dispositivo. A través de un sistema informático especializado, es posible registrar, gestionar y consultar datos críticos como la hoja de vida del equipo, los cronogramas de mantenimiento preventivo [16] y el historial completo de fallas y reparaciones. De esta manera, se elimina la dependencia de registros manuales, se minimiza la probabilidad de errores [17] y se optimiza la eficiencia del personal técnico, permitiendo la generación sistemática de ordenes de trabajo basadas en calendarios de mantenimiento o en fallas reportadas.

6.3.2. Ejemplos exitosos en otros hospitales

La implementación de sistemas de gestión de inventarios está revolucionando las operaciones sanitarias, como lo demuestran varios casos de éxito notables [17]. Soluciones como las ofrecidas por Cardinal Health han permitido a hospitales transformar su cadena de suministro, logrando reasignar tiempo valioso del personal clínico de la gestión de inventarios al cuidado del paciente [18].

Un caso específico es el de Mason District Hospital, donde la implementación del software DxONE Inventory Manager resulto en una reducción del 99% en el tiempo dedicado a la gestión de inventarios, de 7 horas a solo 5 minutos por mes, además de un aumento del 108% en el inventario bajo gestión en tres meses sin carga de trabajo adicional [17]. De manera similar, la Cleveland Clinic reporto una reducción del 30% en costos después de implementar un sistema integral, mientras que Mayo Clinic mejoro su precisión de inventario al 99.5%, reduciendo faltantes del inventario y mejorando la atención al paciente [19].

6.4. Programación de interfaz y base de datos digital

El desarrollo de sistemas de información para la gestión de activos, como el inventario de equipamiento médico, requiere la integración de múltiples disciplinas tecnológicas [20], [21]. La efectividad de una solución de este tipo depende de una base de datos robusta para el almacenamiento de la información, una interfaz de usuario que optimice la interacción humano-computadora, y una arquitectura de software que garantice la comunicación eficiente entre los componentes [19], [22].

6.4.1. Gestión de datos con sistemas relacionados

La administración centralizada de la información de equipamiento médico es un pilar fundamental del sistema [16], [21]. Para ello, se emplean sistemas de gestión de bases de datos relacionales, los cuales organiza los datos en tablas, que consisten en filas (registros) y columnas (atributos). La principal ventaja de este modelo es su capacidad para establecer y mantener relaciones lógicas entre distintas tablas mediante el uso de claves primarias y foráneas, lo cual garantiza la integridad y consistencia de los datos.

Para la interacción con la base de datos, se emplea un lenguaje de consulta estructurada (SQL), un estándar para definir, manipular y consultar datos en un sistema de gestión de bases de datos relacionales. Las entidades principales del sistema se organizan en tablas relacionales para garantizar la consistencia y facilitar las consultas complejas necesarias para la generación de reportes y el seguimiento del ciclo de vida de los equipos [13], [14], [16].

6.4.2. Desarrollo de interfaces gráficas de usuarios (GUI)

Una interfaz gráfica de usuario (GUI) es esencial para que, a la hora de crear cualquier clase de aplicación, los operarios puedan interactuar con los datos de manera visual e intuitiva, eliminando las necesidades de conocimientos técnicos sobre bases de datos o comandos de la consola [20], [21]. El funcionamiento de las GUI modernas se basan en un paradigma de programación dirigida por eventos. En este modelo, el flujo del programa es determinado por acciones del usuario, como pulsaciones con el ratón o de las teclas de la computadora. Además de que la aplicación permanece en un bucle de espera, reaccionando a los eventos a medida que ocurren y ejecutando las rutinas del código cuando se realiza la interacción.

Para la construcción de las interfaces, se utiliza la biblioteca Tkinter, que es el kit de herramientas estándar para GUI en el lenguaje de programación de Python. Su inclusión en la librería asegura una alta portabilidad entre diferentes sistemas operativos sin necesidad de instalar dependencias externas. Además de que la estructura de la aplicación adopta un enfoque de patrón de diseño arquitectónico modelo-vista-controlador (MVC) (Figura 3), el cual desacopla la representación de los datos de la

interacción del usuario, organizando el sistema en tres componentes interconectados por los módulos de la aplicación:

- Modelo: encapsula los datos y la lógica de la aplicación.
- Vista: es la representación visual de los datos, o sea la interfaz del usuario.
- Controlador: actúa como intermediario entre el modelo y la vista, recibiendo las entradas del usuario desde la vista y procesando la petición y ejecutando la lógica correspondiente del modelo, actualizando la vista con nuevos resultados.

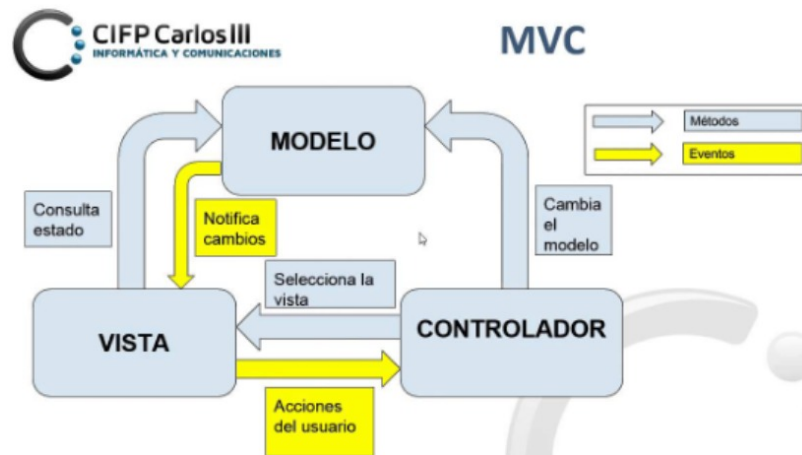


Figura 3. Esquema del funcionamiento de un MVC [23]

6.4.3. Arquitectura de software para aplicaciones de escritorio

Una característica clave del sistema es la capacidad de actualizar el estado de un equipo mediante el escaneo de un código QR con un dispositivo móvil [24]. Para lograr esto, la aplicación del escritorio implementa un servidor HTTP local que escucha peticiones en un puerto específico. El servidor HTTP se ejecuta en un hilo *thread* de ejecución separado del hilo principal de la GUI. El uso de concurrencia mediante hilos es crucial, ya que permite que el servidor atienda peticiones de red de forma continua sin congelar o interrumpir la capacidad de respuesta de la interfaz gráfica para el usuario que la opera directamente.

Cuando un usuario escanea un código QR con su teléfono, el navegador del teléfono realiza una petición a la dirección IP y puerto del ordenador donde se ejecuta la aplicación. La URL contiene parámetros únicos que identifican tanto el equipo como la acción a realizar. El manejador del servidor procesa esta petición, actualiza el estado del equipo en la base de datos y devuelve una página HTML simple como respuesta al cliente para confirmar la operación.

6.4.4. Tecnologías de identificación y seguimiento

Para vincular un activo físico con su registro digital correspondiente de manera rápida y fiable, se utiliza la tecnología de código QR [24]. Un código *quick response* (QR) es un código de barras bidimensional que puede almacenar una cantidad significativamente mayor de información que un código de barras lineal tradicional, incluyendo URL, texto o datos de contacto. Con este proyecto, cada código QR generado codifica una URL única, apuntando directamente al servidor HTTP local implementado en la aplicación de escritorio y contiene un identificador único universal (UUID) como parámetro de consulta (Figura 4).



Figura 4. Esquema del funcionamiento de los códigos QR [25]

El UUID es un número de 128 bits que se asigna a cada registro de QR en el momento de su creación, garantizando que no existan dos códigos idénticos y que cada uno este asociado a un único equipo. El uso de esta tecnología automatiza el proceso de registro de uso o devolución de equipos. Elimina la necesidad de búsquedas manuales en la base de datos o la introducción de números de serie, lo cual reduce la probabilidad de errores humano, agilizando los flujos de trabajo del personal en las distintas sedes del hospital [18], [24].

7.1. Evaluación de la necesidad

Para la fase de diagnóstico, se diseñó y aplicó un instrumento de entrevista, cuyo objetivo fue identificar las deficiencias en el proceso de gestión de equipos médicos. Dicho instrumento se estructuró para evaluar la frecuencia de fallas, los tiempos de respuesta para el mantenimiento correctivo y la ejecución de rutinas de mantenimiento preventivo. Se realizó una entrevista individual de 45 minutos a la Real State And Facilities Leader de Blue Medical. Las respuestas fueron grabadas, transcritas y posteriormente sometidas a un análisis temático para categorizar las fallas recurrentes en los procesos mencionados.

7.1.1. Entrevista

Para comprender las necesidades operativas del hospital, se utilizó un método de entrevistas cualitativas. El objetivo principal fue evaluar los protocolos de trabajo vigentes, en especial los que trabajan actualmente con la gestión de equipos que presentan fallas o que entran en fase de mantenimiento. La selección de los participantes se centró en el personal del área de administración, ya que este departamento es el principal responsable del control y seguimiento del inventario de equipos médicos.

Las entrevistas se realizaron de manera individual y confidencial, buscando crear un entorno adecuado para que los encargados pudieran expresar con franqueza sus opiniones y describir las problemáticas diarias. Se obtuvo el consentimiento informado de cada participante para realizar la grabación de las sesiones, asegurando así una

documentación fiel de sus respuestas. Se empleó una guía de preguntas, lo que permitió explorar en detalle el flujo de trabajo, desde el reporte de una falla hasta su resolución, y las principales dificultades percibidas por el personal. Las preguntas realizadas fueron:

- Nombre y puesto dentro del hospital
- ¿Cuántos años llevan trabajando dentro del hospital?
- ¿Utilizan equipos médicos para su zona de trabajo?
- ¿Han trabajado sin utilizar algún equipo médico, y que tanto ha cambiado utilizar herramientas para realizar algún tratamiento?
- ¿Han tenido que suspender o cancelar algún procedimiento medico debido a fallas en los equipos?
- ¿Han tenido problemas con el tiempo de respuesta para la reparación o reposición de equipos?
- Responda el tiempo y que tanto los afecto la espera
- ¿Considera que existe una falta de organización en el control de los equipos médicos, particularmente en cuanto a su uso y la notificación oportuna de fallas?

7.1.2. Evaluación del inventario inicial

Se realizó un análisis documental del inventario de equipos médicos existente para establecer una línea base del estado de la gestión de activos. Este procedimiento consistió en la revisión de los registros físicos proporcionados por el departamento de administración, a partir de los cuales se recopilaron y evaluaron cinco campos de datos clave para cada activo: el identificador único del equipo, el modelo, la ubicación asignada, la fecha de adquisición y el registro de la última fecha de mantenimiento. El objetivo de este procedimiento fue diagnosticar la integridad, consistencia y completitud de la información registrada, así como identificar la ausencia de protocolos estandarizados para el seguimiento del ciclo de vida de los equipos.

7.2. Estructura de la base de datos

Para el desarrollo del sistema de gestión de activos, se analizó la base de datos que operan una de las sedes de todo Blue Medical. El proceso se dividió en dos fases principales: primero, una etapa de análisis y prototipado para definir la estructura de datos conceptual y segundo, una fase de implementación técnica donde el modelo conceptual fue traducido a un esquema físico utilizando el sistema MySQL.

7.2.1. Creación de la nueva base de datos

A partir de los requerimientos identificados durante las entrevistas y el análisis documental, se procedió con el diseño de la estructura de datos para el inventario de equipos médicos. Esta fase consistió en la definición de un modelo de datos, el cual fue implementado inicialmente en una hoja de Excel para su validación. Se establecieron los atributos esenciales que cada registro de equipo debía contener para garantizar una gestión eficaz. La estructura definida incluyó los siguientes campos:

- Nuevo código
- Sede
- Ubicación
- Equipo
- Marca
- Número de serie
- Inventario
- Elementos que lo conforman
- Repuestos
- Insumos descartables
- Mantenimiento
- Especificación
- Evaluación de condiciones

7.2.2. Diseño prototipo de la base de datos para probar el funcionamiento:

Previo a la implementación formal, se realizó una fase de análisis y prototipado para definir la estructura de datos del sistema (Figura 5). En una etapa inicial, se desarrolló un modelo de datos preliminar utilizando un archivo en formato JSON. Este enfoque permitió identificar y validar las variables esenciales requeridas para la gestión de equipos. Durante esta fase se determinaron las siguientes variables clave para la entidad principal:

- Nombre de equipo
- Sede

- Marca
- Modelo
- Proveedores
- Número de serie
- Funcionamiento
- Fecha de compra
- Tiempo de uso
- Ubicación del equipo
- Inventario
- Elementos que lo conforman
- Repuestos
- Insumos
- Especificaciones técnicas
- Tipo de mantenimiento
- Días restantes mantenimiento
- Estado del equipo
- Manual
- Reportes

EQUIPO MÉDICO BLUE MEDICAL
 FECHA: Mayo 2025
 SEDE: Américas




| NUOVO CÓDIGO | SEDE | UBICACIÓN | EQUIPO | MARCA | SERIE | INVENTARIO | ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN | REPUESTOS | INSUMOS DESCARTABLES | MANTENIMIENTO | ESPECIFICACION | EVALUACION DE CONDICION |
|--------------|----------|------------------|--|-------------|-------|------------|--|--|---|---|-----------------------|-------------------------|
| DOE-01 | Américas | Procedimientos 1 | Dispensador de espejuelos | Welch Allyn | NA | IOEMO-250 | N/A | - Guías para espejuelos - Soporte para montaje en pared - Contenedor de espejuelos - Mecanismo interno del dispensador | Espejuelos: - Universal Klean Spec - Singular Use Specula 4.2 mm (S2434-U) - Universal Klean Spec - Singular Use Specula 2.7 mm (S2432-U) | Proveedor: Jorma Consultar periodicidad de mantenimiento | NI | Buena condición |
| EDD-01 | Américas | Procedimientos 1 | EQUIPO DE DIAGNÓSTICO | Welch Allyn | NA | NI | - OC-01 - ODD-01 - TDP-01 - EA-01 - BEF-01 | - Oftalmoscopio Coaxial - Otoposco de Diagnóstico - iluminador de Garganta - Transformador de Fared - Esfigmomanómetro Anaroida - Brazalete Esfigmomanómetro | Detallado en cada elemento que lo conforma | Proveedor: Jorma Consultar periodicidad de mantenimiento | NI | Buena condición |
| OC-01 | Américas | Procedimientos 1 | Oftalmoscopio Coaxial | Welch Allyn | NA | 0 | N/A | - Lámpara o bombillo reemplazable. - Lente o disco selector de lentes. - Cabezal del oftalmoscopio. | - Espejuelos Auriculares | Proveedor: Jorma Consultar periodicidad de mantenimiento | 3.5 V | Buena condición |
| OOD-01 | Américas | Procedimientos 1 | Otoposco de Diagnóstico - iluminador de Garganta | Welch Allyn | NA | IOEMO-224 | N/A | - Bombillo. - Lente de aumento (si se raya o rompe). - Cabezal otoscópico. | - Espejuelos Auriculares | Prueba general de funcionamiento recomendado: | 3.5 V Modelo: 2000 | Buena condición |

Figura 5. Resumen realizado en Microsoft Inc. de cuatro equipos médicos en la sede Américas de Blue Medical Guatemala

7.2.3. Diseño de la base de datos en MySQL

La transición del prototipo conceptual a la base de datos física se realizó utilizando el sistema gestor Oracle, administrado a través de la interfaz gráfica MySQL Workbench. El diseño de tablas, columnas y relaciones, previamente definido en el archivo JSON, fue traducido a un *script* formal de lenguaje de definición de datos (DDL). Este *script* fue ejecutado directamente en MySQL Workbench para crear de manera automática el esquema *schema* principal de la base de datos y todas las tablas del sistema, como equipos, proveedores y retiro_requests.

Durante esta etapa, se especificaron rigurosamente los tipos de datos para cada columna (VARCHAR, INT, DATETIME), así como las restricciones de integridad de datos (NOT NULL, UNIQUE). Para asegurar la estructura relacional, se establecieron llaves primarias (PRIMARY KEY), algunas con propiedades de autoincremento (AUTO_INCREMENT), para garantizar la identificación única de cada registro. Asimismo, se implementaron llaves foráneas (FOREIGN KEY) con reglas de eliminación en cascada (ON DELETE CASCADE) para mantener la consistencia y la integridad referencial entre las tablas relacionadas. Este procedimiento resultó en una base de datos relacional, estructurada y escalable, lista para ser integrada con la lógica de la aplicación (Cuadro 1).

| Explicación de cada tabla del prototipo | |
|---|---|
| app_config | Comunicación de MySQL y del prototipo |
| calendario_notas | Almacenamiento de las notas del calendario |
| devolution_requests | Mensaje de devolución del equipo |
| equipos | Base de datos principal |
| equipos_proveedores | Orden de los equipos que manejan los proveedores |
| informes_historial | Almacenamiento de los informes en la base de datos |
| maintenance_update_requests | Mensaje de cumplimiento del mantenimiento al menú principal |
| proveedores | Módulo de proveedores |
| provider_devolution_requests | Mensaje de devolución del equipo de parte del proveedor |
| provider_transport_requests | Mensaje de retiro del equipo de parte del proveedor |
| qr_historial | Historial del QR |
| qr_registros | Registro del QR |
| retiro_historial | Tabla de retiro y devolución de los equipos |
| retiro_requests | Mensaje de retiro del equipo |

Cuadro 1. Tablas utilizadas en MySQL para almacenar los módulos del prototipo

7.3. Interfaz gráfica de usuario

Se diseñó y desarrolló una interfaz gráfica de usuario (GUI) para la gestión de los procesos hospitalarios. Dicho desarrollo se centró en implementar funcionalidades para el registro y la modificación de datos, así como procesos dinámicos para la gestión de equipos médicos. A continuación, se describen las herramientas de software utilizadas para su construcción, la arquitectura de la interfaz y los procedimientos seguidos para la implementación de los módulos principales.

7.3.1. Módulos del prototipo y diseño de la interfaz grafica

El desarrollo del prototipo se basó en una arquitectura modular, diseñada para separar las funcionalidades clave del sistema y facilitar su interconexión. Esta estructura permitió organizar la programación dentro del entorno de visual studio y definir un flujo de trabajo claro para el usuario final. La interconexión de estos módulos se implementó mediante una arquitectura centralizada, donde el menú principal actuó como el punto de navegación y la base de datos sirvió como el repositorio común de información para todas las funcionalidades del sistema (Figura 6). El sistema fue estructurado en los siguientes módulos principales, cada uno con una función específica para la gestión de equipos médicos:

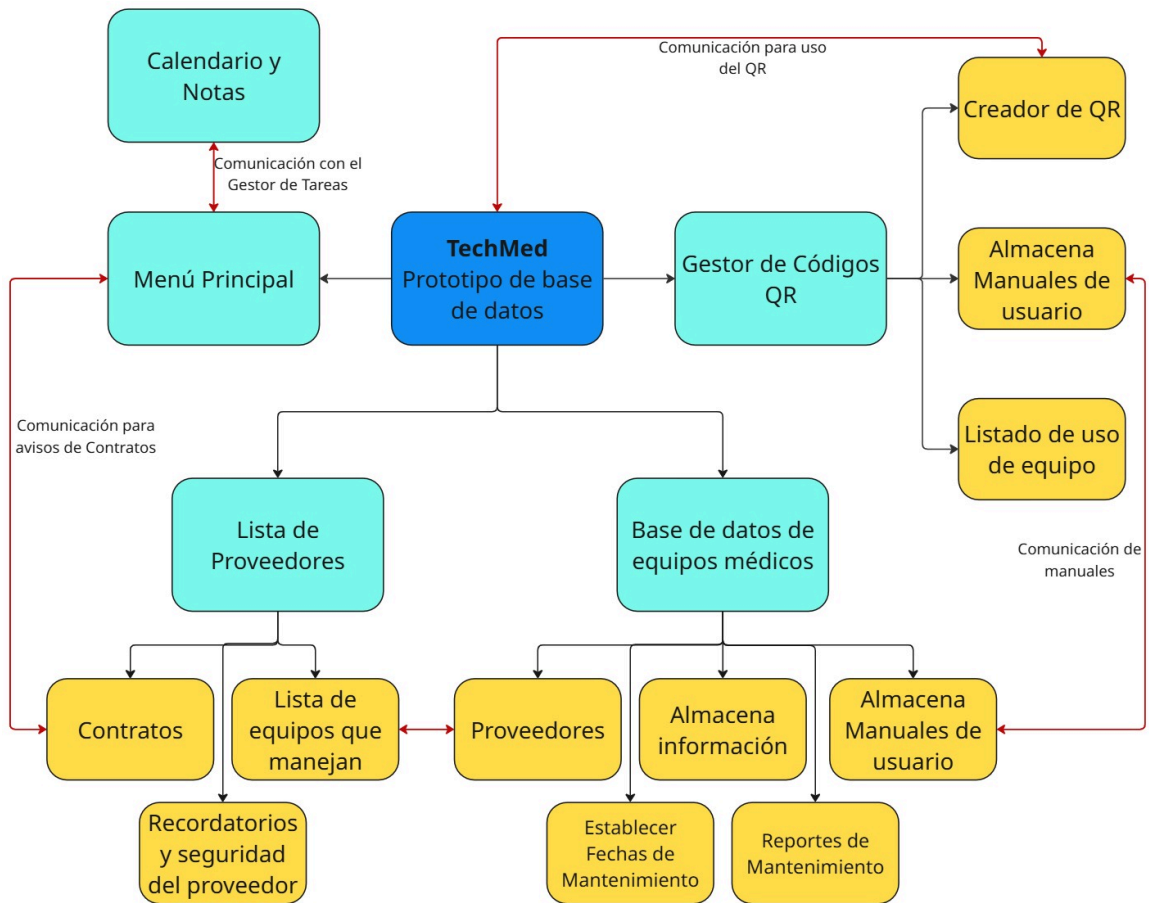


Figura 6. Diagrama de flujo que muestra la arquitectura modular del prototipo TechMed

Gestor de códigos QR

El gestor de códigos QR fue diseñado para la generación y administración de los códigos del sistema. La función principal de este módulo fue vincular cada equipo médico de la base de datos con un código único que, al ser escaneado, les permitirá a los usuarios reportar el estado del dispositivo (en uso, operativo o con fallas) a través

de una interfaz web. Para la creación de cada código, se generó un identificador único universal (UUID) que se incorporó en una URL única, la cual fue codificada en la imagen QR mediante la biblioteca "qrcode" del desarrollador (Figura 7). Esta funcionalidad se implementó para registrar el historial de uso y facilitar la comunicación con proveedores para la gestión de mantenimientos y la creación de reportes.

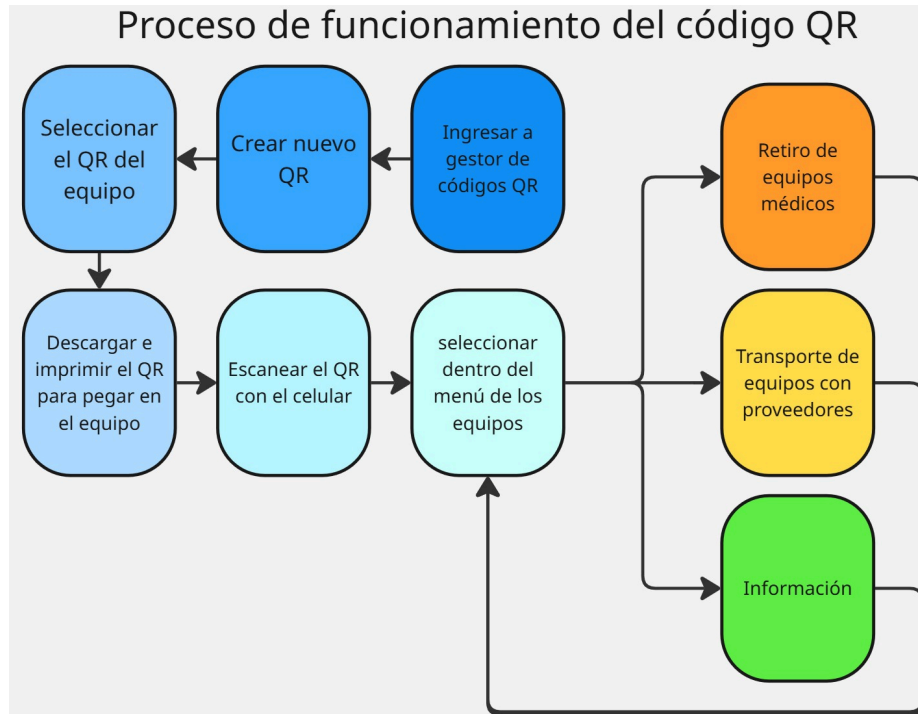


Figura 7. Funcionamiento de los códigos QR antes y después de su creación

Calendario y notas

Se desarrolló un módulo de calendario y notas diseñado para consultar y visualizar de forma centralizada los eventos registrados en la base de datos, tales como fechas de mantenimiento de equipos, vencimientos de contratos de proveedores y notas administrativas. La interfaz fue implementada con la biblioteca Tkinter de Python y se configuró para presentar una vista de calendario mensual. Para facilitar la identificación rápida de eventos, se implementó un sistema de codificación por colores basado en el tipo de notificación. Cada día en el calendario que contenía uno o más eventos se marcó con indicadores visuales distintivos. La clasificación de eventos fue la siguiente:

- Mantenimientos próximos (naranja)
- Mantenimiento del día (amarillo)
- Mantenimiento atrasado (rojo)
- Notas (verde)

- Nota anual (azul)
- Renovación de contrato de proveedores (morado)

Adicionalmente, se incluyó un panel lateral con vistas predefinidas para consultar un resumen de los mantenimientos programados en el mes, las actividades del día actual y los detalles de cualquier fecha seleccionada (Figura 8).

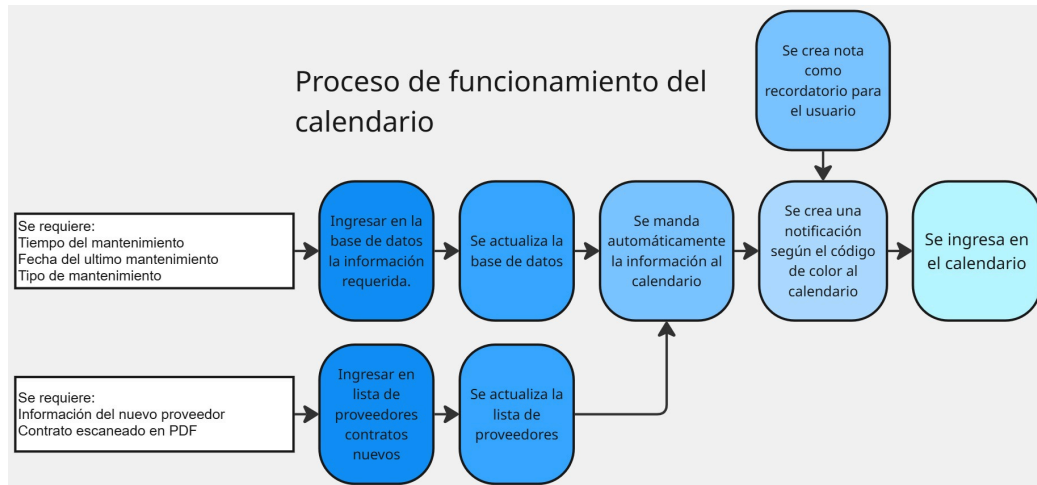


Figura 8. Proceso de ingreso de notificaciones del módulo calendario y notas

Base de datos de equipos médicos

Se implementó el módulo de la base de datos como el componente central del prototipo, diseñado para el almacenamiento, la gestión y la visualización de la información de los dispositivos en la base de datos MySQL (Figura 9). Para asegurar la consistencia de los datos en la aplicación, se utilizaron listas de valores predefinidos (constantes) para campos clave como el “estado_equipo” y el “tipo_mantenimiento”, restringiendo la selección del usuario a opciones válidas antes de su registro en la base de datos.

La interfaz de usuario, desarrollada con la biblioteca Tkinter, fue equipada con herramientas para optimizar la interacción, incluyendo un sistema de filtrado dinámico y controles para gestionar la visibilidad de las columnas. Adicionalmente, se integró una funcionalidad para la gestión documental de manuales y reportes. Mediante la biblioteca pathlib, el sistema gestionó automáticamente una estructura de carpetas estandarizada en el directorio del usuario (TECHMED_Documentos), asociando a cada equipo un repositorio específico para sus archivos PDF y proporcionando acceso directo desde la interfaz.

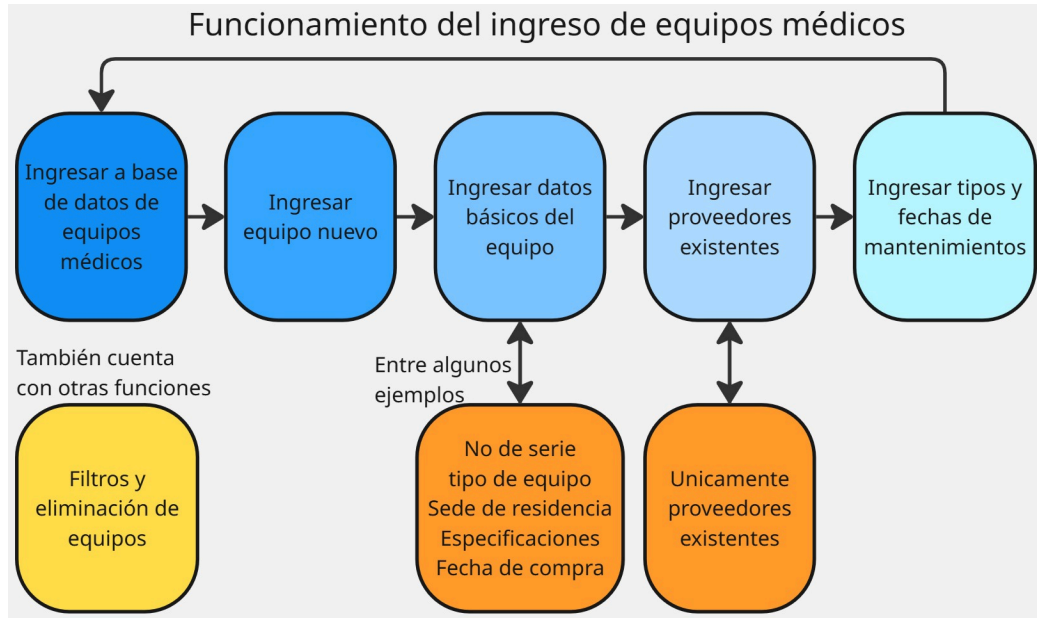


Figura 9. Funcionamiento del ingreso de equipos nuevos en la base de datos

Lista de proveedores

Se diseñó un módulo para la gestión de proveedores, el cual centralizó la información de contacto y administrativa de las empresas responsables del mantenimiento de equipos. La interfaz de usuario se estructuró mediante paneles de información individuales para cada proveedor, los cuales incluían campos para la especialidad y los equipos que manejan.

Adicionalmente, se implementó una funcionalidad para la gestión documental, permitiendo el almacenamiento de los contratos de servicio en formato PDF directamente asociados a cada proveedor. Para garantizar la continuidad operativa y evitar vencimientos inesperados, el sistema incluyó un campo para registrar la fecha de renovación contractual, facilitando su seguimiento y la programación de alertas en el módulo de calendario (Figura 10).

7.4. Desarrollo de la interfaz gráfica de usuario (GUI)

7.4.1. Diseño de la GUI

El diseño de la interfaz gráfica de usuario (GUI) del prototipo se fundamentó en la biblioteca (Tkinter) y sus componentes ttk. Se implementó una estructura de ventana principal que consiste en un panel de navegación lateral y un área de contenido dinámica. Este enfoque de diseño modular se seleccionó para delimitar claramente las funcionalidades del sistema, asignando a cada módulo principal una vista dedicada. El objetivo de esta arquitectura fue proporcionar una navegación intuitiva y un acceso

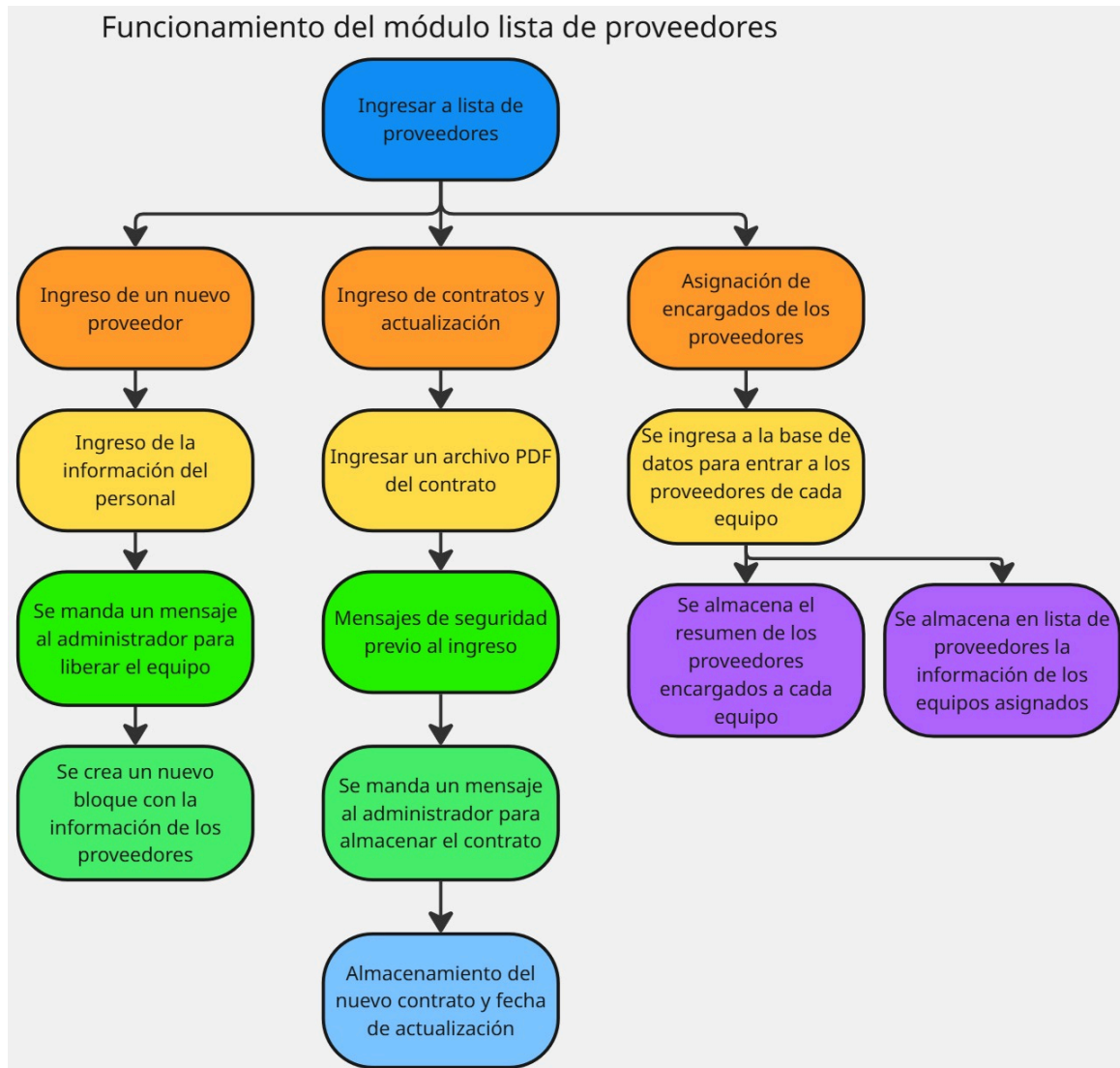


Figura 10. Funcionamiento de uno de los bloques de la lista de proveedores

rápido a las herramientas clave del prototipo, utilizando los *widgets* para construir cada una de las interfaces. A continuación, se detalla la estructura de las vistas más relevantes.

7.4.2. Librerías utilizadas para la programación

Para el desarrollo del prototipo de software, se empleó un entorno de desarrollo basado en el lenguaje de programación Python. Se seleccionó una serie de bibliotecas externas para gestionar el funcionamiento, la interfaz gráfica y la comunicación entre el usuario y la base de datos. La incorporación de estos componentes se realizó mediante el gestor de paquetes pip, lo cual permitió estructurar un sistema modular y eficiente. Las bibliotecas fundamentales utilizadas en el proyecto se describen a continuación:

- **Tkinter:** para la construcción de la totalidad de la interfaz gráfica de usuario (GUI), se utilizó esta biblioteca que forma parte de la librería estándar de Python. Su implementación fue fundamental para proporcionar una vía de interacción directa y visual con todas las funcionalidades del prototipo, incluyendo la visualización de datos, la entrada de información y la navegación entre los distintos módulos del sistema.
- **mysql-connector-python:** la comunicación y persistencia de los datos se gestionó a través de la biblioteca “mysql.connector”, el driver oficial de MySQL para Python. Fue un componente importante, ya que se utilizó para ejecutar todas las operaciones de crear, leer, actualizar y borrar sobre la base de datos de MySQL.
- **Qrcode:** se empleó para la generación de las imágenes de los códigos QR, creando a su vez contenedores de URL únicos apuntando al servidor local del sistema.
- **Pillow (PIL fork):** en conjunto con qrcode y Tkinter para manipular las imágenes QR generadas, permitiendo su visualización directa en la interfaz de la aplicación para su posterior guardado e impresión.
- **http.server y socket:** esta implementa un servidor local que permite procesar solicitudes GET y POST, gestionando las acciones de retiro, devolución y consulta de información de cada código QR.
- **Threading:** fue crucial para el funcionamiento del prototipo, ya que permitió que la aplicación de escritorio permaneciera funcional y receptiva a las acciones del usuario mientras el servidor esperaba y procesaba las solicitudes de la red.
- **Os y Pathlib:** fueron esenciales para interactuar con el sistema de archivos del sistema operativo, en donde se utilizaron para crear y gestionar las estructuras de carpetas donde se almacenan los documentos.
- **Webbrowser:** se empleó para abrir automáticamente las carpetas de documentos o los archivos PDF dentro del prototipo, mejorando la experiencia del usuario.
- **Datetime y Calendar:** estas bibliotecas de la librería estándar de Python fueron necesarias para el manejo de todas las operaciones relacionadas con fechas y tiempo.
- **uuid:** se utilizó para la generación de identificadores únicos universales para cada equipo registrado en el sistema. Esto fue vital para garantizar que cada registro tuviera una clave primaria única e irrepetible, evitando colisiones de datos.
- **cx_Freeze:** para la distribución y empaquetado del prototipo como una aplicación de escritorio ejecutable (.exe) para sistemas Windows, se utilizó la herramienta “cx_Freeze”. Fue fundamental para crear un paquete independiente que incluye el intérprete de Python y todas las bibliotecas.

Componentes de la interfaz grafica

La interfaz gráfica del prototipo fue construida utilizando herramientas *widgets* del módulo “tkinter.ttk” de Python. Estos elementos se seleccionaron para proporcionar una experiencia de usuario clara y funcional, permitiendo la interacción con las distintas funcionalidades del prototipo. Algunas de estas son:

- *Widgets* de Acción:
 - Botón: es el más utilizado en todo el prototipo, en donde se presiona el botón para ejecutar una acción.
- *Widgets* de visualización de datos:
 - Vista de tabla: muestra datos tabulares complejos, como el inventario principal de equipos.
 - Vista de lista: presenta listas de elementos simples para selección, como archivos.
- Contenedores y estructuras:
 - Panel de pestañas: fue utilizado para organizar formularios complejos con múltiples selecciones, como en la ventana de ingreso y edición de equipos.
 - Marco: agrupa y organiza visualmente los demás componentes.
- *Widgets* de entrada de datos:
 - Campo de texto: se utilizó para la entrada de datos de una sola línea, como nombres, modelos o números de serie.
 - Área de texto: se implementó para la entrada de información de múltiples líneas, como descripciones, especificaciones técnicas o contenido de informes.
 - Caja de selección: fue un componente clave para presentar al usuario una lista de opciones predefinidas. Se utilizó para campos como el estado del equipo, tipo de mantenimiento y la selección de fechas.
 - Botón de opción: se utilizó en formularios donde el usuario debía seleccionar una única opción de un conjunto pequeño y mutuamente excluyente.
- *Widgets* de visualización de información:
 - Etiquetas: se utilizó para mostrar texto estático e informativo que no requería interacción del usuario, como títulos de ventanas o etiquetas de cambio.

7.5. Experiencia del usuario

Para la fase de evaluación del prototipo y validar su funcionalidad en un entorno clínico, se diseñó un cuestionario final dirigido al personal administrativo y técnico de

Blue Medical. El objetivo de este instrumento fue analizar la experiencia del usuario, medir la utilidad de las funcionalidades implementadas y obtener una valoración sobre el potencial del sistema para su uso a nivel nacional e internacional. A continuación, se presentará las preguntas de este cuestionario:

1. ¿Qué les pareció el diseño del prototipo?
2. ¿Qué tan intuitivo consideran que es este prototipo?
3. ¿Conocen algún otro programa que tenga funciones similares que compitan o se asemejen a este prototipo?
4. ¿Qué les parece el módulo “Base de Datos de Equipos Médicos”?
5. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
6. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
7. ¿Qué les parece el módulo “Gestor de Códigos QR”?
8. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
9. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
10. ¿Qué les parece el módulo “Calendario y Notas”?
11. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
12. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
13. ¿Qué les parece el módulo “Lista de Proveedores”?
14. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
15. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
16. ¿Previo al prototipo como manejaban los problemas de dispositivos médicos?
17. ¿Aproximada y económicamente cuánto invertían en todo el protocolo antiguo de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos al mes?
18. ¿Aproximadamente cuánto tiempo invierten en realizar el protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos al mes?
19. ¿Suponiendo el uso de este prototipo en el área administrativa o encargada de los equipos médicos, consideran que este prototipo ahorraría en algún proceso ya sea a nivel económico o de tiempo, por qué?

20. ¿Hay alguna mejora que consideren importante o prioritaria que debería de contener este prototipo, que no posea actualmente según el manual o el video explicativo?

Todas las preguntas han sido realizadas de manera abierta, para fomentar que los encuestados redacten respuestas detalladas, en lugar de limitarse a opciones predefinidas. Este enfoque fue elegido para obtener las opiniones, percepciones y sugerencias del personal con respecto a la viabilidad y el potencial del prototipo para evolucionar hacia una aplicación completamente funcional.

7.6. Cuestionario final del prototipo para Blue Medical:

Para finalizar con esta sección, se planificó un cuestionario final el cual se enfoca en el diseño final del prototipo y comprender cuales fueron las necesidades cubiertas con este proyecto:

1. ¿Qué les pareció el diseño del prototipo?
2. ¿Qué tan intuitivo consideran que es este prototipo?
3. ¿Conocen algún otro programa que tenga funciones similares que compitan o se asemejen a este prototipo?
4. ¿Qué les parece el módulo “Base de Datos de Equipos Médicos”?
5. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
6. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
7. ¿Qué les parece el módulo “Gestor de Códigos QR”?
8. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
9. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
10. ¿Qué les parece el módulo “Calendario y Notas”?
11. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?
12. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
13. ¿Qué les parece el módulo “Lista de Proveedores”?
14. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario?

15. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué?
16. ¿Previo al prototipo como manejaban los problemas de dispositivos médicos?
17. ¿Aproximada y económicamente cuánto invertían en todo el protocolo antiguo de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos al mes?
18. ¿Aproximadamente cuánto tiempo invierten en realizar el protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos al mes?
19. ¿Suponiendo el uso de este prototipo en el área administrativa o encargada de los equipos médicos, consideran que este prototipo ahorraría en algún proceso ya sea a nivel económico o de tiempo, por qué?
20. ¿Hay alguna mejora que consideren importante o prioritaria que debería de contener este prototipo, que no posea actualmente según el manual o el video explicativo?

Resultados y discusión

La estructura del prototipo final se fundamenta en una base de datos centralizada, que utiliza el almacenamiento y la creación de tablas de MySQL, que es el encargado del almacenamiento de todo el prototipo. La lógica de la aplicación se organiza en un conjunto de módulos interconectados (Figura 11). Cada módulo está diseñado para gestionar tareas específicas (lista de proveedores, base de datos o gestor de códigos QR), interactuando con la base de datos para consultar, registrar y actualizar datos. Esta arquitectura modular tiene como objetivo final simplificar y optimizar las labores de mantenimiento hospitalario, proporcionando al personal una herramienta eficiente y organizada.

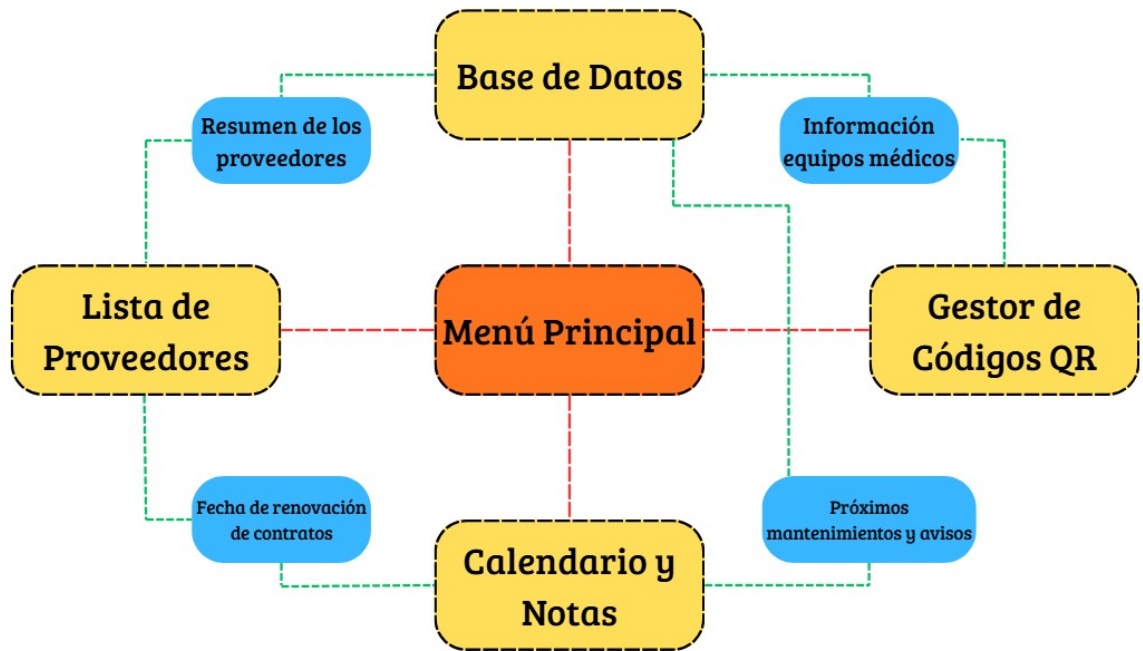


Figura 11. Diagrama de flujo del prototipo funcional

8.1. Base de datos

Como resultado del proceso de desarrollo, la aplicación se organizó en cuatro módulos funcionales, cada uno diseñado para gestionar tareas específicas y ordenar el flujo de trabajo. Al trabajar de manera modular se debió a una decisión estratégica de diseño, orientada a garantizar la escalabilidad y actualizar el sistema. No fue una opción realizar la programación en una hoja de Python, al prevenir que un único archivo, con una gran cantidad de líneas de código dificultaría las futuras actualizaciones y la depuración de los módulos por separado. En cambio, al encapsular la lógica en módulos discretos, se optimizó el desarrollo y se facilitó la integración a través de una ventana principal que gestiona la intercomunicación. De esta manera, la estructura del prototipo, que se describen en 4 módulos principales, no solo representa el resultado técnico, sino que también valida la metodología de diseño escogida para crear un sistema robusto y preparado para futuras actualizaciones:

8.1.1. Base de datos de equipos médicos:

Estructura y partes

La base de datos es el componente central del sistema, ya que su estructura incluye datos clave como la sede del hospital, número de serie y modelo del equipo, que son fundamentales para la organización y seguimiento de los activos (Figura 12). Además del registro de equipos, su diseño está preparado para soportar funcionalidades avanzadas que optimizan las tareas de los administradores. Estas incluyen el almacenamiento de documentos (reportes y manuales), la programación de mantenimientos y la gestión de información de proveedores, centralizando el control operativo y facilitando el acceso a los datos desde los demás módulos.

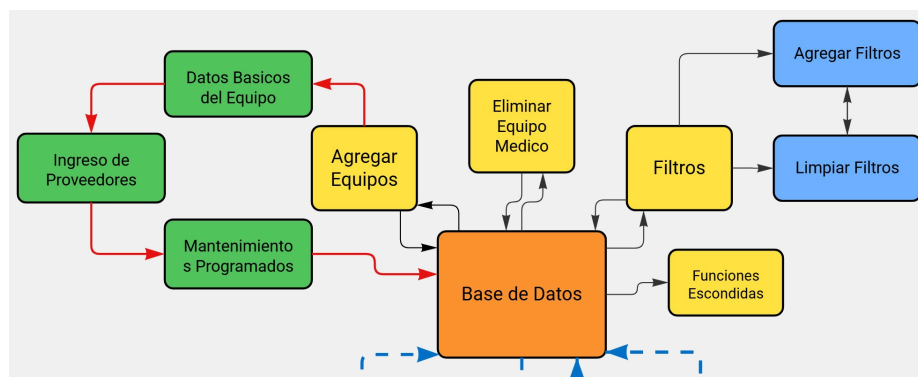
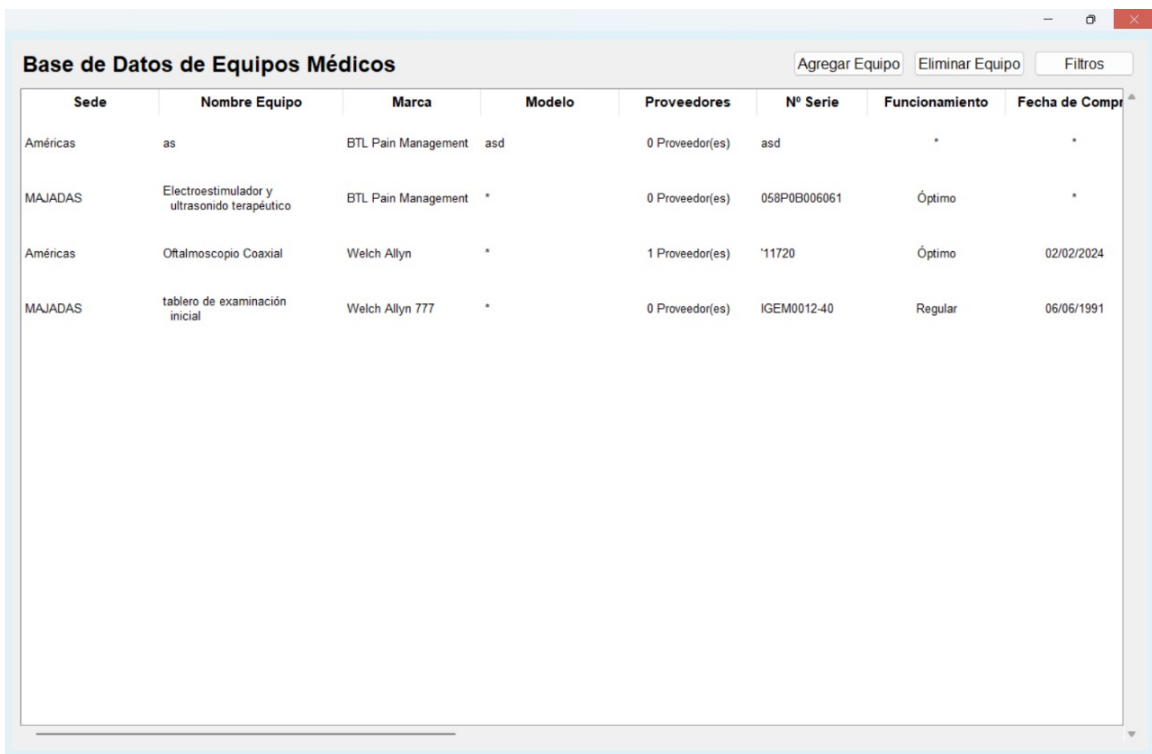


Figura 12. Diagrama de flujo de la base de datos

GUI y diseño del módulo final

Las mejoras iniciales se centraron en el módulo de la base de datos para potenciar su capacidad y funcionamiento dentro del prototipo. Se expandió la estructura de datos con nuevas columnas para registrar información más detallada de cada equipo médico. Para evitar la sobresaturación visual en la tabla principal (Figura 13). Adicionalmente, se implementaron funcionalidades clave de gestión, como el botón "Agregar Equipo", y un robusto sistema de filtros. Esta última herramienta permite a los administradores reducir la búsqueda de equipos según criterios específicos como la sede del hospital, la marca o su estado de funcionamiento, reduciendo el número de registros visibles y facilitando la localización de activos en un inventario con varias sedes del hospital.



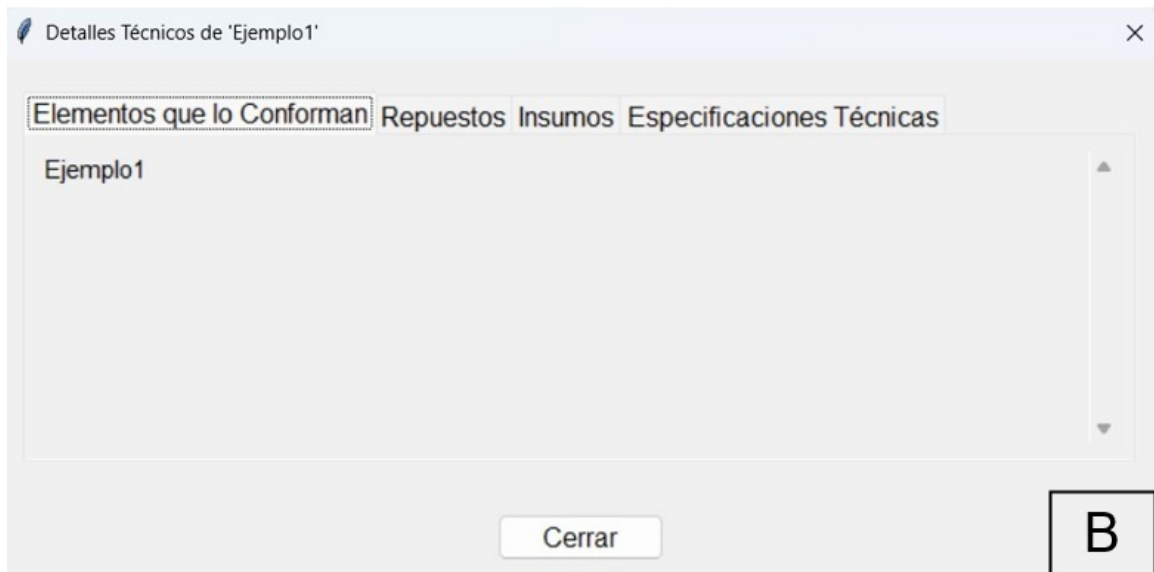
| Sede | Nombre Equipo | Marca | Modelo | Proveedores | N° Serie | Funcionamiento | Fecha de Compra |
|----------|--|---------------------|--------|-----------------|--------------|----------------|-----------------|
| Américas | as | BTL Pain Management | asd | 0 Proveedor(es) | asd | * | * |
| MAJADAS | Electroestimulador y ultrasonido terapéutico | BTL Pain Management | * | 0 Proveedor(es) | 058P0B006061 | Óptimo | * |
| Américas | Oftalmoscopio Coaxial | Welch Allyn | * | 1 Proveedor(es) | '11720 | Óptimo | 02/02/2024 |
| MAJADAS | tablero de examinación inicial | Welch Allyn 777 | * | 0 Proveedor(es) | IGEM0012-40 | Regular | 06/06/1991 |

Figura 13. Versión final de la base de datos

Entre las mejoras implementadas, se introdujo un módulo dedicado a la gestión de proveedores. Esta sección centraliza la información de las empresas y técnicos externos, permitiendo un control del personal encargado del mantenimiento de los equipos médicos (Figura 14 A). El sistema ofrece a los administradores un resumen claro de quiénes son los responsables de las reparaciones y el servicio técnico, con la flexibilidad de asignar diferentes proveedores a equipos específicos según su modelo o complejidad. La segunda mejora se enfoca en la gestión de los detalles técnicos del equipo (Figura 14 B). Este apartado fue diseñado para almacenar información extendida que no es práctica para la vista principal, como los insumos que consume cada activo, los repuestos disponibles en el inventario del hospital y las especificaciones

técnicas del fabricante.

Una tercera mejora es la implementación de una ventana dedicada para programar la fecha del próximo mantenimiento de cada equipo (Figura 14 C). Esta funcionalidad opera en dos niveles: por un lado, integra automáticamente un recordatorio en el calendario general, notificando a los encargados sobre la fecha y el tipo de mantenimiento a realizar y a su vez, actualiza la base de datos principal con un contador que muestra los días restantes, ofreciendo una visibilidad constante del estado del equipo. Finalmente, para centralizar toda la documentación, se añadieron dos columnas que actúan como un sistema de almacenamiento de archivos PDF (Figura 14 D). Aunque su funcionamiento es similar, sus propósitos son diferentes: una columna está destinada a los manuales de los equipos de manera individual, mientras que la otra almacena los reportes de servicio, creando un historial completo de todos los mantenimientos realizados.



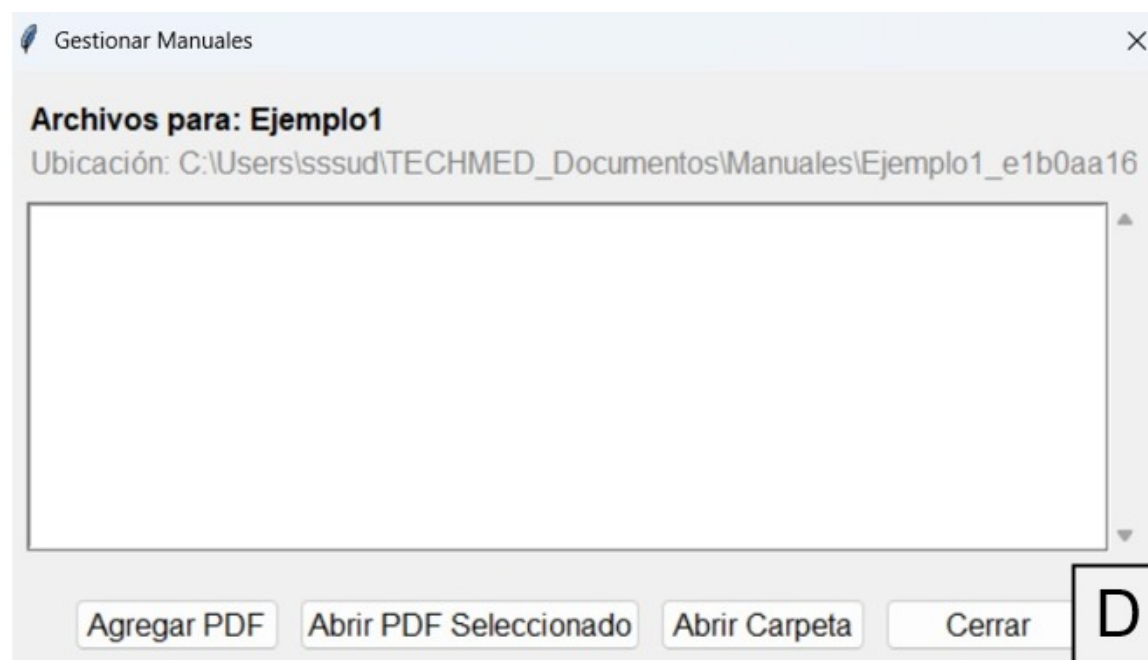
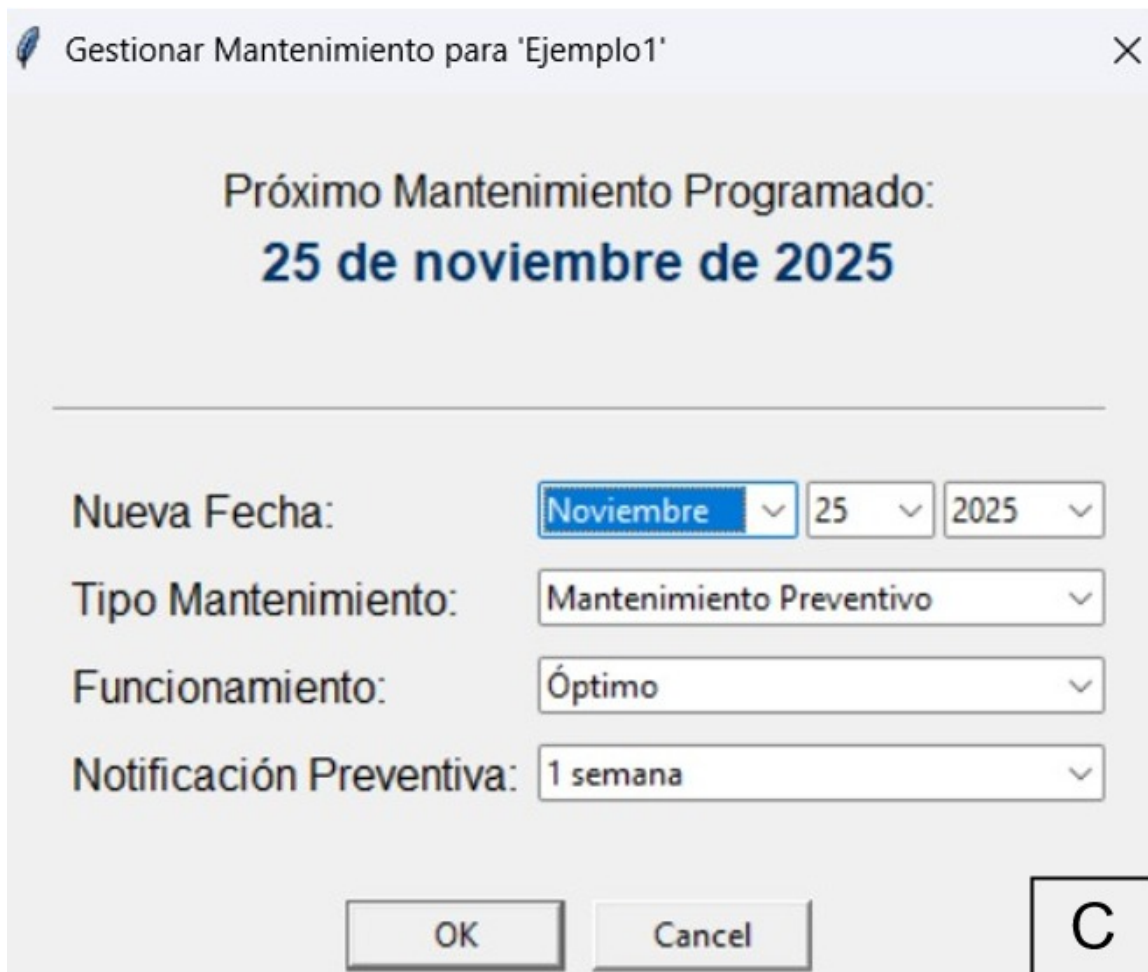


Figura 14. Herramientas de la base de datos A. ventana de proveedores, B. ventana de detalles técnicos de los equipos médicos, C. ventana de programación de mantenimientos, D. almacenador de manuales y reportes técnicos

La construcción del módulo se fundamentó en una visión estratégica que trasciende la simple digitalización de registros. Se reconoció que la centralización de datos sin una gestión adecuada de la interfaz podría resultar contraproducente, por ello, su diseño se centró en un principio de facilitar los procesos. Si bien la base de datos almacena toda la información de los equipos, su interfaz principal fue diseñada para ser selectiva, delegando los datos extendidos a vistas secundarias (Figura 14 B) para mantener una vista despejada y funcional. Este enfoque, centrado en el administrador, minimiza la carga cognitiva y el potencial de error humano. Como solución de gestión de datos, representa un avance significativo sobre los métodos tradicionales basados en papel, propensos a la pérdida y deterioro con el tiempo, y unificar la información que antes provenía de programas de software fragmentados. Por lo tanto, este módulo no solo supone una optimización tecnológica, sino que le brinda al personal herramientas que agilizarán procesos para los equipos médicos.

8.1.2. Gestor de códigos QR

Estructura y partes

Este módulo introduce un sistema de gestión complementario, basado en códigos QR únicos para cada equipo (Figura 15), que funciona como un índice de acceso rápido. Almacena un resumen de la información clave de los equipos y añade funcionalidades que no están presentes en la base de datos principal, incluyendo el registro de métricas de uso para capturar la cantidad de veces y las horas de operación, así como un repositorio de códigos QR que gestiona una copia digital de cada código para facilitar su control y reimpresión. Gracias a esta estructura, el módulo ofrece una vía de acceso a la información mucho más dinámica y ágil en comparación con la búsqueda directa en la base de datos principal.

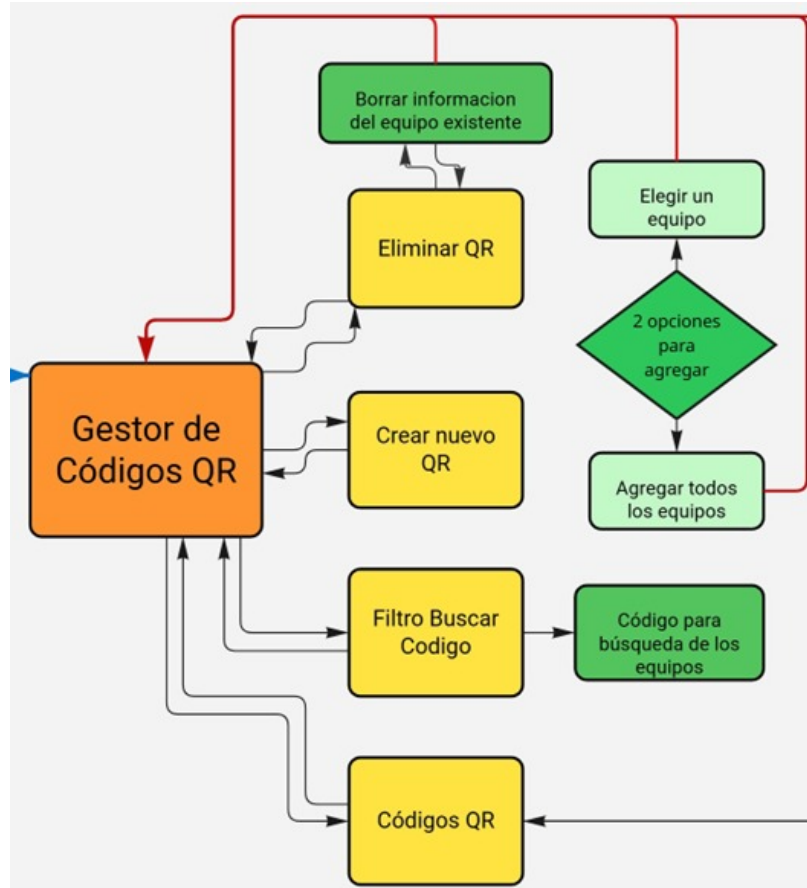


Figura 15. Diagrama de flujo del gestor de códigos QR

La segunda función clave se activa al escanear el código QR del equipo. Cada código despliega un menú de acciones específicas para ese equipo (Figura 16), facilitando tareas como el registro del retiro y devolución, la gestión del transporte con proveedores, y un resumen de la información del equipo para cualquiera que ingrese al QR. Este sistema permite a los administradores mantener un control proactivo, anticipándose a posibles fallos en lugar de reaccionar a ellos, mejorando así la eficiencia del mantenimiento.



Figura 16. Menú interno del gestor de códigos QR

GUI y diseño del módulo final

El módulo **Gestor de Códigos QR** recibió avances significativos para convertirse en una herramienta de seguimiento. Además de su función principal de crear códigos QR únicos para cada equipo (Figura 17), se implementó un sistema de búsqueda que permite localizar rápidamente cualquier activo a través de sus códigos. La mejora más importante fue la introducción de una ventana de historial de uso. Esta funcionalidad registra cada ciclo de retiro y devolución de un equipo, documentando el tiempo de uso y el estado en el que se devuelve. Este registro es importante para la toma de decisiones administrativas, ya que permite predecir la necesidad de mantenimientos preventivos basándose en patrones de uso y desgaste, optimizando así la gestión del ciclo de vida de los equipos médicos.

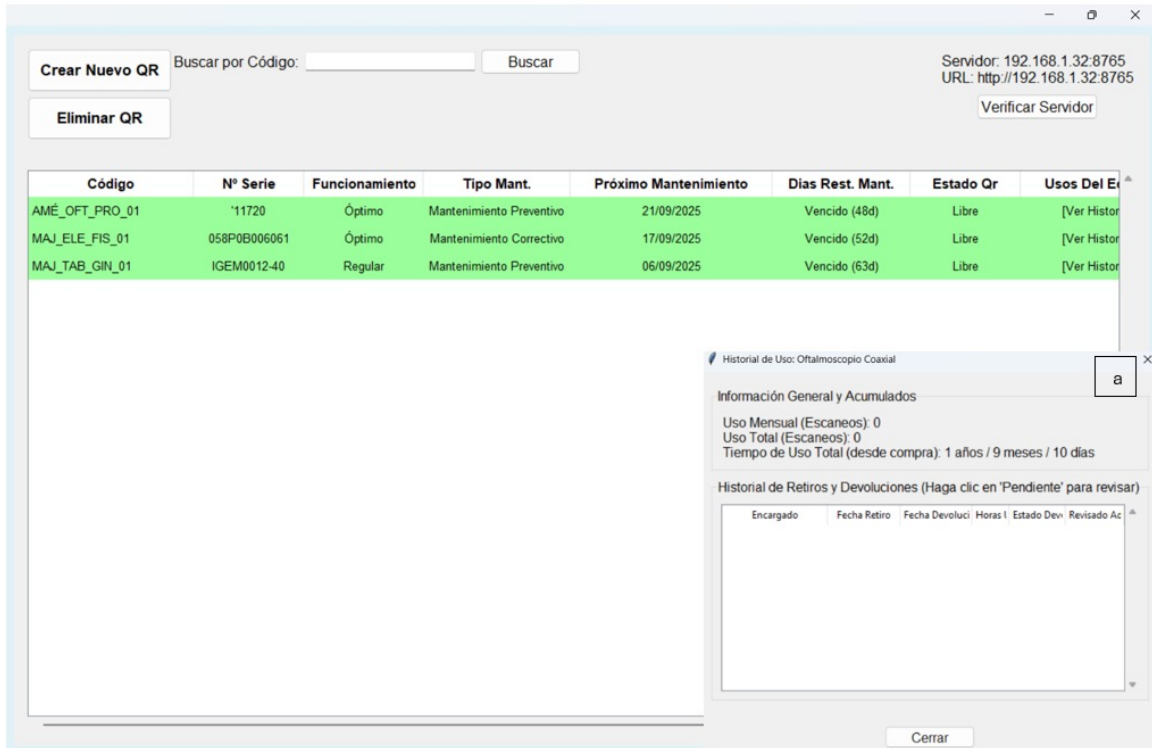


Figura 17. Versión final del módulo gestor de códigos QR, a. historial de usos de ejemplo

Los códigos QR funcionan como identificadores digitales únicos para cada equipo, permitiendo un control de las operaciones de manera individual. Al escanear un código, ya sea desde una etiqueta física adherida al equipo o directamente desde el prototipo, el usuario es dirigido a una interfaz web móvil (Figura 18). Este sistema facilita y agilizará el registro del transporte y uso de los equipos tanto dentro como fuera de las instalaciones del hospital.



Figura 18. Ejemplo del código QR y el menú para cada equipo médico

La interfaz web presenta tres funciones principales. La primera, **Retiro de equipo médico**, está diseñada para el uso interno, registrando no solo la frecuencia de uso, sino también el estado del equipo al ser devuelto, lo que permite identificar fallos. La segunda opción, **Transporte de equipo con proveedores**, formaliza la cadena de custodia cuando un equipo requiere mantenimiento externo, creando un registro de su salida y reingreso para prevenir pérdidas o robos. Finalmente, la opción **Información** ofrece un resumen de los datos del equipo extraídos de la base de datos, permitiendo al personal verificar especificaciones importantes en el momento, sin necesidad de acceder al sistema de escritorio.

Se reconoce que la implementación actual del sistema de códigos QR, al carecer de un sistema de seguridad, representa una vulnerabilidad, pero controlada en el alcance de este proyecto. Esta decisión se adoptó estratégicamente para priorizar la agilidad en el desarrollo y la validación rápida del flujo de trabajo funcional simulando si esta herramienta se liberara en un entorno hospitalario, un enfoque característico de la fase de prototipado donde la funcionalidad y la aceptación del concepto serán lo principal. El éxito de este modelo de acceso rápido y descentralizado ha validado su utilidad operativa y, por tanto, sienta las bases para su evolución natural en el trabajo futuro. Dicha evolución consistirá en integrar el sistema de QR dentro de una arquitectura multiplataforma segura, donde el acceso a las funciones de edición

requerirá autenticación de usuario a través de una red privada hospitalaria, transformando así el prototipo actual en una herramienta robusta y preparada para un entorno hospitalario.

8.1.3. Lista de proveedores

Estructura y partes

El módulo de gestión de proveedores (Figura 19) fue desarrollado para centralizar y optimizar el control administrativo sobre los proveedores y técnicos encargados del mantenimiento preventivo y correctivo de los equipos. El sistema permite a los administradores mantener un registro detallado de cada proveedor, especificando sus áreas de especialidad y los equipos que manejan. Cada proveedor cuenta con un perfil individual donde se almacena el contrato digitalizado en formato PDF. Esta funcionalidad proporciona un respaldo documental clave que ofrece seguridad ante posibles errores administrativos, evitando incumplimientos de contrato y sirve como referencia para evitar retrasos en el mantenimiento. Adicionalmente, el módulo incluye una herramienta para programar las fechas de renovación de contratos, mediante notificaciones automáticas, los cuales alertan a los responsables sobre los vencimientos próximos, facilitando así la toma de decisiones para la continuidad del servicio o la cancelación de acuerdos comerciales.

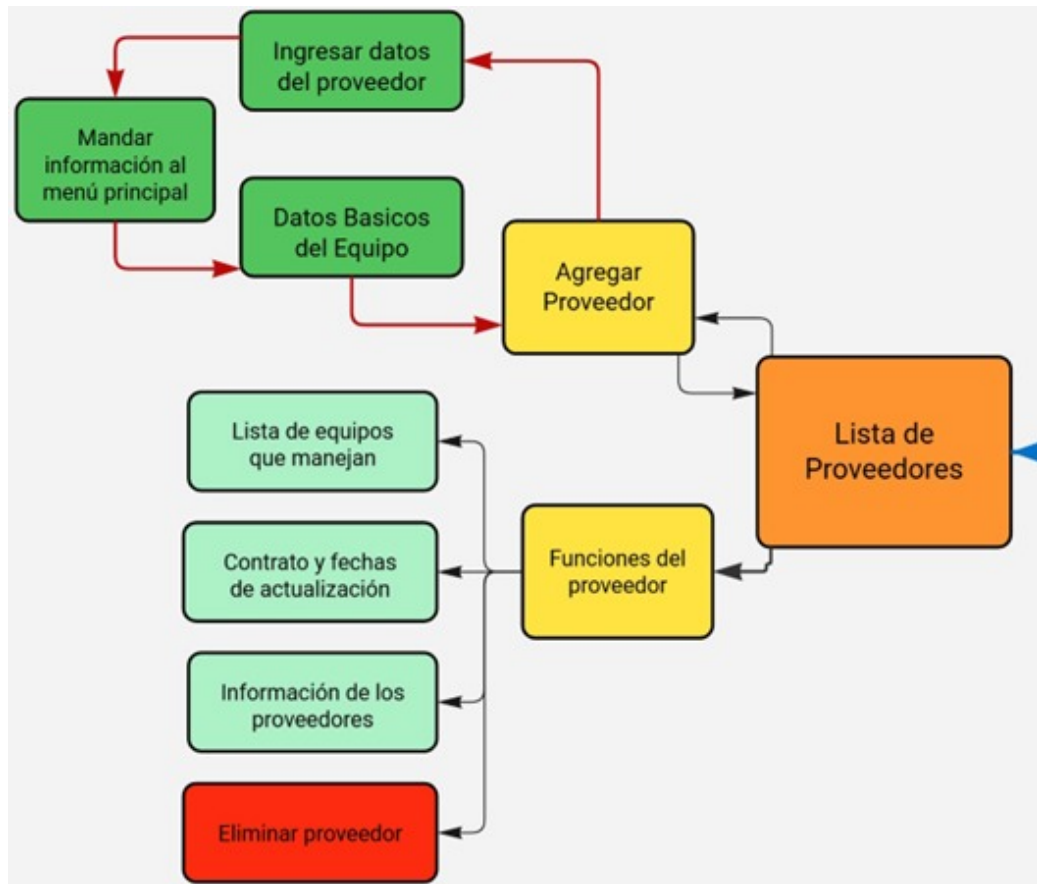


Figura 19. Diagrama de flujo de la lista de proveedores

GUI y diseño del módulo final

Para completar el conjunto de herramientas de gestión, se implementó un módulo final dedicado "Lista de proveedores". Este apartado presenta la información de cada proveedor en tarjetas individuales, que funcionan como un panel de control para el administrador (Figura 20). Desde cada tarjeta, se puede acceder a ventanas específicas que detallan los equipos que gestiona el proveedor, los términos de su contrato y sus fechas de actualización. Esta estructura permite un análisis rápido de la utilidad y el rendimiento de cada socio comercial, facilitando la toma de decisiones estratégicas sobre la renovación o cancelación de contratos y optimizando así los gastos operativos del hospital (Figura 21).

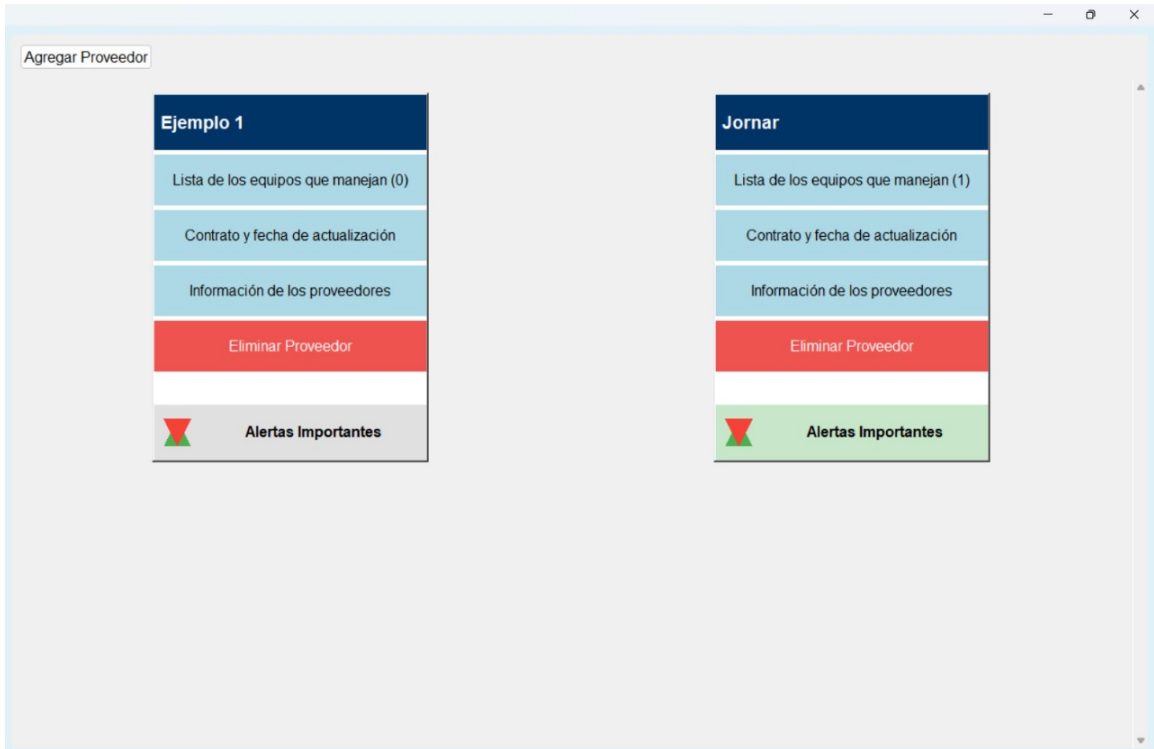


Figura 20. Versión final de lista de proveedores

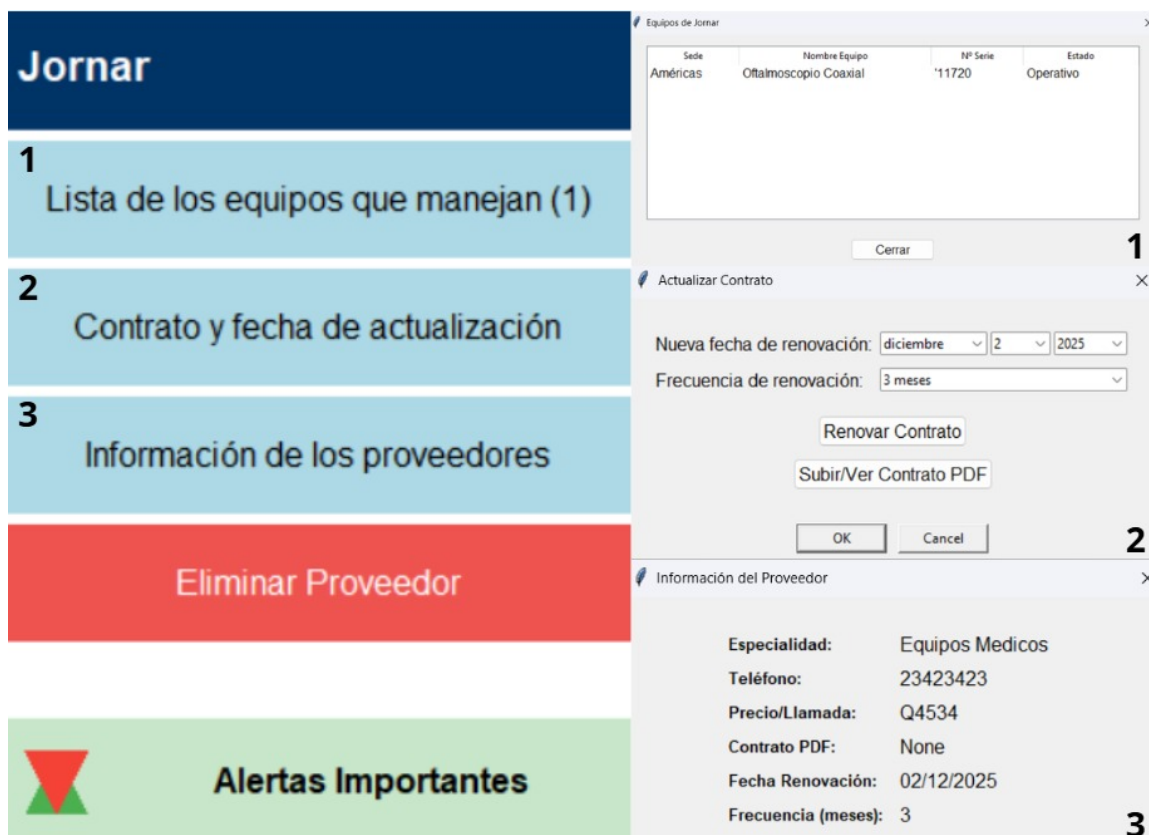


Figura 21. Ventanas para cada proveedor, 1. Lista de equipos, 2. Contrato y fecha de actualización de contrato, 3. Información de los proveedores

La inclusión de este módulo, aunque no formaba parte del alcance conceptual inicial, surgió como una iteración de diseño crítica basada en hallazgos obtenidos durante la fase de prácticas profesionales. La observación directa de las operaciones en centros de salud reveló un problema operativo: la gestión descentralizada y actualización de los contratos de mantenimiento, que frecuentemente resultaba en vencimientos no advertidos, interrupciones del servicio y dificultades para asignar responsabilidades. Por ello, el desarrollo de este módulo, aunque es inferior en contenido a comparación de los demás módulos, se justificó como una solución de alto impacto para mitigar un riesgo administrativo real. Al centralizar la documentación contractual y automatizar las alertas de renovación, esta herramienta no solo optimiza el tiempo del personal, sino que también sienta un precedente para la expansión futura del sistema hacia una plataforma de gestión proactiva de riesgos y optimización de costos, demostrando el potencial del prototipo para resolver problemas operativos que trascienden la simple gestión de inventario.

8.1.4. Calendario y Notas

Estructura y partes

El módulo de Calendario y Notas (Figura 22) se constituye como el eje central operativo del prototipo, a pesar de su diseño visualmente sencillo. Su principal resultado es la integración de múltiples flujos de información, lo que lo convierte en el componente con mayor interconexión del sistema. Este módulo es responsable de actualizar automáticamente las fechas de mantenimiento de los equipos médicos, programar las renovaciones de contratos y agendar las visitas de los proveedores. Además, gestiona los cálculos de tiempo de uso del equipamiento para generar alertas y bitácoras de uso. Su funcionalidad más destacada es la comunicación directa con el menú principal, a través de la cual envía resúmenes de las "Actividades de Hoy" los "Mantenimientos del Mes". Esta integración asegura que el administrador disponga de una visión actualizada y organizada.



Figura 22. Diagrama de flujo de Calendario y Notas

GUI y diseño del módulo final

El módulo de Calendario y Notas funciona como un centro de planificación, conservando una interfaz intuitiva que muestra la fecha y hora actual junto a una vista de un calendario interactivo (Figura 23). Su principal funcionalidad es la gestión de notificaciones y tareas, las cuales se clasifican visualmente mediante un sistema de colores. Este código de color permite a los administradores identificar rápidamente eventos críticos, tales como los próximos mantenimientos de equipos y las fechas de renovación de contratos con proveedores, además de permitir el registro de notas personalizadas. El sistema soporta tanto recordatorios para un día específico como notificaciones anuales.

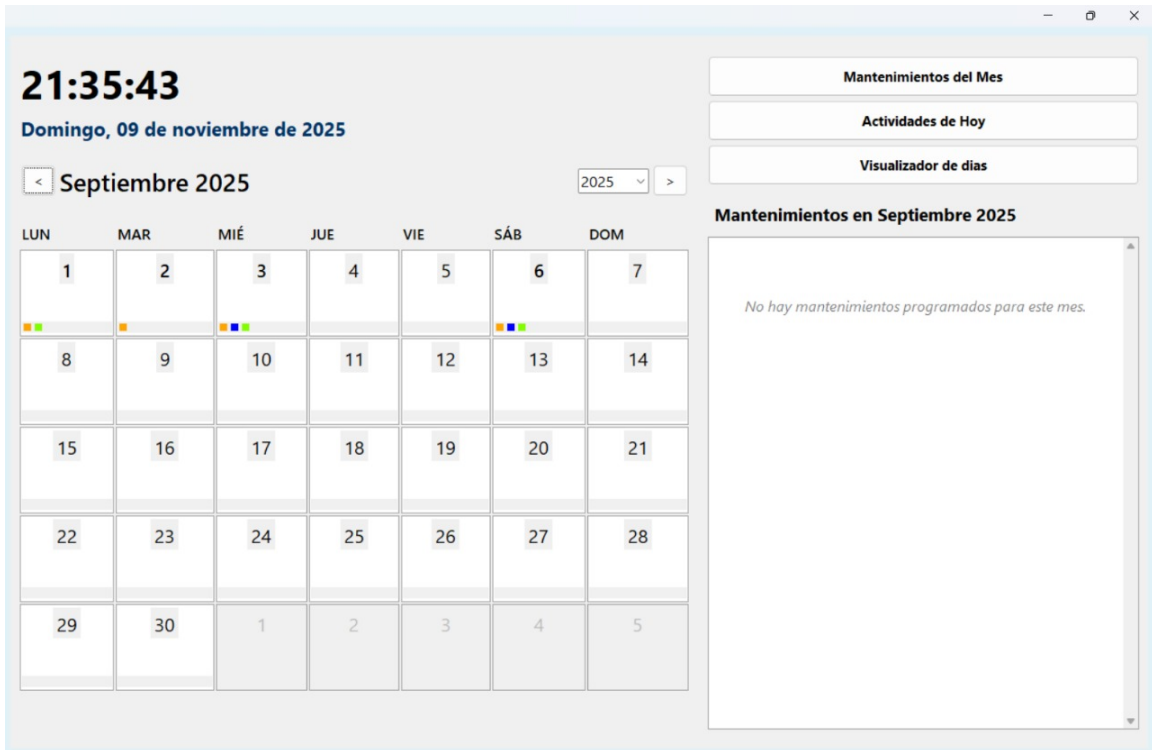


Figura 23. Versión final de Calendario y Notas

La arquitectura del sistema se fundamenta en la interconexión de sus módulos principales, como se ilustra en el diagrama de flujo (Figura 24). Estos módulos no funcionan de manera aislada; en su lugar, acceden y comparten información desde una fuente centralizada. Este diseño garantiza la consistencia de los datos en toda la aplicación, eliminando la redundancia y optimizando los flujos de trabajo. Para los administradores, es una reducción significativa del tiempo de búsqueda, ya que la información relevante de un equipo está disponible y actualizada en tiempo real desde cualquier sección del programa.

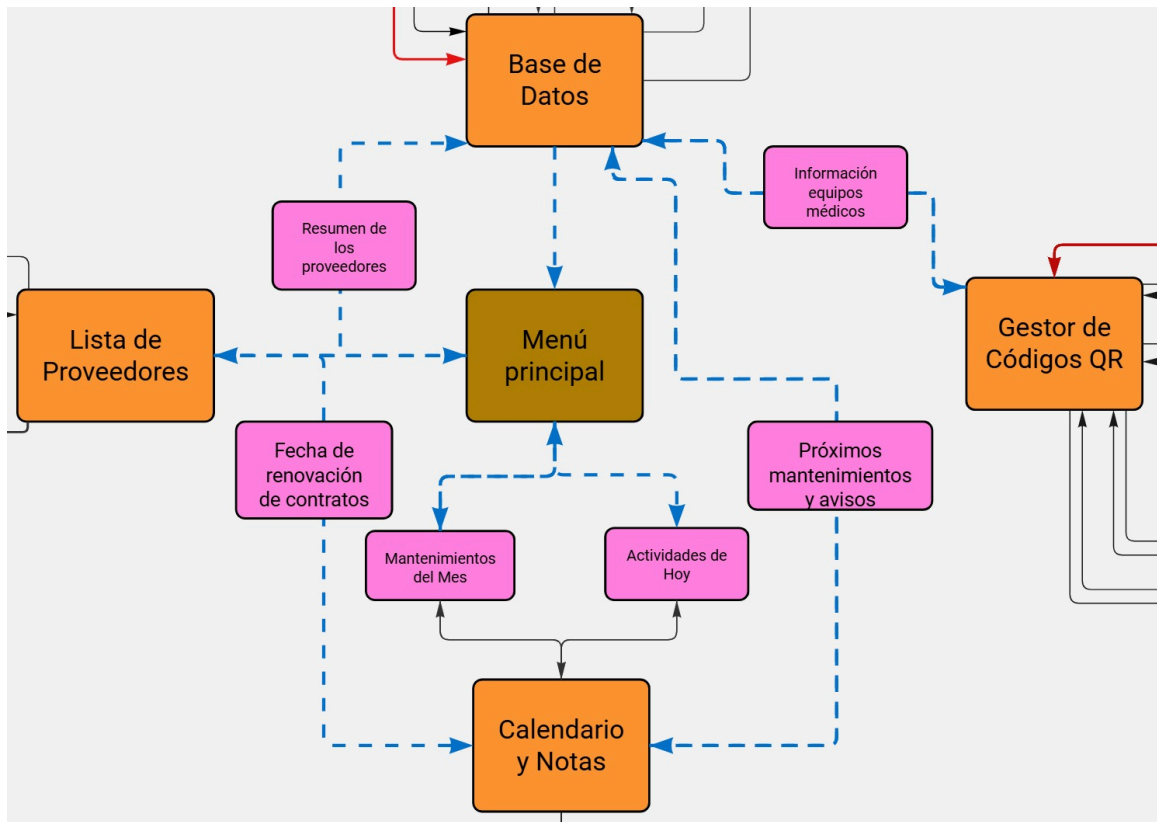


Figura 24. Diagrama de la comunicación de los módulos con el menú principal

El almacenamiento de todos los datos se gestiona a través de un servidor de base de datos MySQL. La base de datos, denominada 'bluemedical_db', no es un simple repositorio, sino un sistema altamente organizado. Cada ventana del sistema, como los equipos, proveedores, o qr_registros, se almacena en tablas especializadas. Esta organización asegura un orden estricto y permite establecer relaciones lógicas entre los datos, lo que garantiza la integridad de la información y permite realizar consultas complejas de manera eficiente.

La integración de los módulos se unificó mediante una comunicación dinámica que permite la transferencia de información en tiempo real, creando un flujo de trabajo eficiente. Para centralizar las operaciones diarias, se implementó un "Gestor de Tareas.^{en} el menú principal (Figura 25). Este panel une las notificaciones y eventos importantes de todo el sistema, como los mantenimientos preventivos y correctivos atrasados, proporcionando a los administradores un resumen claro de las actividades pendientes. Esta funcionalidad garantiza un control sobre los equipos y optimiza la gestión de las tareas diarias.



Figura 25. Menú principal con el gestor de tareas

Si bien el prototipo constituye la versión final dentro del alcance de este trabajo de graduación, su diseño se fundamenta en una arquitectura modular y escalable, con posibilidades para facilitar futuras expansiones. Durante el ciclo de desarrollo se identificaron múltiples oportunidades para incorporar funcionalidades avanzadas, como herramientas para áreas de análisis predictivo y control económico. Sin embargo, al enfocar las mejores prácticas de gestión de proyectos, se tomó la decisión estratégica de priorizar el cumplimiento de los requisitos esenciales definidos por el hospital, asegurando la entrega de un producto funcional y validado que resolviera las necesidades más inmediatas de la institución. El éxito de esta versión, que superó las expectativas funcionales de la encargada de Blue Medical, no solo valida la viabilidad del enfoque adoptado, sino que también establece una base sólida y bien definida desde la cual se pueden emprender futuras actualizaciones. Por lo tanto, el sistema actual no debe ser visto como un producto cerrado, sino como el núcleo de una plataforma con un claro potencial de comercialización, cuya estructura facilita la integración de nuevas capacidades para transformarlo en una solución de gestión hospitalaria integral y robusta.

8.2. Evaluación del prototipo en un entorno clínico

Antes de iniciar con el proceso de desarrollo del sistema, se inició con la recepción del inventario detallado de los equipos médicos provenientes de varias sedes de los hospitales. Este conjunto de datos inicial, de una de las sedes del hospital Blue Medical (Figura 26), proporcionó una base de información real y completa que fue fundamental para el diseño y las pruebas de funcionamiento del prototipo. Contar con datos operativos aseguró que la solución se desarrollara en el caso de que este

prototipo se manejara en un hospital con altas cargas de equipos médicos, validando la viabilidad del almacenamiento y la gestión de la información.

| FECHA: 20-may-25 | | | | | | |
|------------------|---------|--------------|---|---------------------|--------------|------------|
| SEDE MAJADAS | | | | | | |
| NUEVO CÓDIGO | SEDE | UBICACIÓN | EQUIPO | MARCA | SERIE | INVENTARIO |
| MJ_FU_AC1 | MAJADAS | Almacén | Autoclave azul | STURDY APEX GROUP | SA-260FA | 1 |
| MJ_FU_AC2 | MAJADAS | Almacén | Autoclave metálica | | | 1 |
| MJ_FL_EU1 | MAJADAS | Fisioterapia | Electroestimulador y ultrasonido terapéutico | Intelect | IGEM0100-48 | 1 |
| MJ_FL_EU2 | MAJADAS | Fisioterapia | Electroestimulador y ultrasonido terapéutico | BTL Pain Management | 058P0B006061 | 1 |
| MJ_FL_I1 | MAJADAS | Fisioterapia | Electroestimulador y ultrasonido terapéutico | Intelect | | 1 |
| MJ_FL_CP1 | MAJADAS | Fisioterapia | Camilla Portátil Plegable de Madera para Fisioterapia | 3B Scientific | | 1 |
| MJ_FL_CP2 | MAJADAS | Fisioterapia | Camilla Portátil Plegable de Madera para Fisioterapia | 3B Scientific | | 1 |
| MJ_FL_CP3 | MAJADAS | Fisioterapia | Camilla Portátil Plegable de Madera para Fisioterapia | 3B Scientific | | 1 |

| EQUIPO MÉDICO BLUE MEDICAL | | |
|--|---|---|
| ELEMENTOS QUE LO CONFORMAN | REPUESTOS | INSUMOS DESCARTABLES |
| Cámara de esterilización, depósito de agua, panel de control, sistema de calentamiento, sistema de seguridad (válvula, bloqueo automático de puerta, interruptor de emergencia), indicadores (manómetro para presión, indicadores LED) | Caja de esterilización, cubierta del calentador, bandejas | agua, indicadores biológicos y químicos, bolsas y envoltorios para esterilización |
| Cabezal de ultrasonido, cables conductores de electroterapia, Electroodos de goma reutilizables | Cabezal de ultrasonido adicional, electrodos de reemplazo | Gel conductor para ultrasonido |
| Cabezal de ultrasonido, cables conductores de electroterapia, Electroodos de goma reutilizables | Cabezal de ultrasonido adicional, electrodos de reemplazo | Gel conductor para ultrasonido |
| Cabezal de ultrasonido, cables conductores de electroterapia, Electroodos de goma reutilizables | Cabezal de ultrasonido adicional, electrodos de reemplazo | Gel conductor para ultrasonido |
| Superficie acolchonada | Almohada adicional | Gel desinfectante para limpieza |
| Superficie acolchonada | Almohada adicional | Gel desinfectante para limpieza |
| Superficie acolchonada | Almohada adicional | Gel desinfectante para limpieza |

| MANTENIMIENTO | ESPECIFICACIÓN | EVALUACIÓN DE CONDICIÓN |
|--|--|-------------------------|
| Diario: verificar niveles de agua, limpiar la cámara y bandejas. Semanal: Revisar y limpiar el filtro de agua. Mensual: inspeccionar el estado de las juntas y sellos, probar el funcionamiento de los sistemas de seguridad. Anual: calibración y mantenimiento preventivo por personal autorizado, | Capacidad de la cámara: 24 litros, Dimensiones de la cámara: Ø260 x 450mm. Dimensiones generales: 533 x 442 x 655 mm. Peso neto: 51.5 kg. Voltaje / Frecuencia: 230 V / 50-60 Hz. Consumo de energía: 2670 W / 11.6 A. Temperatura de esterilización: 121°C o 134°C. Capacidad del depósito de agua: 4.2 litros. Consumo de agua por ciclo: 200~350 cc | Buen estado |
| | | Fuera de uso. |
| Revisión de cables y conectores, limpieza externa con paño suave y desinfectante, prueba de salida de corriente en electrodos | Cada 3 a 6 meses | Buen estado |
| Revisión de cables y conectores, limpieza externa con paño suave y desinfectante, prueba de salida de corriente en electrodos | Cada 3 a 6 meses | Buen estado |
| Revisión de cables y conectores, limpieza externa con paño suave y desinfectante, prueba de salida de corriente en electrodos | Cada 3 a 6 meses | Buen estado |
| Limpieza del tapizado con solución desinfectante, revisión de tornillos y estabilidad de patas | Cada 3 a 6 meses | Buen estado |
| Limpieza del tapizado con solución desinfectante, revisión de tornillos y estabilidad de patas | Cada 3 a 6 meses | Buen estado |
| Limpieza del tapizado con solución desinfectante, revisión de tornillos y estabilidad de patas | Cada 3 a 6 meses | Buen estado |

Figura 26. Base de datos de equipos médicos de Blue Medical, realizada en una hoja de Excel

El proceso de entrega del prototipo se abordó a través de varias estrategias, adaptándose a los desafíos técnicos e institucionales que surgieron. La estrategia inicial consistió en compilar el prototipo en un archivo ejecutable .exe, con el objetivo de ofrecer una aplicación autónoma y de fácil instalación (Figura 27). Sin embargo, su funcionamiento dependía de una base de datos activa. Para solventar la ausencia de un servidor, se empaquetó el ejecutable junto a un archivo de *script* MySQL .sql, permitiendo al personal del hospital replicar la base de datos de manera local.

No obstante, esta solución se enfrentó a un obstáculo ya que, la estricta política institucional del hospital, que prohíbe la instalación de software externo para proteger sus sistemas de virus o agentes maliciosos que puedan corromper su infraestructura de trabajo, provocó que se invalidara la estrategia de entrega local, obligando a buscar métodos de presentación alternativos que no comprometieran la seguridad del hospital.

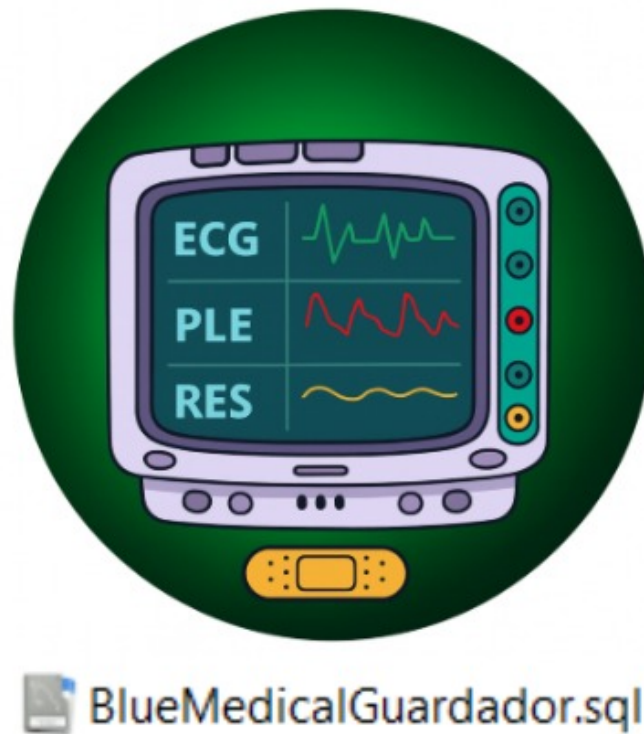


Figura 27. Logotipo del prototipo TechMed y código de almacenamiento del prototipo por medio de MySQL

Ante la imposibilidad de una entrega directa del software, en base a buscar métodos de presentación alternativos para poder recopilar la opinión del hospital sobre el prototipo. El primer método consistió en la elaboración de un manual de usuario exhaustivo. Este documento detalla a profundidad el funcionamiento de cada módulo, sus funciones especiales y los flujos de trabajo recomendados para cada tarea, ofreciendo una presentación estructurada y formal que permite una comprensión completa del sistema sin necesidad de su instalación.

Como segundo método de presentación, y el que tuvo más resultados, fue la creación de un video explicativo que, a diferencia del manual, este material se centró en resumir las funcionalidades más importantes del prototipo, ofreciendo una demostración dinámica y más accesible. La inclusión de una narración, el factor humano, tuvo como objetivo simplificar la comprensión de conceptos complejos y mostrar el funcionamiento práctico del sistema de una manera que un documento estático no puede replicar, facilitando así la evaluación por parte del personal.

Tras la presentación del manual de usuario y el video explicativo, se obtuvo la autorización para una fase de análisis del prototipo y el impacto de las herramientas que este prototipo brinda. Durante un periodo de dos semanas, el personal tuvo la oportunidad de analizar el funcionamiento del sistema, sus funcionalidades especiales y analizar su impacto dentro del flujo de trabajo hospitalario. Al concluir esta eva-

luación, se recopilaron las respuestas del cuestionario experiencia del usuario, cuyos resultados fueron en su totalidad positivas.

El análisis del cuestionario final realizado al personal de Blue Medical, reveló una percepción positiva en áreas críticas: los usuarios destacaron lo intuitivo del proyecto (pregunta 2) y confirmaron que cada uno de los módulos no solo cumplía con los requerimientos esperados, sino que superaba las capacidades de sus herramientas actuales (Preguntas 4, 7, 10, 13). De manera significativa, las respuestas evidenciaron cómo la dependencia de sistemas manuales como Excel podría ser superada por el prototipo, optimizando radicalmente sus procesos de gestión de equipos (pregunta 16). Aunque se indicó que el sistema sobrepasó las expectativas, se reconoce que existen futuras mejoras para construirlo como una herramienta que, a largo plazo, pueda convertirse en una solución de gran valor para hospitales en Latinoamérica.

Este trabajo se centró en el desarrollo e implementación de un prototipo para la gestión de equipos médicos para algunas de las sedes del hospital Blue Medical. El objetivo principal fue optimizar el control, mantenimiento y seguimiento de los activos mediante la centralización de la información, la automatización de la programación de mantenimientos y facilitación del análisis para la planificación de los recursos hospitalarios. Por medio de las siguientes secciones se evaluará el grado de cumplimiento de los objetivos específicos, con base en los resultados expuestos en las secciones anteriores.

Se cumplió satisfactoriamente el primer objetivo al implementar un prototipo de base de datos centralizada. Se demostró que el sistema es capaz de registrar individualmente cada equipo médico, almacenando su información identificativa (número de serie, modelo del equipo, sede de pertenencia), especificaciones técnicas (componentes, insumos, especificaciones técnicas) y el historial de su estado operativo. La capacidad de segmentar la información para distintos perfiles de usuario aseguró que los datos fueran accesibles sin sobrecargar la interfaz principal. Adicionalmente, la integración de un historial de uso mediante códigos QR permitió complementar el seguimiento del ciclo de vida de los equipos, cumpliendo así con todos los requerimientos planteados en el objetivo.

Se logró la integración del sistema de calendario, alcanzando el objetivo propuesto de notificar las fechas de mantenimiento para prolongar la vida útil de los equipos. Las pruebas funcionales confirmaron que el módulo genera mensajes preventivos para los mantenimientos programados. Además, el alcance se superó al incorporar un sistema de alertas para la gestión de contratos de proveedores. Este conjunto de características no solo asegura el seguimiento de los equipos, sino que también proporciona una herramienta para la gestión administrativa y la planificación presupuestaria del departamento.

El objetivo de optimizar el control de inventario y cuantificar el ahorro se alcanzó

parcialmente. Se logró optimizar el control de inventario y mantenimiento mediante la implementación de herramientas que facilitan la gestión de recursos, como el historial de uso de equipos y el módulo de administración de proveedores. Estas funcionalidades proporcionan los datos necesarios para una mejor planificación y toma de decisiones estratégicas. Sin embargo, no fue posible cuantificar el ahorro anual, ya que, debido a la confidencialidad de los datos financieros y al corto periodo de evaluación del prototipo es difícil poder brindar un resultado económico que pueda indicar el ahorro de esta herramienta a comparación de los procesos antiguos. La principal limitación identificada es la ausencia de un módulo de análisis económico directo que permita visualizar el costo-beneficio por equipo, lo cual representa una línea de trabajo futura para completar la optimización propuesta.

Se concluye que el objetivo final se alcanzó de manera parcial. El análisis operativo reveló que el prototipo introduce una gran mejora al crear un registro formal para el retiro y devolución de equipos, y tener notificaciones que previenen a los administradores a realizar un mantenimiento preventivo, en vez de depender de los mantenimientos correctivos y reducir el ciclo de vida de los equipos. No obstante, se identificó que el sistema actual no captura información cualitativa crítica, como las razones de una devolución o los detalles de una falla reportada por el operador. Esta falta de un módulo de comunicación integrado en el sistema fue identificada como el principal factor que limita una optimización del flujo de trabajo y la reducción de tiempos de respuesta del equipo. Por lo tanto, aunque el sistema sienta las bases para un mejor control, su impacto operativo depende de la implementación de funcionalidades de reporte de incidencias.

Este trabajo culminó con la entrega de un prototipo que valida la importancia de modernizar la gestión de equipos médicos en el entorno hospitalario. El sistema centraliza la información y automatiza las tareas de mantenimiento, resolviendo los desafíos técnicos planteados. El principal hallazgo del proyecto fue identificar la brecha existente entre las funcionalidades técnicas implementadas, y los procesos operativos y financieros del hospital. Las futuras actualizaciones del sistema deberán enfocarse en cerrar esta brecha, específicamente mediante la integración de módulos de análisis de costos y un sistema de reporte de fallos en tiempo real. Al hacerlo, el prototipo evolucionará de una herramienta de control de inventario a una plataforma integral de gestión de activos y optimización de recursos.

El prototipo funcional desarrollado ha representado una validación exitosa, cumpliendo con los requerimientos operativos iniciales definidos por el personal de Blue Medical y demostrando el potencial de la herramienta para optimizar la gestión de equipos. Sin embargo, para su transición de un entorno controlado de prueba a una implementación clínica real, es importante abordar una serie de limitaciones funcionales esenciales a su fase actual. Como primer punto la dependencia de una infraestructura de red local (LAN) restringe la escalabilidad y el acceso, la ausencia de un sistema de autenticación de usuarios compromete la integridad y confidencialidad de la información, y el alcance funcional actual deja sin explorar oportunidades clave para una gestión hospitalaria integral. Es por estos motivos que considero que el trabajo futuro se enfocará de manera estratégica en la actualización del sistema para transformarlo en una plataforma de gestión hospitalaria integral, segura y centralizada, capaz de soportar las operaciones críticas del entorno médico y generar valor a largo plazo mediante la automatización y el control avanzado de activos.

El sistema actual está implementado como una aplicación de escritorio que se ejecuta en una única estación de trabajo, conectada a la base de datos MySQL. Esta arquitectura presenta una limitación crítica: la falta de seguridad y centralización de datos. Múltiples usuarios no pueden acceder ni modificar la información de manera simultánea desde distintos dispositivos, ya que cada instalación opera de forma aislada. Adicionalmente, el proceso de instalación del prototipo resulta ineficiente, requiriendo la instalación manual tanto de la aplicación ejecutable como del gestor de base de datos en cada máquina, lo que dificulta su comunicación dentro del hospital y escalabilidad en un entorno hospitalario dinámico.

El prototipo carece de un sistema de control de acceso, lo que constituye una grave vulnerabilidad de seguridad. Actualmente, no existen mecanismos de autenticación (usuario/contraseña) ni de autorización (roles/permisos), permitiendo que cualquier individuo con acceso a la aplicación pueda visualizar y modificar registros sin restric-

ción alguna. Esta falla se extiende a la funcionalidad de los códigos QR, los cuales, al ser escaneados, otorgan acceso directo a la modificación de la información del equipo sin verificar la identidad del usuario. Esta exposición no solo compromete la integridad de los datos, sino que también elimina la trazabilidad de las acciones, haciendo imposible determinar quién realizó un cambio específico.

El alcance funcional del prototipo se concentra en la gestión de inventario y mantenimientos, omitiendo procesos proactivos y administrativos que son fundamentales para la optimización de recursos en el hospital. El sistema actual no soporta la gestión de ciclos de vida de equipos, como el seguimiento de calibraciones periódicas, lo cual es un requisito normativo y de seguridad. Asimismo, carece de módulos de comunicación estructurada que permitan una interacción eficiente entre el personal técnico y administrativo, o de herramientas para la recolección de retroalimentación, como reportes de incidencias. Esta limitación en su funcionalidad reduce su impacto potencial como herramienta estratégica para la planificación económica y la mejora continua de procesos.

Una mejora estratégica fundamental es la implementación de una infraestructura de servidor físico local, diseñado a la medida de las necesidades de la red hospitalaria. Esta aproximación ofrece ventajas críticas sobre soluciones en la nube pública, principalmente el control total sobre los activos y privacidad de los datos sensibles de los pacientes y la operación, una latencia de red mínima para las consultas internas y una mayor robustez en la seguridad. En lugar de un centro de datos gigante, propondría que se centre en la configuración de un servidor dedicado de formato compacto y eficiente, que albergaría la base de datos centralizada y el backend de la aplicación, el cual expondría una API RESTful para la comunicación segura con los clientes. Este servidor operaría dentro de la red privada del hospital, protegido por un firewall dedicado, y se podría interconectar con otras sedes mediante una Red Privada Virtual (VPN), garantizando un flujo de información cifrado, coherente y de alta velocidad, eliminando así las ineficiencias del modelo actual de estaciones de trabajo aisladas.

Para fortalecer la seguridad y expandir la utilidad estratégica del sistema, se propone la implementación simultánea de un módulo de Control de Acceso Basado en Roles (RBAC) y el desarrollo de módulos de gestión proactiva. La integración del RBAC es crucial para proteger la integridad de los datos, lo cual se lograría definiendo roles (Administrador, Técnicos, personal médico) con permisos específicos y utilizando un sistema de autenticación seguro que almacene contraseñas con *hashing* seguro (por ejemplo, bcrypt) y gestione sesiones mediante Tokens Web JSON (JWT) [26]. Paralelamente, se desarrollarían módulos funcionales clave: un Módulo de Gestión de Calibraciones, que ampliaría el esquema de la base de datos para registrar fechas y certificados, generando alertas automáticas para mantenimientos preventivos; y un Módulo de Reportes Anónimos, que facilitaría la comunicación de incidencias sin identificar al remitente. Estos nuevos módulos no solo mejorarían el cumplimiento normativo y la planificación de recursos, sino que también fomentarían una cultura de mejora continua, transformando el prototipo en una herramienta de gestión integral y de alto impacto para la institución.

La ejecución de algunas de estas actualizaciones propuestas consolidaría la viabilidad del enfoque tecnológico, transformando el prototipo en una solución lista para su implementación hospitalaria y clínica. Una vez transformada en una aplicación funcional, el sistema no solo resolverá las limitaciones operativas actuales, sino que esta abrirá las puertas a nuevas extensiones funcionales, como la integración con el sistema de información hospitalaria (HIS) o el desarrollo de una aplicación móvil para el personal de campo. La plataforma resultante serviría como una base sólida sobre la cual construir un ecosistema digital integral para la gestión de tecnología médica, posicionando a los hospitales guatemaltecos a la eficiencia y la seguridad del paciente y del personal hospitalario.

-
- [1] H. R. Tubac Tubac, «Propuesta de implementación de un área de ingeniería clínica para el manejo de equipo biomédico en el Hospital Roosevelt,» Tesis de Grado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2014.
 - [2] Transparencia Venezuela. «Crisis sanitaria: Hospitales muestran abandono y pérdidas. »dirección: <https://transparenciave.org/crisis-sanitaria-hospitales-muestran-abandono-y-perdidas/>
 - [3] M. García, J. López y A. Pérez, «Gestión del mantenimiento en hospitales: Un enfoque hacia la calidad y la eficiencia,» *Revista de Ingeniería Biomédica*, vol. 7, n.º 1, págs. 23-30, 2013.
 - [4] A. G., «Diagnóstico de la calibración del equipo biomédico en entidades de salud del departamento de risaralda,» *Revista de Salud Pública*, vol. 10, n.º 1, págs. 15-25, 2008. dirección: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/revsaludpublica/article/view/96709/80010>
 - [5] *Acuerdo Gubernativo 258-98, Decreto 27-2003, Acuerdo Ministerial 279-98*, Leyes y regulaciones de Guatemala, 2003.
 - [6] Organización Mundial de la Salud. «Nota informativa de la OMS para los usuarios relativa a los dispositivos médicos 2020/03. »dirección: <https://www.who.int/es/news/item/07-08-2020-who-information-notice-for-users-of-medical-devices-2020-3>
 - [7] Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, «Informe anual de infraestructura hospitalaria 2022-2023,» Ministerio de Salud Pública y Asistencia Social, 2023, Guatemala.
 - [8] Transparency International Guatemala, «Corrupción en salud: Un obstáculo para el desarrollo humano,» 2022, Guatemala.
 - [9] La Tercera. «La obsolescencia de la red pública hospitalaria. »dirección: <https://www.latercera.com/nacional/noticia/la-obsolescencia-la-red-publica-hospitalaria/260412/>

- [10] Red Ciudadana, «Informe Final: Nuestra Salud,» Red Ciudadana, inf. téc., 2020. dirección: https://publicaciones.redciudadana.org/2020/Nuestra%20Salud/INFORME%20FINAL_NUESTRA%20SALUD.pdf
- [11] C. D. O. Figueroa, «Análisis de capacidades institucionales del Ministerio de Salud en Guatemala: restricción democrática, desfinanciamiento, reformas y modelo de atención,» *Cadernos de Saúde Pública*, vol. 40, n.º 11, 2024. dirección: <https://doi.org/10.1590/0102-311xes027924>
- [12] M. d. l. A. Aguirre Ramos y A. F. Chitay Guamuch, «“Análisis de situación hospitalaria” Hospital Nacional de Jutiapa “Ernestina Garcia Vda. de Recinos” 2,004,» Repositorio de la Universidad de San Carlos de Guatemala, Tesis de pregrado, Universidad de San Carlos de Guatemala, 2005. dirección: <https://biblioteca.medicina.usac.edu.gt/tesis/pre/2005/001.pdf>
- [13] K. R., *A Comprehensive Cost-Benefit Analysis of Preventive Maintenance Versus Corrective Maintenance: Assessing the Financial Impact and Operational Benefits in Engineering*, ResearchGate, 2024. dirección: https://www.researchgate.net/publication/389501396_A_Comprehensive_Cost-Benefit_Analysis_of_Preventive_Maintenance_Versus_Corrective_Maintenance_Assessing_the_Financial_Impact_and_Operational_Benefits_in_Engineering
- [14] V. Flórez-García, «Mantenimiento de equipos biomédicos y su relación con la seguridad del paciente,» *Universidad y Salud*, vol. 20, n.º 3, págs. 203-205, 2018. dirección: <https://doi.org/10.22267/rus.182003.125>
- [15] L. Castrillón Gallego, *Introducción al Mantenimiento Biomédico*, 1.ª ed. Medellín, Colombia: Fondo Editorial ITM, 2007, ISBN: 978-958-98230-3-2. dirección: <https://repositorio.itm.edu.co/handle/20.500.12622/1984>
- [16] C. E. Montenegro Marín, «Diseño de un sistema informático para la gestión del mantenimiento de equipos médicos basado en la norma ISO/IEC 12207,» Repositorio Institucional de la UOC, Tesis de maestría, Universidad Oberta de Catalunya, 2017. dirección: <https://openaccess.uoc.edu/handle/10609/77484>
- [17] Beckman Coulter, *Mason District Hospital: Reducing manual inventory management time by 99%*, Recuperado el 7 de julio de 2025, n.d. dirección: <https://www.beckmancoulter.com/learning-and-events/case-studies/inventory-management>
- [18] Cardinal Health, *Helping clinicians focus on patient care: How North Kansas City Hospital transformed its cath lab supply chain*, Recuperado el 7 de julio de 2025, s.f. dirección: <https://www.cardinalhealth.com/en/solutions/wavemark-supply-management/resource-center/customer-success-stories/helping-clinicians-focus-on-patient-care.html>
- [19] IT Path Solutions, *Hospital Inventory Management Software: Revolutionizing Healthcare Operations*, Recuperado el 7 de julio de 2025, s.f. dirección: <https://www.itpathsolutions.com/hospital-inventory-management-software-revolutionizing-healthcare-operations/>
- [20] C. Genga, C. Pascual, S. Sanz y A. Pautasso, «Propuesta de sistema de gestión y monitoreo de equipamiento médico para un hospital universitario,» en *50 Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa (JAIIO)*, 2021. dirección: <https://50jaiio.sadio.org.ar/pdfs/cais/CAIS-01.pdf>

- [21] L. González, «Sistema para la gestión del equipamiento médico del Hospital Pediátrico Docente de Centro Habana,» Tesis de Diploma, Universidad de las Ciencias Informáticas, La Habana, Cuba, 2013. dirección: https://repositorio.uci.cu/jspui/bitstream/ident/8230/2/TD_06381_13.pdf
- [22] Instituto Nacional de Pediatría, *Introducción al inventario médico*, s.f. dirección: https://www.pediatria.gob.mx/archivos/burbuja/5_Introduccion_al_inventario_medico.pdf
- [23] Precognis, *Modelo Vista Controlador*, Accedido: 24 de noviembre de 2025, ago. de 2022. dirección: <https://www.precognis.com/blog/modelo-vista-controlador/>
- [24] Timly, *Equipos médicos: Inventario, gestión, características, seguimiento y costes*, s.f. dirección: <https://timly.com/es/equipos-medicos-inventario-gestion-caracteristicas-seguimiento-costes/>
- [25] S. Khalpada, *How The Heck Do QR Codes Work? (An Interactive Exploration)*, inglés, Accedido: 24 de noviembre de 2025, mayo de 2025. dirección: https://perthirtysix.com/how-the-heck-do-qr-codes-work?trk=public_post_comment-text
- [26] D. A. Gérault, O. Billet y D. Naccache, «On the Security of Password Hashing Schemes,» en *Applied Cryptography and Network Security*, R. H. Deng, J. Weng, J. Zhou y S. M. Yiu, eds., ép. Lecture Notes in Computer Science, vol. 11464, Cham: Springer International Publishing, 2019, págs. 497-516, ISBN: 978-3-030-21568-2. DOI: 10.1007/978-3-030-21568-2_28

-

Primer cuestionario sobre experiencia de equipos medicos de blue medical

Experiencia Equipos Medicos Blue Medical

Buenas tardes mi nombre es Héctor Andrés Ortiz Reyes, y por medio de este formulario me gustaria adelantar mi trabajo de tesis recolectando la información de doctores, encargados, y todos los los que hayan tenido experiencia utilizando equipos médicos dentro de Blue Medical con el fin de agregar la importancia y como les afecta la falta de equipos médicos que al día de hoy son algo importante para muchos tratamientos.

1. Nombre y puesto dentro de Blue Medical: *

Escriba su respuesta

2. ¿Aproximadamente cuantos años llevan trabajando dentro del hospital? *

Escriba su respuesta

3. ¿Utilizan equipos médicos para su zona de trabajo? *

Si

No

4. Comparando su trabajo en caso de haberlo experimentado, ¿han trabajado sin utilizar algún equipo médico, y que tanto ha cambiado utilizar herramientas para realizar algún tratamiento?

Escriba su respuesta

5. ¿En su experiencia, han tenido que suspender o cancelar algún procedimiento médico debido a fallas en los equipos? *

Si

No

6. En caso de requerir servicio técnico, ¿han tenido problemas con el tiempo de respuesta para la reparación o reposición de equipos? *

Si

No

7. Si la pregunta anterior fue Sí, responda el tiempo y que tanto afecto esta espera

Escriba su respuesta

8. ¿Considera que existe una falta de organización en el control de los equipos médicos en Blue Medical, particularmente en cuanto a su uso y la notificación oportuna de fallas? *

Escriba su respuesta

Encuesta final del prototipo al personal de Blue Medical

Cuestionario Final del Prototipo “TechMed” para Blue Medical

El cuestionario tiene como propósito de tener resultados finales para tener una guía de las ventajas y desventajas de este prototipo para la presentación de mi tesis y como parte de la presentación final que realizare en noviembre, es por ello que todas las respuestas tienen que ser escritas lo mas sincera y realista para que en el caso de que haya algún error o problema para arreglar, se pueda fundamentar como resultado y parte de la discusión de mi tesis.

Sección 1

1. Ingrese su nombre *

Escriba su respuesta

2. Cual es tu puesto de trabajo dentro de Blue Medical *

Escriba su respuesta

3. Comprendo que las preguntas y las respuestas para este formulario son para un trabajo de tesis y estoy de acuerdo con hacer esta encuesta *

- Si
- No

Opiniones criticas

4. ¿Qué les pareció el diseño estético del prototipo? *

Escriba su respuesta

5. ¿Qué tan intuitivo consideran que es este prototipo? *

Escriba su respuesta

6. ¿Conocen algún otro programa que tenga funciones similares que compitan o se asemejen a este prototipo? *

- Si
- No

Módulo Base de Datos de Equipos Médicos

7. ¿Qué les parece el módulo "Base de Datos de Equipos Médicos"? *

Escriba su respuesta

8. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario? *

Escriba su respuesta

9. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué? *

Escriba su respuesta

Módulo Gestor Códigos QR

10. ¿Qué les parece el módulo "Gestor Códigos QR"? *

Escriba su respuesta

11. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario? *

Escriba su respuesta

12. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué? *

Escriba su respuesta

Módulo Calendario y Notas

13. ¿Qué les parece el módulo "Calendario y Notas"? *

Escriba su respuesta

14. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario? *

Escriba su respuesta

15. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué? *

Escriba su respuesta

Módulo Lista de Proveedores

16. ¿Qué les parece el módulo "Lista de Proveedores"? *

Escriba su respuesta

17. ¿Consideran que este módulo abarca todas las funciones necesarias, o hace falta algún complemento para este módulo para mejorar la experiencia del usuario? *

Escriba su respuesta

18. ¿Qué le agregarías o quitarías a este módulo y por qué? *

Escriba su respuesta

Observaciones Finales

19. ¿Previo al prototipo como manejaban los problemas de dispositivos médicos? *

Escriba su respuesta

20. ¿Aproximada y económicamente cuanto invertían en todo el protocolo antiguo de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos al mes? *

Escriba su respuesta

21. ¿Aproximadamente cuánto tiempo invierten en realizar el protocolo de mantenimiento preventivo y correctivo de equipos médicos sin el prototipo? *

Escriba su respuesta

22. ¿Suponiendo el uso de este prototipo en el área administrativa o encargada de los equipos médicos, consideran que este prototipo ahorraría en algún proceso ya sea a nivel económico o de tiempo, por qué? *

Escriba su respuesta

23. ¿Hay alguna mejora que consideren importante o prioritaria que debería de contener este prototipo, que no posea actualmente según el manual o el video explicativo? *