



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS
INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA
HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Autor: Manuela Fernández-Olano D'Anglemont de Tassigny

Director: Antonio García de Garmendia

Madrid

Julio de 2025

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL
LÍBANO**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Manuela Fernández-Olano D'Anglemont de Tassigny

Fecha: ...09.../ ...07.../ ...2025...

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Antonio García de Garmendia

Fecha: ...09.../ ...07.../ ...2025...

Agradecimientos

En especial agradecimiento a mi abuelo, D. José María Fernández-Olano, Dr. Ingeniero de Minas, que siempre me ha empujado y motivado a lo largo de mi carrera.

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Autor: Fernández-Olano D'Anglemont de Tassigny, Manuela.

Director: García de Garmendia, Antonio.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto ha transformado el Centro Al Fadi con un sistema hidráulico y de climatización eficiente, apoyado por energías renovables, para mejorar las condiciones del hospital en el Líbano. Se logró una significativa mejora en el suministro de agua, mayor estabilidad frente a cortes eléctricos y una inversión sostenible que se amortiza en 20 años.

Palabras clave: Modernización, Sostenibilidad, Energía renovable, Agua, Climatización, Hospital, Líbano.

1. Introducción

El Proyecto presenta un análisis inicial del contexto y las problemáticas que afectan al Centro Al Fadi, un complejo hospitalario católico ubicado en la localidad montañosa de Chabrouh, Líbano. Este aborda los desafíos de sostenibilidad y acceso a recursos básicos en un contexto de crisis económica y energética desde 2019. Este complejo hospitalario católico, que incluye un hospital, hospedería, convento y tierras de cultivo, enfrenta problemas como un sistema hidráulico obsoleto, dependencia de generadores diésel y acondicionamiento térmico ineficiente, agravados por la contaminación del agua y un estrés hídrico del 79.7% en la región. La propuesta incluye soluciones técnicas como un sistema hidráulico eficiente, integración de energías renovables y mejoras térmicas, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 (agua limpia y saneamiento) y 7 (energía asequible y no contaminante), para garantizar atención médica, apoyar la producción agrícola y fortalecer la resiliencia comunitaria, estableciendo un modelo de sostenibilidad en regiones vulnerables.

2. Definición del Proyecto

El Proyecto subraya la escasez de agua potable como un desafío crítico, con una demanda diaria estimada de 49.000 litros para atender a 40 pacientes, 20 trabajadores del hospital, 30 huéspedes de la hospedería y 15 residentes del convento, además de las necesidades de riego de 5 hectáreas de tierras de cultivo, superando las capacidades actuales de captación y almacenamiento que dependen en un 80% de pozos y camiones cisterna. Se establecen los objetivos del proyecto, centrados en garantizar un suministro hídrico sostenible mediante la captación de agua de lluvia y la reutilización de aguas grises, implementar un sistema de climatización eficiente para el hospital con una demanda térmica de 109,8 kW, reducir la huella de carbono con energías renovables como la solar, y asegurar la viabilidad económica en un entorno de inflación, proponiendo una solución técnica que fomente la sostenibilidad y la resiliencia.

3. Descripción del Modelo

El modelo desarrollado para el Centro Al Fadi integra un sistema hidráulico adaptado a su entorno montañoso que cubre una demanda de 49.000 litros diarios distribuidos entre hospital, hospedería, convento, cultivos y estacionamiento, mediante una red optimizada en QGIS y EPANET que gestiona tanto agua potable como reciclada, apoyada en la captación de 3.028.000 litros anuales de lluvia, 13 tanques de 100.000 litros y un sistema de tratamiento con filtros de arena y cloro. Este diseño incluye también la reutilización de aguas grises para usos no potables y se ajusta a las variaciones estacionales de precipitación, aprovechando el terreno inclinado para el drenaje natural. Este sistema se ilustra en la imagen a continuación:

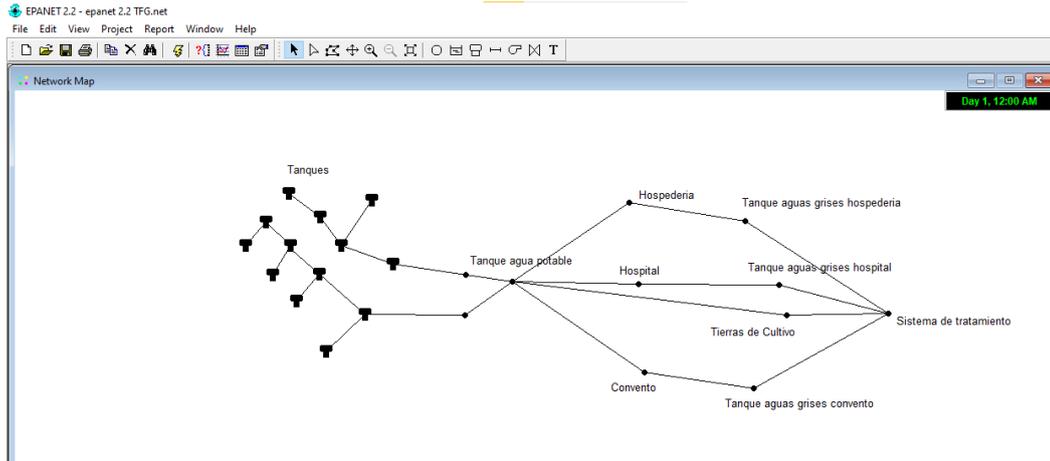


Figura 1: Modelo del sistema de distribución de aguas grises recicladas del Centro Al Fadi representado en EPANET 2.2 (Fuente: Elaboración propia 2025)

En paralelo, el sistema de climatización garantiza un entorno interior saludable con una demanda térmica de 109,8 kW cubierta mediante bombas de calor, paneles solares, chimeneas solares, techos verdes y un sistema de gestión inteligente que mantiene la temperatura entre 20 y 23 °C y una humedad del 55%, con un ahorro energético del 40% y una reducción anual de 22 toneladas de CO₂, alineándose con estándares internacionales y reforzando la resiliencia del hospital frente a la crisis energética libanesa. Se puede ver la organización del sistema en la siguiente figura:

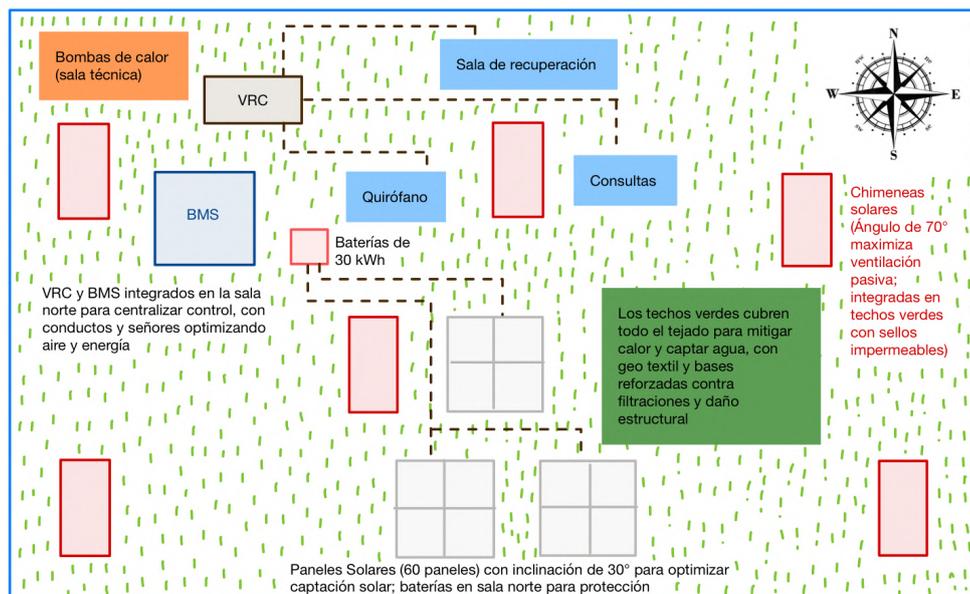


Figura 2: Vista aérea del sistema de climatización del hospital del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).

4. Resultados

El diseño hidráulico, modelado con EPANET y QGIS, asegura un suministro diario de 49.000 litros mediante la captación de 3.028.000 litros anuales de lluvia, distribuidos en 13 tanques de 100.000 litros y uno de 50.000 litros para potabilización, complementado con un sistema de reciclaje de aguas grises que permite reutilizar 8.500 litros diarios para usos no potables. Se identifican picos de consumo de hasta 1,6 l/s en horas de riego y actividad simultánea en los edificios, gestionados eficazmente por el sistema de almacenamiento y regulación. Por ejemplo, la siguiente grafica ilustra los picos de caudal según la demanda en las tierras de cultivo:

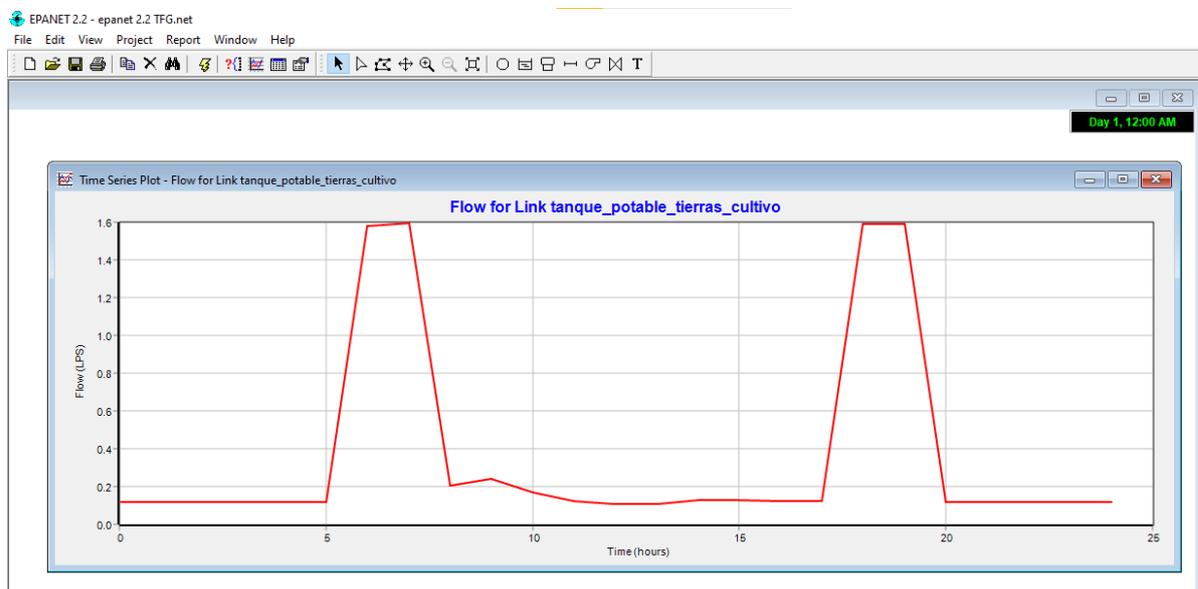


Figura 3: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque a las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)

El sistema de climatización híbrido logra un ahorro energético del 40 % respecto a sistemas convencionales gracias al uso de bombas de calor con un COP de 4,5, recuperación del 85 % del calor mediante ventilación con recuperación y una producción solar de 29.700 kWh anuales, que cubre el 30 % de la demanda energética del hospital (99.000 kWh). Además, se reducen 22 toneladas de CO₂ al año y se mantienen condiciones óptimas de confort térmico (20–23 °C, 55 % de humedad y <1000 ppm de CO₂), cumpliendo con los estándares ASHRAE y reforzando la sostenibilidad operativa del complejo frente a la crisis energética libanesa.

5. Conclusiones

El proyecto ha cumplido plenamente sus objetivos al modernizar el Centro Al Fadi mediante soluciones sostenibles que garantizan el suministro de agua, mejoran la eficiencia energética y reducen la huella de carbono en un contexto marcado por crisis estructurales. Se ha diseñado un sistema hidráulico circular que asegura 49.000 litros diarios mediante captación de lluvia y reciclaje de aguas grises, utilizando tanques modulares y tecnologías de bajo coste. En el ámbito de la climatización, se ha implementado un sistema híbrido basado en bombas de calor, ventilación con recuperación, chimeneas solares y energía fotovoltaica, logrando confort térmico, ahorro energético y operatividad durante cortes eléctricos. La inversión inicial, cuidadosamente planificada, se adapta al contexto libanés y garantiza la viabilidad económica a largo plazo. El proyecto aporta soluciones técnicas replicables en regiones vulnerables, mejora la calidad de vida de la comunidad, fortalece la seguridad alimentaria y posiciona al Centro Al Fadi como modelo de sostenibilidad hospitalaria, demostrando que la ingeniería puede integrarse con valores de solidaridad y servicio.

6. Referencias

- [ASEN15] Asensio, J. Á. (2015). *La bomba de calor*. AFEC.
- [ASHR09] ASHRAE. (2009). *ASHRAE STANDARD Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55-2004_ad55d_e_f_g.pdf
- [BINR25] Bin, R., Baten, A., Shrestha, M., Authors, C., Ullrich, F., Ba, W., Zahnd, K., & Mueller, M. (2025). *Impact of Hospital Closure on Rural Communities: A Qualitative Study*. <https://rupri.public-health.uiowa.edu/publications/policypapers/Rural%20Hospital%20Closures.pdf>

ENERGY OPTIMIZATION OF A HEALTHCARE FACILITY RESIDENCE IN LEBANON

Author: Fernández-Olano D'Anglemont de Tassigny, Manuela.

Supervisor: García de Garmendia, Antonio.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The project has transformed the Al Fadi Center with an efficient water and climate control system, supported by renewable energy sources, to improve the hospital's conditions in Lebanon. A significant improvement was achieved in water supply, greater resilience to power outages, and a sustainable investment with a 20-year payback period.

Keywords: Modernization, Sustainability, Renewable Energy, Water, Climate Control, Hospital, Lebanon.

1. Introduction

The project presents an initial analysis of the context and challenges affecting the Al Fadi Center, a Catholic hospital complex located in the mountainous region of Chabrouh, Lebanon. It addresses sustainability and access to basic resources amid the economic and energy crisis since 2019. The complex, comprising a hospital, guesthouse, convent, and agricultural lands, faces issues such as an outdated hydraulic system, reliance on diesel generators, and inefficient thermal conditioning, exacerbated by water contamination and a 79.7% water stress level in the region. The proposal includes technical solutions like an efficient hydraulic system, integration of renewable energies, and thermal improvements, aligned with Sustainable Development Goals 6 (clean water and sanitation) and 7 (affordable and clean energy), to ensure medical care, support agricultural production, and strengthen community resilience, establishing a model of sustainability for vulnerable regions.

2. Project Definition

The project highlights the scarcity of potable water as a critical challenge, with an estimated daily demand of 49,000 liters to serve 40 patients, 20 hospital workers, 30 guests at the guesthouse, and 15 residents of the convent, in addition to the irrigation needs of 5 hectares of farmland, exceeding the current collection and storage capacities, which rely 80% on wells and water trucks. The project objectives are established: to ensure a sustainable water supply through rainwater harvesting and greywater reuse; to implement an efficient climate control system for the hospital with a thermal demand of 109.8 kW; to reduce the carbon footprint through renewable energy sources such as solar power; and to ensure economic viability in an inflationary context by proposing a technical solution that promotes sustainability and resilience.

3. Model Description

The model developed for the Al Fadi Center integrates a hydraulic system adapted to its mountainous environment, covering a daily demand of 49,000 liters distributed among the hospital, guesthouse, convent, agricultural fields, and parking area. The system is optimized using QGIS and EPANET to manage both potable and recycled water, supported by the collection of 3,028,000 liters of rainwater annually, stored in 13 tanks of 100,000 liters each and treated through a system with sand and chlorine filters. The design also includes greywater reuse for non-potable purposes and is adapted to seasonal rainfall variations, taking advantage of the sloped terrain for natural drainage. This system is illustrated in the image below:

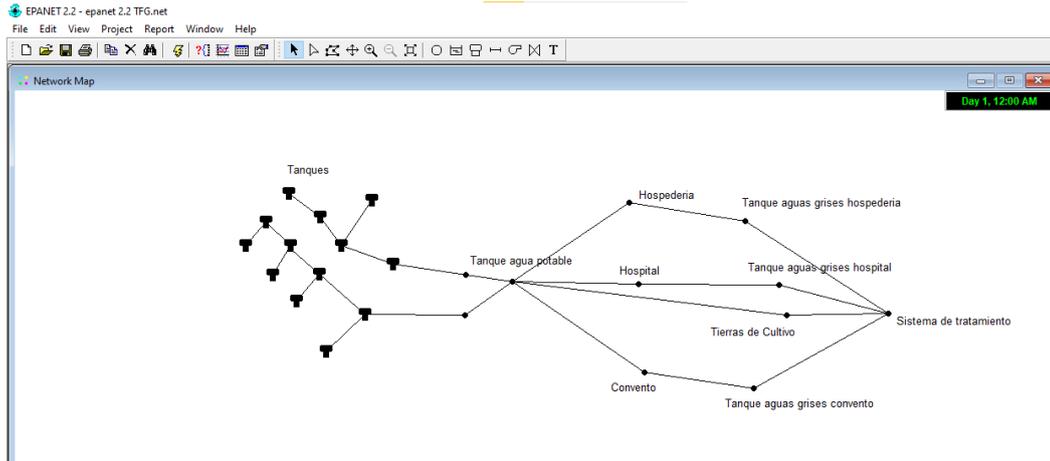


Figura 4: Model of the recycled greywater distribution system at the Al Fadi Center represented in EPANET 2.2 (Source: Own elaboration, 2025)

In parallel, the climate control system ensures a healthy indoor environment with a thermal demand of 109.8 kW covered by heat pumps, solar panels, solar chimneys, green roofs, and an intelligent management system that maintains temperatures between 20 and 23 °C and humidity at 55%. The system achieves a 40% energy savings and an annual reduction of 22 tons of CO₂ emissions, aligning with international standards and strengthening the hospital's resilience to the Lebanese energy crisis. The organization of the system is illustrated in the following figure:

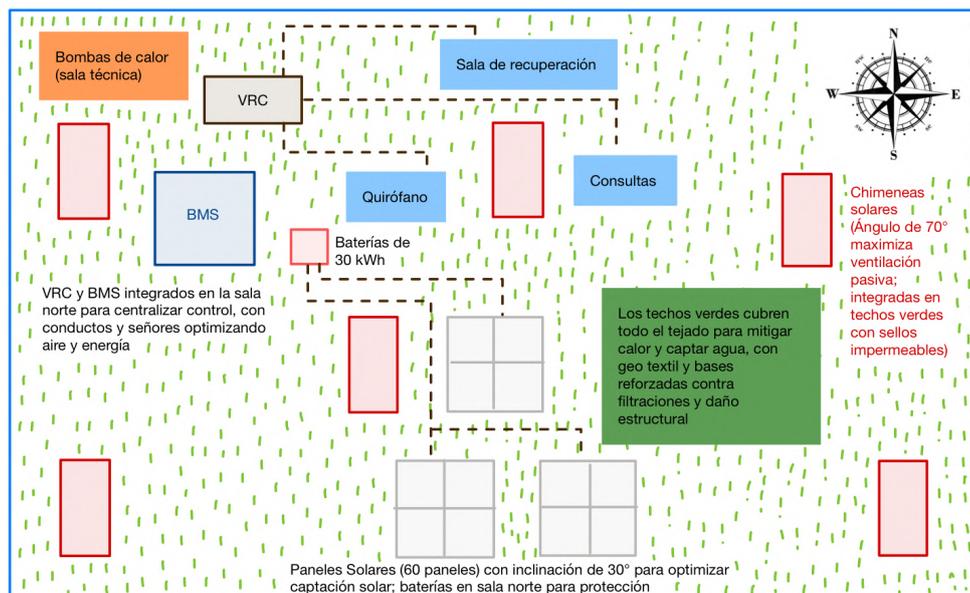


Figura 5: Aerial view of the hospital climate control system at the Al Fadi Center (Source: Own elaboration, 2025)

4. Results

The hydraulic design, modeled using EPANET and QGIS, ensures a daily water supply of 49,000 liters through the collection of 3,028,000 liters of rainwater annually, distributed across 13 tanks of 100,000 liters and one 50,000-liter tank for potable water. This is complemented by a greywater recycling system that allows for the reuse of 8,500 liters per day for non-potable purposes. Consumption peaks of up to 1.6 l/s are observed during irrigation hours and periods of simultaneous activity in the buildings, effectively managed by the storage and regulation system. For example, the following graph illustrates peak flow rates according to demand in the agricultural fields:

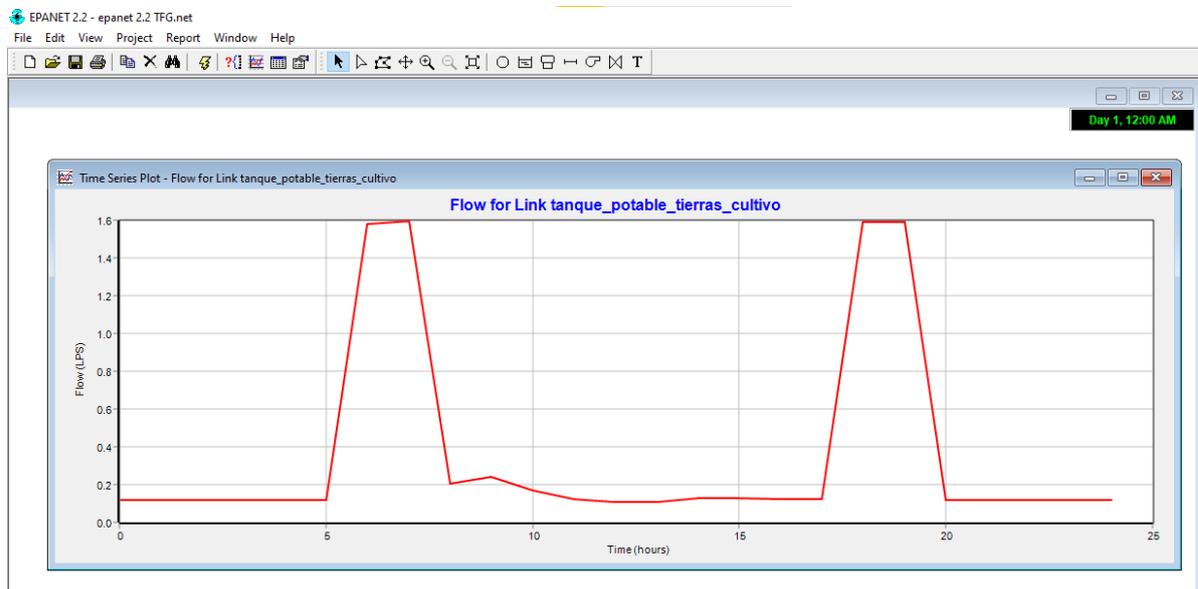


Figura 6: Flow rate summary (l/s) from the tank to the agricultural fields (Source: Own elaboration, 2025)

5. Conclusions

The project has fully achieved its objectives by modernizing the Al Fadi Center through sustainable solutions that ensure water supply, improve energy efficiency, and reduce the carbon footprint within a context marked by structural crises. A circular hydraulic system has been designed to guarantee 49,000 liters per day through rainwater harvesting and greywater recycling, using modular tanks and low-cost technologies. In terms of climate control, a hybrid system has been implemented, based on heat pumps, heat recovery ventilation, solar chimneys, and photovoltaic energy, achieving thermal comfort, energy savings, and operational continuity during power outages. The initial investment, carefully

planned, is adapted to the Lebanese context and ensures long-term economic viability. The project offers replicable technical solutions for vulnerable regions, improves the community's quality of life, strengthens food security, and positions the Al Fadi Center as a model of hospital sustainability—demonstrating that engineering can be integrated with values of solidarity and service.

6. References

- [ASEN15] Asensio, J. Á. (2015). *La bomba de calor*. AFEC.
- [ASHR09] ASHRAE. (2009). *ASHRAE STANDARD Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55-2004_ad55d_e_f_g.pdf
- [BINR25] Bin, R., Baten, A., Shrestha, M., Authors, C., Ullrich, F., Ba, W., Zahnd, K., & Mueller, M. (2025). *Impact of Hospital Closure on Rural Communities: A Qualitative Study*. <https://rupri.public-health.uiowa.edu/publications/policypapers/Rural%20Hospital%20Closures.pdf>

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	6
1.1 La sostenibilidad y el acceso a recursos básicos.....	6
1.1.1 El agua limpia y saneamiento	6
1.1.2 Energía asequible y no contaminante	8
1.2 El contexto socioeconómico del Líbano	10
1.3 Infraestructura hospitalaria en regiones vulnerables	15
1.4 Problemática actual: centro Al Fadi.....	19
1.5 Conclusión	20
Capítulo 2. Estado de la Cuestión	22
2.1 Sistemas Hidráulicos y Saneamiento en Hospitales de Regiones Vulnerables.....	22
2.2 Eficiencia Energética y Energías Renovables.....	24
2.3 Acondicionamiento Térmico y Resiliencia Climática	26
2.4 Impacto de la Obsolescencia y Cierres Hospitalarios	28
2.5 Gestión Ambiental y Sostenibilidad Hospitalaria	29
2.6 Conclusión	31
Capítulo 3. Definición del Proyecto	32
3.1 Descripción del Centro Al Fadi.....	32
3.2 Ubicación y Entorno	38
3.3 Demanda de Agua	41
3.4 Demanda de Climatización	44
3.5 Demanda Energética	48
3.6 Conclusión	50
Capítulo 4. Sistema Hidráulico	52
4.1 Análisis del Sistema	52
4.2 Diseño e Implementación.....	53
4.2.1 Captación de Agua de Lluvia.....	53
4.2.2 Almacenamiento y Distribución de Agua de Lluvia.....	56
4.2.3 Tratamiento y Reciclaje de Aguas Grises	62
4.2.4 Distribución de Aguas Grises Recicladas.....	64

4.3	Conclusión	68
Capítulo 5. Sistema de Climatización		69
5.1	Análisis del Sistema	69
5.2	Diseño e Implementación.....	71
5.2.1	Bombas de Calor Aire-Agua	72
5.2.2	Sistema de Ventilación con Recuperación de Calor (VRC).....	74
5.2.3	Paneles Solares Fotovoltaicos	75
5.2.4	Techos Verdes	76
5.2.5	Chimeneas Solares	77
5.2.6	Sistema de Gestión de Edificios (BMS).....	78
5.2.7	Esquema General del Sistema.....	79
5.3	Análisis de Rendimiento Esperado	80
5.4	Conclusión	81
Capítulo 6. Estimación Económica.....		82
6.1	Costes de Implementación del Proyecto	82
6.2	Amortización del Proyecto.....	86
6.3	Retorno de Inversión del Proyecto.....	86
6.4	Conclusión	88
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....		89
7.1	Logros Alcanzados.....	89
7.2	Objetivos Cumplidos y Aportaciones del Proyecto	91
7.3	Proyección a Futuro	92
7.4	Conclusión	92
Capítulo 8. Bibliografía.....		94

Índice de figuras

Figura 1: Modelo del sistema de distribución de aguas grises recicladas del Centro Al Fadi representado en EPANET 2.2 (Fuente: Elaboración propia 2025)	6
Figura 2: Vista aérea del sistema de climatización del hospital del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).	6
Figura 3: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque a las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)	7
Figura 4: Model of the recycled greywater distribution system at the Al Fadi Center represented in EPANET 2.2 (Source: Own elaboration, 2025).....	11
Figura 5: Aerial view of the hospital climate control system at the Al Fadi Center (Source: Own elaboration, 2025)	11
Figura 6: Flow rate summary (l/s) from the tank to the agricultural fields (Source: Own elaboration, 2025).....	12
Figura 7: Proporción de masas de agua con buena calidad del agua del medio ambiente, 2017-2020 (porcentaje) (Fuente: ONU 2023)	7
Figura 8: Niveles de estrés hídrico en 2021 (porcentaje) (Fuente: UN 2024).....	8
Figura 9: Participación de fuentes renovables en el consumo final de energía y por uso final, 2015 y 2021 (porcentaje) (Fuente: UN 2024)	9
Figura 10: Capacidad instalada para la generación de electricidad renovable, 2015 y 2022 (vatios per cápita) (Fuente: UN 2024).....	10
Figura 11: Promedio de suministro de agua residencial en horas por semana (Fuente: Fayssal et al., 2024)	11
Figura 12: Porcentaje de la población que depende de camiones cisterna para el suministro de agua (Fuente: Fayssal et al., 2024)	12
Figura 13: Fuentes de energía utilizadas para extraer agua de los acuíferos subterráneos (Fuente: Fayssal et al., 2024).....	13

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 14: Fuentes de energía utilizadas para la distribución de agua (Fuente: Fayssal et al., 2024).....	13
Figura 15: Porcentaje de unidades residenciales, comerciales e industriales con paneles solares fotovoltaicos (Fuente: Fayssal et al., 2024).....	14
Figura 16: Porcentaje de viviendas residenciales con calentador solar de agua (Fuente: Fayssal et al., 2024)	14
Figura 17: Esquema general de una microred (Fuente: Gaona García et al., 2017).....	26
Figura 18: Esquema del principio de funcionamiento de una chimenea solar (Fuente: Hendzel & Claudio, 2024).....	27
Figura 19: Sostenibilidad ambiental en los centros de salud (Fuente: WHO 2020).....	30
Figura 20: Marco para el desarrollo de centros de salud resilientes al clima y ambientalmente sostenibles (Fuente: WHO 2020)	30
Figura 21: Vista del exterior del centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano (Fuente: Google Maps, Agosto 2017)	34
Figura 22: Vistas desde el patio central del centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano (Fuente:Google Maps, Julio 2017)	34
Figura 23: Vistas del interior del recinto y del entorno del centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano (Fuente: Google Maps, Enero 2021).....	35
Figura 24: Plano general del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).....	38
Figura 25: Vista amplia mapa de ubicación del Centro Al Fadi (Fuente: Google Maps 2025)	39
Figura 26: Vista detallada mapa de ubicación del Centro Al Fadi (Fuente: Google Maps 2025).....	39
Figura 27: Vista aérea mapa de ubicación del Centro Al Fadi (Fuente: Google Maps 2025)	40
Figura 28: Esbozo planta hospital Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)	45

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Figura 29: Área medida del Centro Al Fadi mediante el software QGIS (Fuente: Elaboración propia 2025).....	55
Figura 30: Modelo del sistema de almacenamiento y distribución de agua del Centro Al Fadi representado en EPANET 2.2 (Fuente: Elaboración propia 2025)	57
Figura 31: Resumen de la presión (mca) para el tanque de agua potable (Fuente: Elaboración propia 2025).....	57
Figura 32: Resumen de la presión (mca) para el hospital (Fuente: Elaboración propia 2025)	58
Figura 33: Resumen de la presión (mca) para la hospedería (Fuente: Elaboración propia 2025).....	58
Figura 34: Resumen de la presión (mca) para el convento (Fuente: Elaboración propia 2025)	59
Figura 35: Resumen sobre la presión (mca) para las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025).....	59
Figura 36: Resumen del caudal (l/s) desde los tanques de captación al tanque de agua potable (Fuente: Elaboración propia 2025)	60
Figura 37: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque al hospital (Fuente: Elaboración propia 2025).....	60
Figura 38: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque a la hospedería (Fuente: Elaboración propia 2025).....	61
Figura 39: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque al convento (Fuente: Elaboración propia 2025).....	61
Figura 40; Resumen del caudal (l/s) desde el tanque a las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)	62
Figura 41: Modelo del sistema de distribución de aguas grises recicladas del Centro Al Fadi representado en EPANET 2.2 (Fuente: Elaboración propia 2025)	65
Figura 42: Resumen de todos los caudales (l/s) procedentes de los tanques de aguas grises al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025).....	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 43: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque de aguas grises del hospital al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)	66
Figura 44: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque de aguas grises de la hospedería al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)	66
Figura 45: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque de aguas grises del convento al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)	67
Figura 46: Resumen del caudal (l/s) desde el sistema de tratamiento a las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)	67
Figura 47: Diagrama de flujo de las fases del proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025)	72
Figura 48: Esquema simplificado de una bomba de calor aire-agua. (Fuente: Libro la Bomba de Calor de AFEC)	73
Figura 49: Diagrama de ubicación de las bombas de calor en el hospital del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).	74
Figura 50: Esquema de funcionamiento de un sistema de VRC (Fuente: Arrevol Arquitectos 2017)	75
Figura 51: Esquema del principio de funcionamiento de una chimenea solar (Fuente: Hendzel & Claudio, 2024)	77
Figura 52: Protocolos comunes BMS (Fuente: Extron 2016)	78
Figura 53: Vista aérea del sistema de climatización del hospital del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).	79
Figura 54: Vista lateral del tejado del hospital del Centro Al Fadi, mostrando paneles solares a 30° y chimeneas solares a 70° (Fuente: Elaboración propia 2025)	80

Índice de tablas

Tabla 1: Resumen de componentes y ocupación del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).....	33
Tabla 2: Condiciones Climáticas de Faraya y su Impacto en el Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)	37
Tabla 3: Resumen de la demanda de agua del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).....	43
Tabla 4: Resumen de la demanda de climatización del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).....	47
Tabla 5: Resumen de la demanda energética del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).....	49
Tabla 6: Resumen Breve de Demandas de Agua, Climatización y Energía del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)	50
Tabla 7: Resumen de la demanda de climatización del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).....	70
Tabla 8: Costes de implementación del proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025).....	85
Tabla 9: Tabla de amortización del Proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025).....	86
Tabla 10: Tabla del punto de equilibrio del Proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025) .	87

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Vivimos en un mundo en el que la sostenibilidad y la eficiencia energética se han convertido en pilares fundamentales. Por lo tanto, es esencial que las infraestructuras como pueden ser hospitales o centros comunitarios tengan acceso a soluciones modernas que garanticen su funcionamiento óptimo. Estas tienen que estar en acorde con el respeto hacia el medio ambiente y han de proporcionar fácil acceso a las comunidades que dependen de ellos. El proyecto que se presenta a continuación se enmarca en esta visión, centrándose en la modernización del Centro Al Fadi, un complejo hospitalario católico situado en Chabrouh, Líbano. Este centro no solo brinda atención médica, sino que también cumple un papel crucial en la vida espiritual, social y económica de la región, albergando una hospedería, un convento y extensas tierras de cultivo.

1.1 LA SOSTENIBILIDAD Y EL ACCESO A RECURSOS BÁSICOS.

La sostenibilidad se basa en un principio sencillo pero profundo: satisfacer nuestras necesidades sin comprometer las de las próximas generaciones. Esto incluye el acceso a agua limpia, energía asequible y condiciones adecuadas de confort térmico, especialmente en entornos vulnerables. En términos de agua potable y su saneamiento

1.1.1 EL AGUA LIMPIA Y SANEAMIENTO

Asegurar el acceso universal a agua potable y saneamiento es uno de los pilares fundamentales del desarrollo humano y sostenible. Aunque en la última década se han logrado avances significativos en las zonas rurales, los datos más recientes reflejan que el progreso es insuficiente y desigual. Entre 2015 y 2022, la proporción de la población mundial con acceso a agua potable gestionada de forma segura aumentó del 69 % al 73 %. Sin embargo, en 2022 aún había 2.200 millones de personas sin acceso a agua potable segura, de las cuales 703 millones no contaban siquiera con un servicio básico —es decir, seguían dependiendo de fuentes remotas, poco fiables o contaminadas.

La situación es aún más preocupante en materia de saneamiento. Aunque la cobertura de servicios de saneamiento gestionados de manera segura creció del 49 % al 57 % entre 2015

y 2022, 3.500 millones de personas aún carecen de servicios adecuados, y cerca de 419 millones practican la defecación al aire libre, una realidad que afecta directamente a la salud pública, la dignidad y la calidad de vida, especialmente de mujeres y niños. Además, la higiene básica también sigue siendo un reto: 2.000 millones de personas no disponen de instalaciones adecuadas para lavarse las manos con agua y jabón en sus hogares.

El problema no es solo de acceso, sino también de calidad y tratamiento. Aproximadamente el 58 % de las aguas residuales domésticas se tratan de manera segura, y este porcentaje es aún menor en países de bajos ingresos, donde los sistemas de monitoreo y tratamiento están subdesarrollados o son inexistentes. Esto supone una amenaza ambiental directa y un riesgo sanitario estructural para miles de millones de personas. Este problema se ve agravado por la contaminación de fuentes hídricas, la urbanización sin planificación y el cambio climático.¹ La siguiente grafica indica que entre el 0 % y el 20 % de las masas de agua evaluadas en el Líbano tienen buena calidad ambiental. Esto implica que la gran mayoría del agua superficial (ríos, embalses, lagos) del país está contaminada o no cumple con los estándares ambientales mínimos.

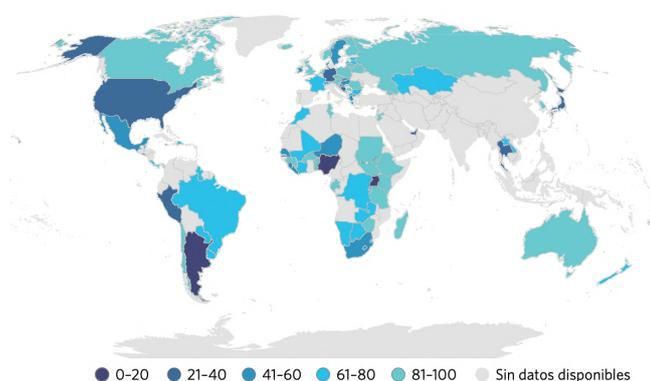
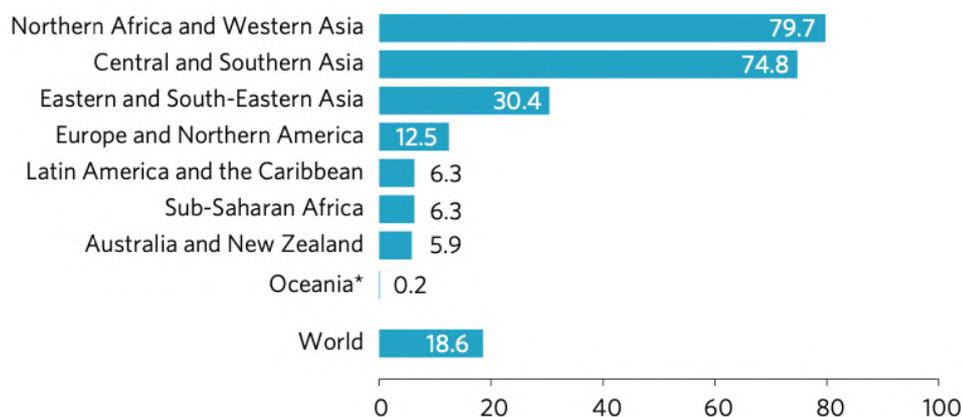


Figura 7: Proporción de masas de agua con buena calidad del agua del medio ambiente, 2017-2020 (porcentaje) (Fuente: ONU 2023)

Además, el estrés hídrico está aumentando a escala global. En 2021, alrededor de la mitad de la población mundial sufrió escasez de agua durante al menos parte del año, y un cuarto enfrentó niveles extremadamente altos de estrés hídrico. El Líbano se encuentra en la región de África del Norte y Asia Occidental, que en conjunto alcanza un 79,7 % de estrés hídrico, una de las cifras más críticas del mundo. Esto significa que se extrae casi toda el agua dulce

¹ Naciones Unidas, 2023

disponible (más del 75 %), lo que compromete gravemente la sostenibilidad del recurso. Este nivel de extracción es extremadamente alto y expone al país a riesgos de agotamiento de acuíferos, conflictos por el agua, y dependencia energética para su extracción, tratamiento y distribución. Esto se puede observar en la gráfica a continuación²:



* Excluding Australia and New Zealand.

Figura 8: Niveles de estrés hídrico en 2021 (porcentaje) (Fuente: UN 2024)

En este contexto, la ONU advierte que, para alcanzar la cobertura universal de agua y saneamiento para 2030, será necesario multiplicar por seis la tasa de progreso actual en agua potable, por cinco en saneamiento y por tres en higiene. Alcanzar estos objetivos exige inversiones sostenidas, una mejor coordinación intersectorial, cooperación internacional y soluciones técnicas innovadoras adaptadas a cada territorio.³

1.1.2 ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

Entre 2015 y 2021, la proporción de energías renovables en el consumo energético final global creció del 16,7 % al 18,7 %. Si se excluyen los usos tradicionales de biomasa (como la leña), la proporción de fuentes modernas aumentó del 10 % al 12,5 %. Esta expansión ha sido liderada principalmente por el sector eléctrico, donde las renovables pasaron de representar el 22,9 % del consumo total en 2015 al 28,2 % en 2021, gracias a la caída de costes de tecnologías como la solar y la eólica.

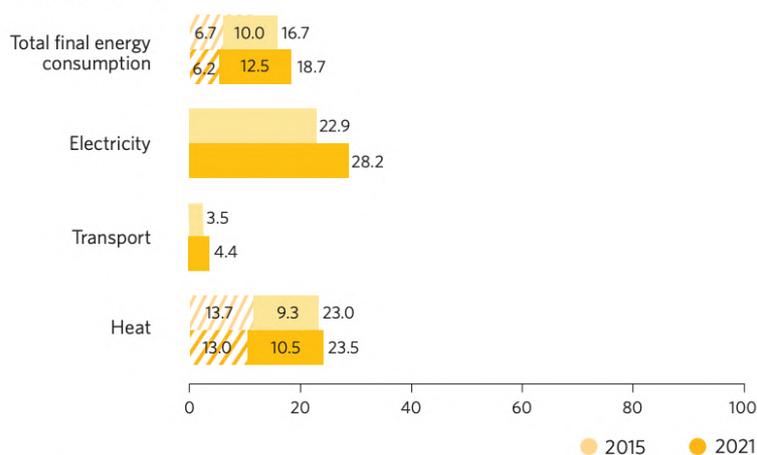
² United Nations, 2024

³ Naciones Unidas, 2023

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

En cambio, el uso de renovables sigue siendo muy limitado en calefacción (23,5 %) y transporte (4,4 %), sectores que en conjunto representan el 80 % del consumo energético mundial. Esto evidencia que, aunque el sector eléctrico ha avanzado con fuerza, el cambio global hacia una energía limpia aún está incompleto y enfrenta importantes desafíos fuera del ámbito eléctrico. Esto es demostrado por la siguiente gráfica:⁴

Share of renewable sources in final energy consumption and by end use, 2015 and 2021 (percentage)



Note: The solid area of each bar represents modern renewable sources, and the striped area represents traditional use of biomass.

Figura 9: Participación de fuentes renovables en el consumo final de energía y por uso final, 2015 y 2021 (porcentaje) (Fuente: UN 2024)

En la gráfica a continuación podemos ver que la capacidad instalada mundial para generar electricidad con fuentes renovables casi se duplicó entre 2015 y 2022, pasando de 250 a 424 vatios por persona. En países en desarrollo, esta capacidad creció de 155 a 293 W/hab, mientras que en países desarrollados subió de 691 a 1.073 W/hab.

⁴ United Nations, 2024

**Installed capacity for renewable electricity generation, 2015 and 2022
(watts per capita)**

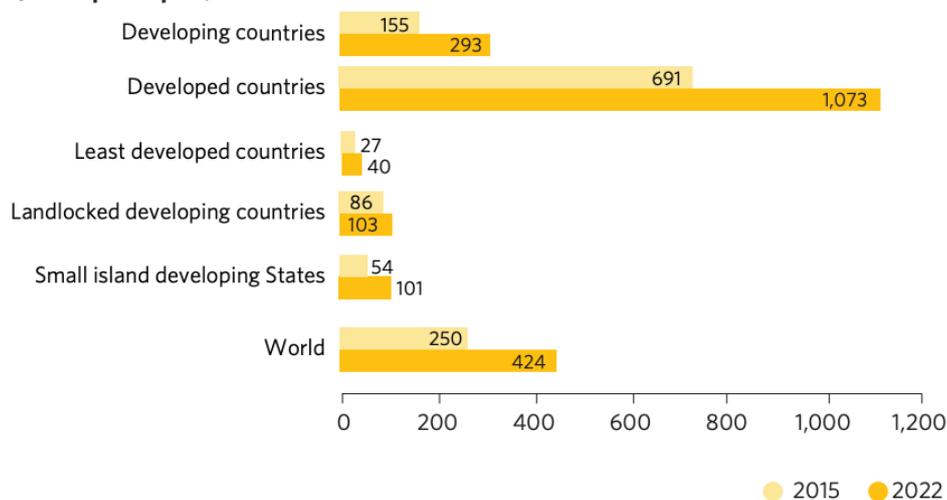


Figura 10: Capacidad instalada para la generación de electricidad renovable, 2015 y 2022 (vatios per cápita) (Fuente: UN 2024)

Sin embargo, las desigualdades son notables:

- Los países menos adelantados (LDCs) solo alcanzaron 40 W/hab.
- Los países en desarrollo sin litoral (LLDCs), 103 W/hab.
- Los pequeños Estados insulares en desarrollo (SIDS), 101 W/hab.

A este ritmo, los países más rezagados necesitarían entre 11 y 41 años para alcanzar los niveles actuales de los países en desarrollo. Esto deja en evidencia la necesidad urgente de cerrar la brecha energética global mediante inversiones específicas y tecnologías adaptadas.

1.2 EL CONTEXTO SOCIOECONÓMICO DEL LÍBANO

Desde 2019, el Líbano atraviesa una de las crisis más profundas de su historia reciente. Según el Banco Mundial, se trata de una de las tres crisis económicas más graves a nivel global desde mediados del siglo XIX, resultado de una combinación de deuda estructural, políticas fiscales insostenibles, colapso bancario y un prolongado bloqueo político.

La raíz del problema eléctrico se remonta décadas atrás. El sistema de producción está obsoleto, las pérdidas técnicas superan el 40 % de la energía generada, y la gestión se ha caracterizado por corrupción, subsidios ineficaces y dependencia casi total de los

combustibles fósiles. Además, el Parlamento ha bloqueado sistemáticamente reformas y proyectos de ampliación de la capacidad desde 1992.⁵

El colapso del sistema eléctrico ha impactado de lleno en el suministro de agua, ya que las bombas y sistemas de tratamiento requieren energía. El suministro semanal de agua pasó de 49 horas en 2019 a apenas 22 en 2023, forzando a un 44 % de los hogares a recurrir a camiones cisterna privados (frente al 26 % en 2019). Aunque el país dispone de recursos hídricos teóricamente suficientes (estimados entre 5.9 y 6.6 mil millones de m³ anuales), su gestión es deficiente, y la gobernanza se ve fragmentada entre múltiples organismos (Ministerio de Energía y Agua, autoridades locales y entidades autónomas como la Litani River Authority). La falta de una base de datos nacional integrada impide una gestión eficaz y equitativa de los recursos hídricos.

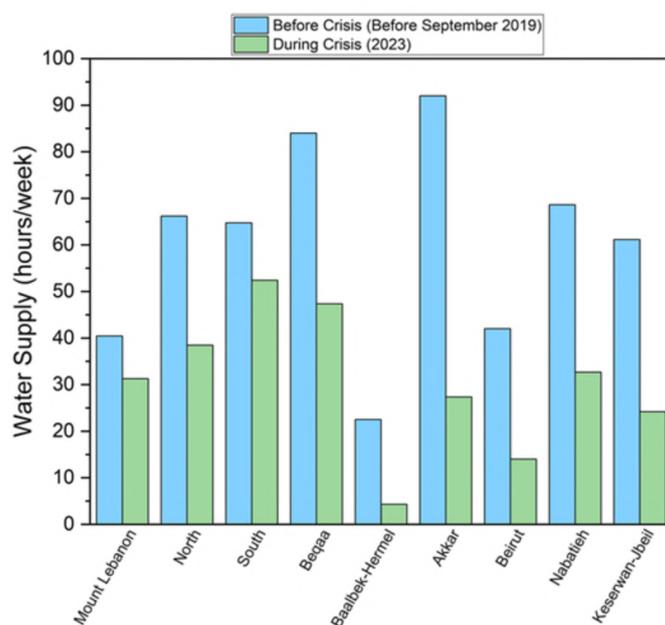


Figura 11: Promedio de suministro de agua residencial en horas por semana (Fuente: Fayssal et al., 2024)

⁵ (KARAM, 2018)

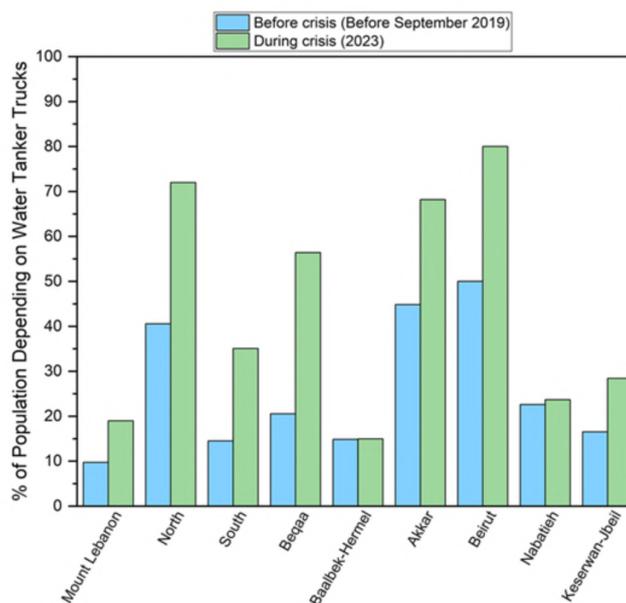


Figura 12: Porcentaje de la población que depende de camiones cisterna para el suministro de agua
(Fuente: Fayssal et al., 2024)

Además, gran parte de las infraestructuras de distribución y almacenamiento están deterioradas por la falta de mantenimiento, agravada por la inflación, la dolarización parcial de los costes de reparación y la carencia de materiales. Esto ha generado problemas graves de calidad del agua, incluyendo brotes de enfermedades como el cólera desde 2022.⁶

Frente a esta realidad, han surgido iniciativas ciudadanas y municipales que apuestan por la energía solar como vía de escape. El uso de placas solares en viviendas, comercios e instalaciones de agua ha crecido notablemente: por ejemplo, el uso de energía solar para bombeo de agua subterránea alcanza ya el 4.8 %, y los calentadores solares pasaron del 7.9 % al 15.4 % en solo tres años.

⁶ Fayssal et al., 2024

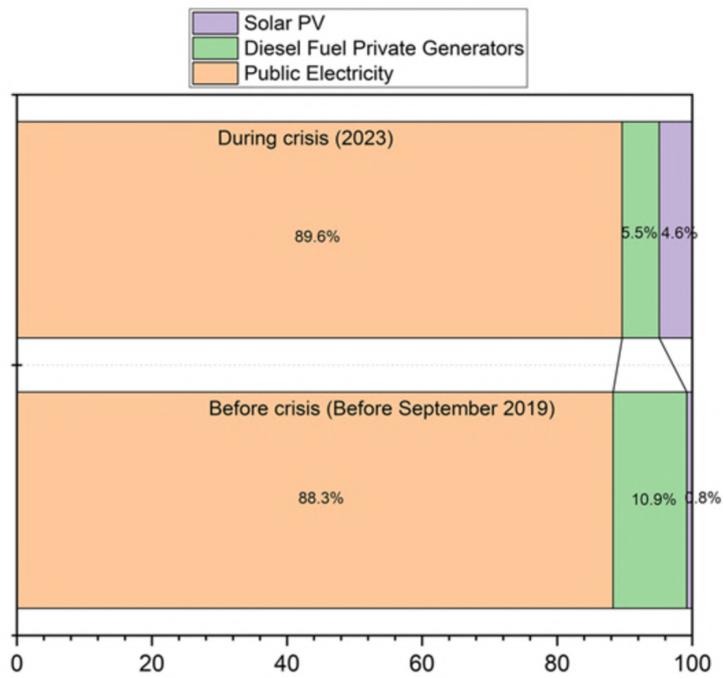


Figura 13: Fuentes de energía utilizadas para extraer agua de los acuíferos subterráneos (Fuente: Fayssal et al., 2024)

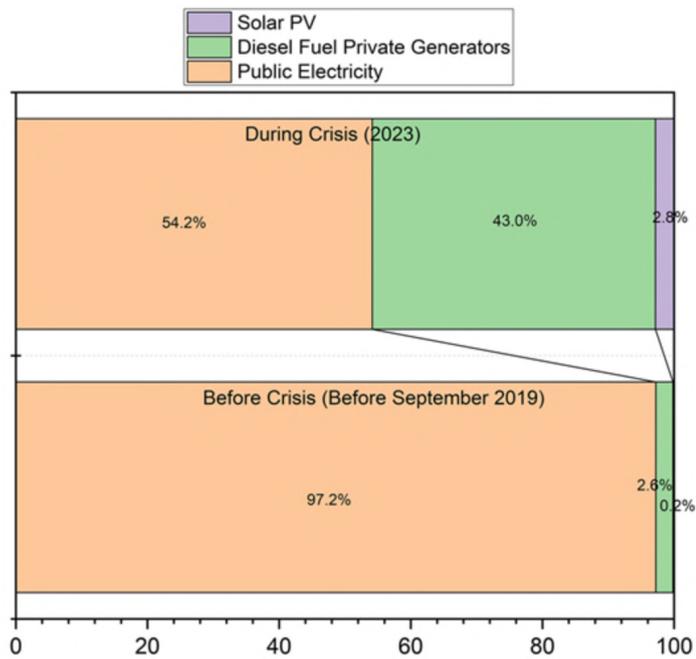


Figura 14: Fuentes de energía utilizadas para la distribución de agua (Fuente: Fayssal et al., 2024)

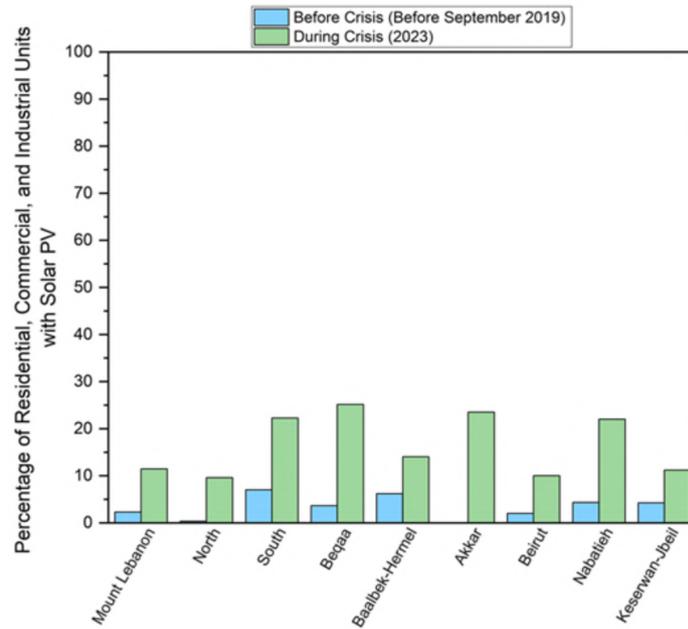


Figura 15: Porcentaje de unidades residenciales, comerciales e industriales con paneles solares fotovoltaicos (Fuente: Fayssal et al., 2024)

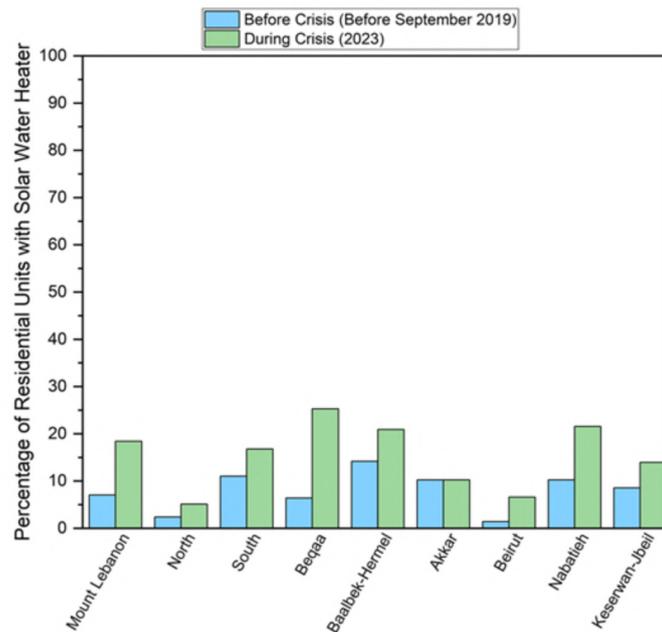


Figura 16: Porcentaje de viviendas residenciales con calentador solar de agua (Fuente: Fayssal et al., 2024)

La Estrategia Nacional del Agua 2024–2035, publicada por el Ministerio de Energía y Agua, reconoce que uno de los principales desafíos para el sector es la falta de coordinación entre actores: más de 15 entidades distintas intervienen en el ciclo del agua, sin bases de datos

comunes, sin planificación integrada y sin monitoreo unificado. Además, la financiación es muy limitada. La estrategia propone impulsar tecnologías descentralizadas y energías renovables, pero requiere reformas legales urgentes y cooperación internacional para evitar el colapso total del sistema.⁷

1.3 INFRAESTRUCTURA HOSPITALARIA EN REGIONES VULNERABLES

En regiones vulnerables, donde conflictos armados, desastres naturales, crisis económicas y políticas de inestabilidad son comunes, las infraestructuras hospitalarias enfrentan desafíos críticos que limitan su capacidad para proporcionar servicios de salud esenciales. Estas áreas suelen depender de instalaciones que son obsoletas, están mal mantenidas o carecen de los recursos necesarios para atender a poblaciones que, a menudo, viven en condiciones de extrema precariedad. En el Líbano, por ejemplo, la crisis económica desde 2019, combinada con una crisis energética sin precedentes, ha llevado a los hospitales a operar con generadores diésel durante cortes de electricidad prolongados, enfrentándose a la escasez de combustible y suministros médicos vitales.⁸ Esta situación no solo compromete la calidad de la atención sanitaria, sino que también pone en riesgo la vida de pacientes que dependen de equipos médicos sensibles a interrupciones de energía, como ventiladores o máquinas de diálisis. Este contexto resalta la urgencia de modernizar las infraestructuras hospitalarias para garantizar su operatividad, resiliencia y capacidad de respuesta ante emergencias. El Centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano, refleja estas problemáticas, ya que su sistema hidráulico ineficiente y su dependencia de fuentes de energía no renovables restringen su funcionamiento, evidenciando la necesidad de soluciones sostenibles que integren tecnologías innovadoras y enfoques adaptados al entorno local.

La vulnerabilidad de las infraestructuras hospitalarias en regiones afectadas por crisis se pone de manifiesto especialmente durante eventos catastróficos como desastres naturales. Un estudio detallado sobre el terremoto de Chile en 2010 reveló que el 90% de los hospitales

⁷ Resilient water solutions against climate change , 2024

⁸ Nickerson et al., 2015

públicos en las zonas afectadas sufrieron daños estructurales o funcionales, y el 20% quedaron completamente fuera de servicio, debido a la antigüedad promedio de 40 años de las instalaciones y a la falta de mantenimiento preventivo.⁹ Este evento dejó en evidencia cómo la obsolescencia de las infraestructuras puede agravar las consecuencias de una crisis, aumentando la incidencia de infecciones nosocomiales y retrasando la atención a pacientes críticos. En contextos similares, como Siria, donde solo el 65% de los hospitales públicos son plenamente funcionales debido a más de una década de conflicto armado, la implementación de sistemas solares fotovoltaicos ha permitido mitigar la inestabilidad energética, asegurando el funcionamiento de equipos médicos esenciales durante cortes de electricidad.¹⁰ Estas soluciones no solo reducen la dependencia de combustibles fósiles, sino que también disminuyen los costos operativos, permitiendo redirigir recursos a otras necesidades críticas. Para el Centro Al Fadi, la propuesta de integrar paneles solares busca garantizar un suministro energético estable, siguiendo ejemplos de sostenibilidad que han demostrado ser efectivos en contextos de crisis prolongadas, al tiempo que se alinea con los principios de autonomía y eficiencia energética.

El acceso al agua potable y el saneamiento representa otro desafío fundamental en regiones vulnerables, donde la infraestructura básica a menudo está dañada o es inexistente. La Organización Mundial de la Salud subraya que la falta de sistemas hidráulicos adecuados en hospitales incrementa significativamente el riesgo de infecciones nosocomiales, como las causadas por bacterias resistentes, y compromete la seguridad de los pacientes y el personal médico. En Gaza, el sistema HeRAMS ha identificado que numerosas instalaciones de salud carecen de servicios básicos de agua y saneamiento debido a los conflictos prolongados, lo que limita su capacidad para realizar procedimientos quirúrgicos o mantener estándares de higiene adecuados.¹¹ En Sudán, la implementación de HeRAMS en Darfur ha permitido mapear estas carencias, facilitando la coordinación de respuestas humanitarias para abordar necesidades críticas de agua y saneamiento.¹² En el caso del Centro Al Fadi, el diseño de un sistema hidráulico que conecte la hospedería, el convento, el hospital y las tierras de cultivo

⁹ Torres Contreras , 2015

¹⁰ WHO, 2024

¹¹ United Nations, 2024

¹² Nickerson et al., 2015

responde a esta problemática, asegurando un suministro de agua eficiente y sostenible. Esta solución no solo mejora la operatividad del complejo, sino que también contribuye a la seguridad alimentaria de la comunidad al irrigar tierras de cultivo, alineándose con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 sobre agua limpia y saneamiento, y promoviendo la salud integral de la región.

La sostenibilidad ambiental es un pilar clave en la modernización de las infraestructuras hospitalarias, especialmente en regiones donde los recursos son escasos y las crisis recurrentes. En el Pacífico, iniciativas de desarrollo de sistemas de salud han promovido el uso de tecnologías verdes, como paneles solares, sistemas de captación de agua de lluvia y diseños arquitectónicos resilientes, para reducir la huella de carbono y aumentar la capacidad de los hospitales para operar durante emergencias.¹³ Por ejemplo, en hospitales de las islas del Pacífico, estas tecnologías han permitido mantener servicios críticos durante ciclones, cuando las redes eléctricas colapsan, al tiempo que reducen significativamente los costos energéticos. En el Líbano, la adopción de sistemas solares en hospitales ha generado ahorros de hasta 125.000 dólares anuales, permitiendo redirigir fondos a la compra de medicamentos y la retención de personal médico, un recurso crítico en un país que ha perdido a miles de profesionales de la salud debido a la emigración.¹⁴ Para el Centro Al Fadi, la incorporación de energías renovables, como paneles solares, y la optimización del acondicionamiento térmico no solo aborda la crisis energética local, sino que también posiciona al complejo como un modelo de sostenibilidad en la región. Esta estrategia contribuye al ODS 7 sobre energía asequible y no contaminante, al tiempo que mejora la calidad de vida de los usuarios del centro, desde pacientes hasta residentes de la hospedería y el convento.

La gestión eficiente de los recursos es esencial para maximizar el impacto de las intervenciones en regiones vulnerables, donde la planificación debe adaptarse a limitaciones logísticas y financieras. Herramientas como el sistema HeRAMS, implementadas en contextos como Siria y Sudán, proporcionan datos actualizados sobre la disponibilidad de servicios de salud, permitiendo identificar brechas críticas en infraestructura, personal y

¹³ Paik & Natuzzi, 2024

¹⁴ Nickerson et al., 2015

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

suministros¹⁵ ¹⁶ En Siria, por ejemplo, HeRAMS reveló que el 35% de los hospitales públicos y el 48% de los centros de atención primaria son parcialmente funcionales o están fuera de servicio, lo que ha guiado la priorización de recursos humanitarios. En América Latina, estudios sobre infraestructura hospitalaria destacan la importancia de estrategias de mitigación, como el diseño de sistemas hidráulicos y eléctricos resilientes, para garantizar la continuidad del servicio frente a desastres naturales o crisis socioeconómicas.¹⁷ Estas estrategias incluyen el uso de software de modelado, como EPANET, para optimizar redes de distribución de agua, y auditorías energéticas para reducir el consumo. En el Centro Al Fadi, el uso de EPANET para diseñar un sistema hidráulico eficiente y la consulta de estudios sobre consumo energético y de agua reflejan un enfoque basado en datos, similar al de HeRAMS, asegurando que las soluciones sean técnicas, sostenibles y adaptadas a las necesidades locales. Este enfoque no solo fortalece la resiliencia del complejo, sino que también establece un precedente para otras instituciones en regiones similares.

La modernización de las infraestructuras hospitalarias en regiones vulnerables requiere una visión holística que vaya más allá de las soluciones técnicas y aborde las dimensiones sociales, económicas y ambientales de la sostenibilidad. En el Líbano, donde la inestabilidad política y económica ha erosionado los sistemas de salud, proyectos como el del Centro Al Fadi demuestran que es posible integrar ingeniería avanzada con principios de solidaridad. La implementación de un sistema hidráulico que conecte múltiples áreas del complejo y la adopción de energías renovables no solo resuelve limitaciones operativas, sino que también mejora la calidad de vida de la comunidad, desde pacientes que reciben atención médica hasta agricultores que dependen de las tierras irrigadas. Este enfoque, respaldado por herramientas de monitoreo como HeRAMS y estrategias globales de sostenibilidad, posiciona al Centro Al Fadi como un modelo de cómo las intervenciones técnicas pueden alinearse con los ODS y los valores de servicio comunitario, ofreciendo lecciones valiosas para otras regiones vulnerables que enfrentan desafíos similares.

¹⁵ Nickerson et al., 2015

¹⁶ WHO, 2024

¹⁷ Grissel Olivera-Martínez & Adelaido García-Andrés, 2021

1.4 PROBLEMÁTICA ACTUAL: CENTRO AL FADI

El Centro Al Fadi, situado en la localidad de Chabrouh, Líbano, es un complejo hospitalario católico que desempeña un papel crucial no solo como proveedor de atención médica, sino también como un pilar espiritual, social y económico para la comunidad local, albergando un hospital, una hospedería, un convento y tierras de cultivo. Sin embargo, enfrenta una serie de desafíos estructurales y operativos que comprometen su capacidad para cumplir con estas funciones de manera eficiente y sostenible, especialmente en el contexto de la crisis económica y energética que atraviesa el Líbano desde 2019. Estas limitaciones reflejan problemas comunes en regiones vulnerables, donde la obsolescencia de las infraestructuras y la escasez de recursos dificultan la prestación de servicios esenciales.

Uno de los principales problemas del Centro Al Fadi es su infraestructura hidráulica, que resulta insuficiente y obsoleta. El sistema actual de saneamiento y distribución de agua no satisface las necesidades del complejo, lo que genera carencias en el suministro de agua potable para el hospital, la hospedería y el convento. En el hospital, la falta de agua de calidad adecuada incrementa el riesgo de infecciones nosocomiales, poniendo en peligro la seguridad de los pacientes y el personal médico. Asimismo, la distribución ineficiente hacia las tierras de cultivo circundantes limita la capacidad de irrigación, afectando la producción agrícola que es vital para la seguridad alimentaria de la comunidad local y para la sostenibilidad económica del centro. Esta problemática no solo tiene implicaciones prácticas, sino que también impacta en la salud pública y el bienestar general de la región.

Otro desafío significativo es la dependencia del centro de fuentes de energía no renovables, en un contexto nacional marcado por una crisis energética severa. Los cortes de electricidad son frecuentes en el Líbano, y el Centro Al Fadi, al igual que muchos hospitales del país, se ve obligado a recurrir a generadores diésel para mantener sus operaciones. Sin embargo, la escasez de combustible y los altos costos asociados generan interrupciones en los servicios médicos, afectando el funcionamiento de equipos críticos como monitores, ventiladores y sistemas de esterilización. Estas interrupciones no solo comprometen la calidad de la atención, sino que también aumentan los gastos operativos, dificultando la viabilidad financiera del complejo en un entorno de recursos limitados. Además, el uso de combustibles fósiles contribuye a la huella de carbono del centro, lo que va en contra de los principios de sostenibilidad que podrían fortalecer su resiliencia a largo plazo.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

El acondicionamiento térmico de las instalaciones representa otro punto crítico. Las edificaciones del Centro Al Fadi carecen de sistemas de climatización eficientes, lo que resulta en condiciones de temperatura inadecuadas tanto en verano como en invierno. En el hospital, esto afecta el confort de los pacientes, especialmente aquellos en recuperación o con condiciones crónicas, y reduce la productividad del personal médico. En la hospedería y el convento, las temperaturas extremas dificultan la calidad de vida de los residentes y visitantes, limitando la capacidad del centro para servir como un espacio de acogida y espiritualidad. La falta de aislamiento térmico y de tecnologías modernas de calefacción o refrigeración agrava este problema, incrementando el consumo energético y los costos asociados.

Estos desafíos se ven exacerbados por la falta de recursos financieros y técnicos para realizar el mantenimiento necesario o implementar mejoras estructurales. La crisis económica libanesa ha reducido la capacidad de inversión en infraestructura, mientras que la emigración de profesionales cualificados ha limitado el acceso a expertise técnica local. En este contexto, el Centro Al Fadi enfrenta la necesidad urgente de modernizarse para garantizar su operatividad y cumplir con su misión de servicio a la comunidad. La implementación de un sistema hidráulico eficiente, la integración de energías renovables, como paneles solares, y la optimización del acondicionamiento térmico son soluciones prioritarias que no solo abordarían las limitaciones actuales, sino que también posicionarían al centro como un modelo de sostenibilidad y resiliencia en una región marcada por la adversidad. Estas intervenciones, alineadas con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 (agua limpia y saneamiento) y 7 (energía asequible y no contaminante), podrían transformar al Centro Al Fahdi en un ejemplo de cómo la ingeniería puede contribuir al bienestar comunitario en contextos de crisis.

1.5 CONCLUSIÓN

La modernización del Centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano, se presenta como una respuesta integral a los desafíos de sostenibilidad y acceso a recursos básicos en un contexto de crisis socioeconómica y ambiental. La importancia de garantizar agua limpia, saneamiento adecuado, energía asequible y no contaminante, y condiciones óptimas de confort térmico no solo responde a las necesidades inmediatas del complejo hospitalario, sino que también se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 6 y 7, promoviendo un modelo de

desarrollo que respeta el medio ambiente y fortalece la resiliencia comunitaria. En el Líbano, donde la crisis económica desde 2019 ha exacerbado la obsolescencia de las infraestructuras, con un suministro de agua reducido a 22 horas semanales y un sistema eléctrico colapsado por pérdidas técnicas del 40%, el Centro Al Fadi enfrenta problemas críticos como un sistema hidráulico ineficiente, dependencia de generadores diésel y un acondicionamiento térmico inadecuado. Estas limitaciones, agravadas por la contaminación de las masas de agua y un estrés hídrico del 79,7% en la región, afectan su capacidad para brindar atención médica, apoyar la producción agrícola y servir como pilar espiritual y social. Este proyecto, al proponer soluciones técnicas como un sistema hidráulico eficiente, la integración de energías renovables y mejoras térmicas no solo busca superar estas carencias, sino también establecer un precedente de sostenibilidad en regiones vulnerables, demostrando que la ingeniería puede armonizarse con los valores de solidaridad y servicio para mejorar la calidad de vida de las comunidades más necesitadas.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Este capítulo analiza el contexto global y local de los sistemas hidráulicos, energéticos y de acondicionamiento térmico en hospitales ubicados en regiones vulnerables, con un enfoque particular en el Centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano. La estructura del capítulo se organiza en cinco secciones principales. Primero, se examinan los sistemas hidráulicos y de saneamiento, destacando los desafíos en zonas de crisis y las soluciones sostenibles aplicables. A continuación, se aborda la eficiencia energética y el uso de energías renovables, evaluando tecnologías como microrredes solares. Posteriormente, se analiza el acondicionamiento térmico y la resiliencia climática, proponiendo estrategias para mitigar temperaturas extremas. Luego, se estudia el impacto de la obsolescencia hospitalaria, subrayando la importancia de la modernización para la comunidad. Finalmente, se explora la gestión ambiental y la sostenibilidad, identificando prácticas para optimizar recursos.

2.1 SISTEMAS HIDRÁULICOS Y SANEAMIENTO EN HOSPITALES DE REGIONES VULNERABLES

En regiones marcadas por conflictos, desastres naturales o crisis económicas, como el Líbano, el acceso a agua potable y saneamiento en hospitales es un desafío crítico que afecta directamente la calidad de la atención médica. La Organización Mundial de la Salud (OMS) subraya que la falta de sistemas hidráulicos adecuados aumenta el riesgo de infecciones nosocomiales, poniendo en peligro a pacientes y personal médico.¹⁸ En Gaza, por ejemplo, el sistema HeRAMS ha revelado que numerosas instalaciones de salud carecen de agua potable y saneamiento funcional debido a los daños causados por conflictos prolongados. Esto no solo limita la capacidad de realizar procedimientos quirúrgicos, sino que también compromete la higiene básica, como el lavado de manos, y la limpieza de equipos médicos, incrementando el riesgo de infecciones y contaminación cruzada. Este escenario resuena con las necesidades del Centro Al Fadi, donde un sistema hidráulico eficiente es esencial para

¹⁸ United Nations , 2024

garantizar agua de calidad en el hospital y apoyar la irrigación de tierras agrícolas, vitales para la seguridad alimentaria y la economía de Chabrouh.

En otros contextos de crisis, como Afganistán, el informe HeRAMS de 2024 documenta que el 35% de los centros de salud carecen de infraestructura hídrica funcional, dependiendo de fuentes no seguras como pozos abiertos o camiones cisterna, lo que eleva el riesgo de enfermedades transmitidas por el agua.¹⁹ Algunos hospitales rurales han implementado sistemas de captación de agua de lluvia, logrando reducir la dependencia de fuentes externas en un 20%. Sin embargo, la falta de mantenimiento regular ha provocado fallos, limitando su eficacia. Este enfoque, aunque prometedor, destaca la importancia de programas de mantenimiento para asegurar la sostenibilidad de las soluciones hídricas, una lección aplicable al Centro Al Fadi, donde la captación de agua podría complementar un sistema hidráulico integrado que conecte sus diversas instalaciones.

En Etiopía, el informe HeRAMS Afar 2023 señala que el 45% de las instalaciones de salud carecen de agua potable y el 30% no cuentan con saneamiento adecuado, contribuyendo a brotes de enfermedades como el cólera.²⁰ La instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales compactas, alimentadas por energía solar, ha permitido reciclar agua para usos no potables, como la limpieza y el riego de jardines hospitalarios, mejorando la higiene y reduciendo infecciones. Estas soluciones, diseñadas para zonas rurales con recursos limitados, son relevantes para el Centro Al Fadi, donde podrían proporcionar agua segura para el hospital y aliviar la presión sobre los recursos hídricos locales, al tiempo que el agua reciclada apoya la agricultura.

La guía estratégica de HeRAMS resalta el valor de herramientas de monitoreo para mapear la disponibilidad y calidad del agua en hospitales, permitiendo priorizar intervenciones en áreas críticas.²¹ En contextos de crisis, la ausencia de monitoreo aumenta los riesgos sanitarios. Para el Centro Al Fadi, integrar estas herramientas en un sistema hidráulico no solo optimizaría el uso del agua, sino que también prevendría brotes de enfermedades,

¹⁹ HeRAMS Afghanistan, 2024

²⁰ WHO, 2024a

²¹ WHO, 2021

reduciendo costos a largo plazo. Estas experiencias globales subrayan la necesidad de soluciones hídricas sostenibles y adaptadas, que el proyecto del Centro Al Fadi podría implementar para fortalecer su operatividad y su impacto comunitario, en línea con el ODS 6 (agua limpia y saneamiento).

2.2 EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

La dependencia de generadores diésel en hospitales, común en regiones con crisis energéticas como Líbano, genera altos costos y emisiones, afectando la continuidad de los servicios médicos. En el Centro Al Fadi, los cortes eléctricos frecuentes interrumpen equipos esenciales, comprometiendo la atención. A nivel global, los hospitales están adoptando energías renovables para ganar resiliencia, ofreciendo modelos que podrían transformar la operatividad del centro.

En países en crisis, como Siria, varios hospitales han instalado sistemas solares fotovoltaicos para reducir su dependencia de diésel, asegurando la continuidad del servicio durante cortes eléctricos.²² Sin embargo, la falta de personal capacitado para el mantenimiento ha limitado la eficacia de estos sistemas, una lección clave para el Centro Al Fadi, donde los paneles solares podrían estabilizar el suministro energético, siempre que se acompañen de formación técnica local. La OMS recomienda combinar paneles solares con baterías para mantener la operatividad durante interrupciones prolongadas, una estrategia que maximiza la resiliencia en entornos inestables.²³

En Etiopía, el 30% de los centros de salud primarios utilizan energía solar para alimentar refrigeradores de vacunas, iluminación y ventiladores, aunque solo el 10% cuentan con almacenamiento, lo que restringe su uso nocturno.²⁴ Esta opción no resulta adecuada para este Proyecto porque el escaso porcentaje de centros en Etiopía con almacenamiento de

²² HeRAMS, 2024

²³ WHO, 2020

²⁴ WHO, 2024a

energía solar limita su funcionalidad, especialmente en el Centro Al Fadi, donde se requiere un suministro nocturno constante para equipos médicos esenciales. Esta limitación resalta la importancia de sistemas integrados con baterías, que en el Centro Al Fadi podrían garantizar la continuidad de servicios médicos esenciales, reduciendo costos y emisiones, en línea con el ODS 7 (energía asequible y no contaminante).

Tecnologías emergentes, como microrredes solares-hidrógeno, están ganando atención por su potencial para minimizar el uso de combustibles fósiles en centros de salud, aunque su alto costo las hace menos accesibles.²⁵ Las microrredes solares estándar, sin embargo, son una alternativa viable para el Centro Al Fadi, donde podrían alimentar el hospital, la hospedería y el convento.

Las microrredes solares resultan una opción atractiva para el Proyecto del Centro Al Fadi por múltiples razones convincentes. En primer lugar, representan una solución práctica y sostenible capaz de suministrar energía al hospital, la hospedería y el convento, reduciendo la dependencia de combustibles fósiles en un contexto libanés marcado por cortes eléctricos frecuentes y el alto costo del diésel. Aunque las microrredes solares-hidrógeno despiertan interés por su potencial para minimizar el uso de combustibles, su elevado costo las hace menos accesibles en la actualidad; sin embargo, las microrredes solares estándar son una alternativa viable, con antecedentes exitosos en otros contextos. En las islas del Pacífico, por ejemplo, hospitales han implementado microrredes que aseguran operatividad durante ciclones, disminuyendo el consumo de combustibles fósiles.²⁶ Un aspecto particularmente destacable es el modelo comunitario de estas microrredes, gestionadas por las comunidades locales, lo que genera empleo y refuerza la sostenibilidad. Para Chabrouh, adoptar un enfoque similar sería un gran acierto: involucrar a la comunidad en la gestión energética no solo crearía oportunidades laborales, sino que también fortalecería la resiliencia del Centro Al Fadi frente a la crisis energética, aportando beneficios económicos y sociales significativos a la región.

²⁵ Gogoi et al., 2025

²⁶ Paik & Natuzzi, 2024

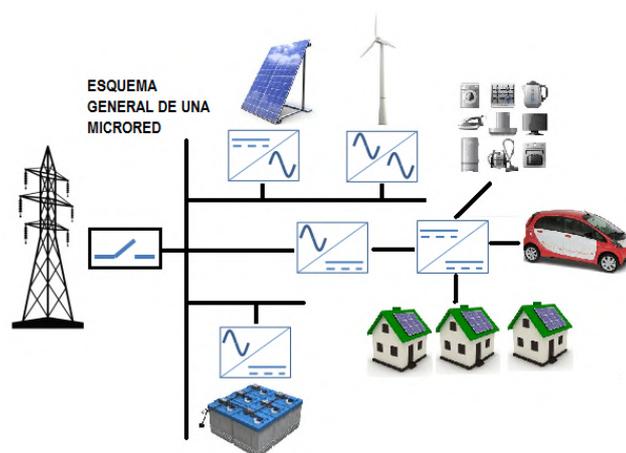


Figura 17: Esquema general de una microred (Fuente: Gaona García et al., 2017)

2.3 ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO Y RESILIENCIA CLIMÁTICA

Las temperaturas extremas en el Líbano, con veranos que superan los 30°C, afectan el confort en el Centro Al Fadi, reduciendo la calidad de la atención médica y la habitabilidad de la hospedería y el convento. La resiliencia climática es cada vez más relevante, ya que el cambio climático intensifica olas de calor y tormentas, exigiendo infraestructuras hospitalarias adaptadas. Los hospitales pueden adaptarse a estos retos mediante aislamiento térmico, ventilación natural y climatización eficiente, estrategias que minimizan el consumo energético mientras mejoran el confort.²⁷

En el Centro Al Fadi, un mejor aislamiento térmico podría mitigar el calor estival, beneficiando a pacientes y residentes sin depender de sistemas costosos. Los materiales sostenibles, como los techos verdes, ofrecen una solución dual: reducen la necesidad de climatización y recolectan agua de lluvia, una ventaja en un contexto de escasez hídrica.²⁸ Los techos verdes, también conocidos como cubiertas vegetales, son sistemas que incorporan capas de vegetación, sustrato, drenaje y membranas impermeables sobre la estructura de un edificio. El funcionamiento de un techo verde es sencillo pero efectivo. Las plantas absorben la radiación solar, reduciendo la temperatura del tejado. El sustrato y la vegetación actúan

²⁷ Paul et al., 2023

²⁸ Health Care Without Harm , 2023

como una barrera térmica, manteniendo los interiores más frescos en verano. Además, el sistema captura agua de lluvia, que se almacena en la capa de drenaje o se redirige para su uso, como el riego. En invierno, el sustrato proporciona un aislamiento adicional, ayudando a conservar el calor. En el Centro Al Fadi, los techos verdes podrían mejorar las condiciones térmicas en el convento y la hospedería, mientras el agua recolectada apoya la irrigación agrícola.

Algunos hospitales han adoptado bombas de calor solares para reducir el consumo energético en calefacción y refrigeración, complementadas con sensores de temperatura que optimizan el confort.²⁹ Aunque las bombas de calor son costosas, los sensores de temperatura son una opción accesible para el Centro Al Fadi, permitiendo ajustar las condiciones interiores durante los meses cálidos. La ventilación pasiva, como las chimeneas solares, es otra alternativa recomendada para climas cálidos, reduciendo la dependencia de aire acondicionado.³⁰ En el Líbano, esta tecnología podría aliviar la carga térmica en el Centro Al Fadi, mejorando el bienestar sin aumentar el consumo energético. Estas soluciones integradas ofrecen un camino hacia una infraestructura resiliente y sostenible, adaptada a las necesidades del centro. En la figura a continuación se puede observar el esquema básico de una chimenea solar:

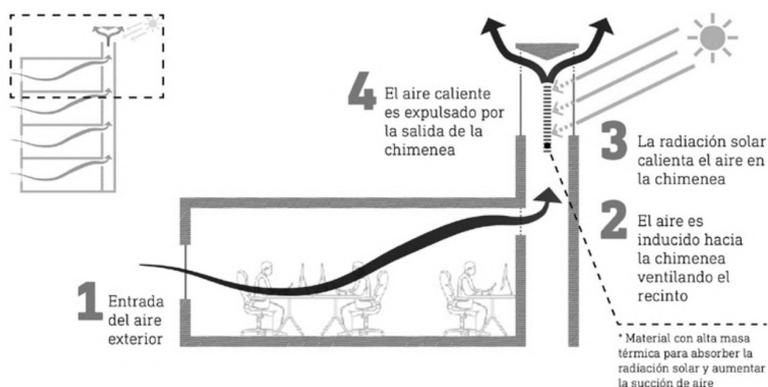


Figura 18: Esquema del principio de funcionamiento de una chimenea solar (Fuente: Hendzel & Claudio, 2024)

²⁹ Health Care Without Harm , 2018

³⁰ WHO, 2020

2.4 IMPACTO DE LA OBSOLESCENCIA Y CIERRES HOSPITALARIOS

La obsolescencia de las infraestructuras hospitalarias, como las del Centro Al Fadi, amenaza no solo la operatividad, sino también la salud, la economía y la cohesión de las comunidades rurales. En Chabrouh, el centro es un empleador clave y un pilar social, y su modernización es vital para evitar los efectos devastadores de un posible cierre parcial.

En el Líbano, el 20% de los hospitales públicos operan a media capacidad debido a la crisis económica, incrementando los tiempos de traslado a hospitales urbanos en áreas rurales como Chabrouh.³¹ Modernizar el Centro Al Fadi es crucial para mantener su rol como proveedor de salud y empleador, preservando la vitalidad económica de la comunidad.

Los cierres rurales obligan a los pacientes a viajar largas distancias, aumentando los tiempos de respuesta en emergencias y complicaciones en casos como embarazos.³² En Chabrouh, la ubicación rural del Centro Al Fadi hace que su operatividad sea esencial para garantizar atención oportuna, evitando desplazamientos inviables para poblaciones con acceso limitado al transporte. Además, los cierres reducen la confianza en los servicios de salud, disminuyendo la asistencia a consultas preventivas y aumentando enfermedades crónicas no tratadas.³³ Como espacio espiritual y social, el Centro Al Fadi debe mantener su funcionalidad para preservar la cohesión comunitaria.

Los cierres también eliminan empleos y reducen la actividad económica, debilitando la estructura social de las comunidades rurales.³⁴ En Chabrouh, modernizar el Centro Al Fadi podría generar empleos en el mantenimiento de sistemas solares e hidráulicos, fortaleciendo la economía local y contrarrestando la emigración. Estos hallazgos subrayan la urgencia de evitar la obsolescencia, reforzando la relevancia del proyecto.

³¹ HeRAMS, 2024

³² Reif et al., 1998

³³ Wishner & Solleveld, 2016

³⁴ Holmes et al., 2006

2.5 GESTIÓN AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD HOSPITALARIA

La sostenibilidad hospitalaria, que incluye la gestión eficiente de recursos y la reducción de residuos, es crucial para el Centro Al Fadi en un contexto de recursos limitados. Las prácticas sostenibles no solo optimizan la operatividad, sino que también reducen el impacto ambiental, un aspecto clave para un centro multifuncional como este.

Varios hospitales han implementado programas de gestión de residuos médicos, reduciendo la contaminación por desechos peligrosos y minimizando riesgos sanitarios.³⁵ En el Centro Al Fadi, estas prácticas podrían fortalecer la seguridad del hospital, protegiendo a pacientes y personal. La digitalización, que reduce el consumo de papel y energía al optimizar procesos administrativos, es otra estrategia prometedora.³⁶ Digitalizar historias clínicas y gestión de inventarios en el Centro Al Fadi podría mejorar la eficiencia, liberando recursos para otras necesidades.

Los programas de capacitación que promueven prácticas sostenibles, como apagar equipos no esenciales, han demostrado reducir el consumo de agua y energía, fomentando una cultura de sostenibilidad.³⁷ En el Centro Al Fadi, involucrar al personal y la comunidad en estas prácticas podría alinear la operatividad con su misión de servicio, optimizando recursos en un entorno de crisis. Estas estrategias integradas ofrecen un marco para la sostenibilidad hospitalaria, esencial para el futuro del centro. En la siguiente imagen podemos observar como los hospitales han de optimizar su uso de recursos naturales como el agua y la energía para disminuir los riesgos y vulnerabilidades a los que se enfrentan:

³⁵ HeRAMS, 2024

³⁶ Paul et al., 2023

³⁷ Health Care Without Harm , 2018

CAPÍTULO 2: ESTADO DE LA CUESTIÓN

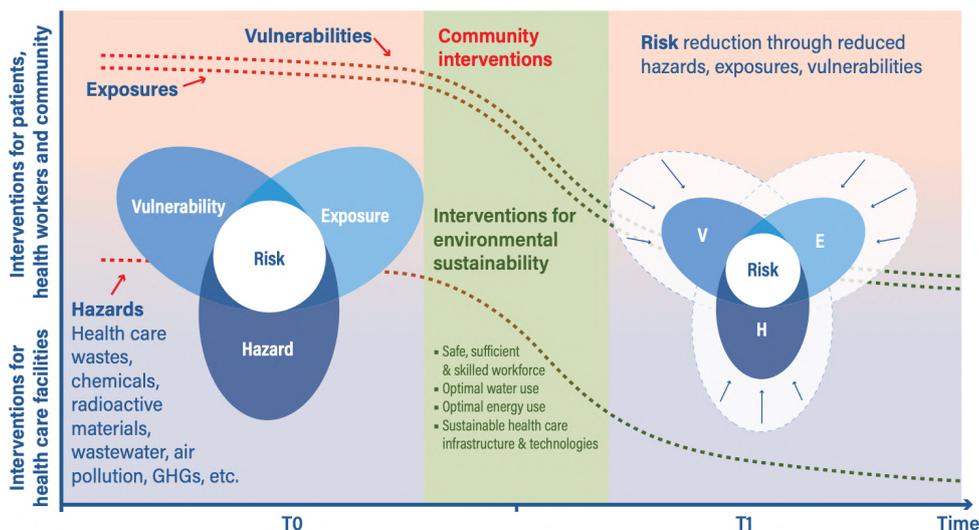


Figura 19: Sostenibilidad ambiental en los centros de salud (Fuente: WHO 2020)

En el siguiente esquema podemos identificar un plan resumido para construir un entorno hospitalario resiliente de forma sostenible:

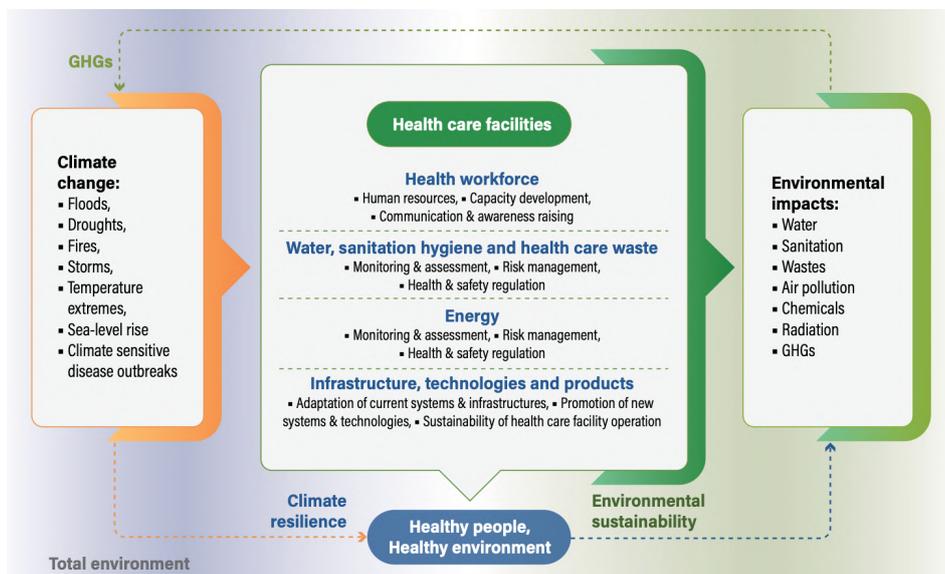


Figura 20: Marco para el desarrollo de centros de salud resilientes al clima y ambientalmente sostenibles (Fuente: WHO 2020)

2.6 CONCLUSIÓN

Los avances globales en sistemas hidráulicos, energías renovables, acondicionamiento térmico, resiliencia climática y sostenibilidad hospitalaria muestran que es posible modernizar infraestructuras en contextos de crisis, pero también revelan desafíos que hacen único el proyecto del Centro Al Fadi. Las soluciones identificadas, como sistemas de captación de agua, microrredes solares, techos verdes y digitalización enfrentan barreras como la falta de recursos y capacitación, especialmente en el Líbano, donde la crisis energética y la escasez hídrica son cotidianas. El Centro Al Fadi, al integrar atención médica, espiritualidad y agricultura, requiere un enfoque holístico que vaya más allá de las soluciones técnicas, fortaleciendo su impacto comunitario.

Los efectos devastadores de los cierres hospitalarios rurales, como el aumento de la mortalidad, la pérdida de empleo y la migración, subrayan la urgencia de modernizar el Centro Al Fadi para preservar la salud, la economía y la cohesión en Chabrouh. La escasez de investigaciones sobre complejos hospitalarios rurales multifuncionales en el Líbano resalta la originalidad de este proyecto, que propone un modelo sostenible adaptado a las necesidades locales. Al combinar soluciones como sistemas hidráulicos eficientes, energías renovables, acondicionamiento térmico resiliente y prácticas sostenibles, el proyecto garantizará la operatividad del centro y su rol como pilar económico y social, generando empleo y apoyando la agricultura. Alineado con los ODS 6 y 7, este proyecto ofrece un modelo replicable para regiones vulnerables, mostrando cómo la ingeniería puede impulsar el desarrollo sostenible y la solidaridad comunitaria. En el siguiente capítulo se detallará la caracterización del Centro Al Fadi, definiendo sus funciones y estructura. También analizará su demanda específica en agua, climatización y energía, sentando las bases para las soluciones técnicas propuestas.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL PROYECTO

El presente capítulo tiene como objetivo describir de manera detallada el Centro Al Fadi, un complejo hospitalario multifuncional ubicado en Chabrouh, Líbano, y sentar las bases para las soluciones técnicas propuestas. La estructura del capítulo se organiza en tres secciones principales: primero, se presenta una descripción integral del centro, abarcando sus componentes (hospital, hospedería, convento, cultivos y estacionamiento), su distribución espacial y su rol en la comunidad; segundo, se detalla su ubicación y entorno, destacando las características geográficas y climáticas de Faraya; y tercero, se analizan las demandas específicas de agua, climatización y energía, proporcionando cálculos precisos y criterios técnicos que sustentan el diseño de modernización.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL CENTRO AL FADI

El Centro Al Fadi se alza como un pilar fundamental en Chabrouh, Líbano, un complejo hospitalario católico que entrelaza un hospital, una hospedería, un convento y tierras de cultivo, desempeñando un rol multifacético que sostiene la salud, la espiritualidad y la economía local. El hospital, situado en el corazón del complejo, está diseñado para ofrecer atención primaria y especializada, contando con una capacidad estimada de unas 50 camas distribuidas entre habitaciones individuales y compartidas, atendiendo a un promedio de 40 pacientes diarios, lo que representa un 80% de ocupación. Este espacio acoge a unos 20 trabajadores, incluyendo médicos, enfermeras, administrativos y personal de apoyo, y se calcula que ocupa alrededor de 3.000 m², abarcando áreas de consultas, quirófanos, salas de recuperación y oficinas administrativas. La hospedería, pensada para dar refugio a peregrinos y visitantes, alberga a unos 40 huéspedes en unas 20 habitaciones, alcanzando un 75% de ocupación, y se extiende sobre unos 1.500 m². El convento, hogar de 15 religiosas residentes, ocupa cerca de 1.000 m² y ofrece un espacio de retiro espiritual, mientras que las tierras de cultivo, que abarcan aproximadamente 5 hectáreas, emplean a 5 agricultores y producen alimentos esenciales para el centro y la comunidad, dependiendo del riego para mantener su productividad. En total, el complejo suma unos 5.500 m², con un estacionamiento de 500 m² que facilita el acceso a personal y visitantes, y la actividad diaria involucra a unas 110 personas entre pacientes, huéspedes, religiosas y trabajadores.

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

La distribución del Centro Al Fadi refleja su carácter único y su integración con el terreno montañoso de Chabrouh, ubicado en las montañas de Faraya, muy cerca de Kfardebian, dentro del Distrito de Keserwan (Qada Kisrwan), en el Monte Líbano. Los edificios, de dos plantas con techos planos visibles en las fotos, están rodeados de áreas verdes y pendientes naturales que se funden con el paisaje montañoso. El hospital se posiciona como el núcleo central, con la hospedería al este acogiendo a los visitantes y el convento al oeste reservado para las religiosas, mientras las tierras de cultivo se extienden al sur, aprovechando la inclinación para el drenaje y la exposición solar, y el estacionamiento se sitúa al norte, cerca de la entrada principal para mayor accesibilidad. La orientación del complejo es clave, con el hospital mirando hacia el sur para captar la luz solar en invierno, complementado por ventanas pequeñas al oeste que evitan el calor de la tarde y más grandes al norte que ofrecen luz indirecta, mientras la hospedería y el convento siguen un eje este-oeste, con techos inclinados al sur que potencian la posibilidad de instalar paneles solares.

Se presentan los datos comentados con anterioridad a modo resumen en una tabla para facilitar la comprensión del lector:

Componente	Superficie (m²)	Capacidad/Ocupación	Personal/Usuarios
Hospital	3.000	50 camas, 80% ocupación (40 pacientes/día)	20 trabajadores
Hospedería	1.500	20 habitaciones, 75% ocupación (30 huéspedes)	
Convento	1.000	15 religiosas residentes	
Tierras de Cultivo	50.000 (5 ha)	-	5 agricultores
Estacionamiento	500	-	
Total Complejo	5.500 (excl. cultivos)	≈85 personas/día (pacientes, huéspedes, religiosas, trabajadores)	≈25 personas/día

Tabla 1: Resumen de componentes y ocupación del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

A continuación, podemos observar diferentes imágenes del centro que nos ayudan a entender su distribución:



Figura 21: Vista del exterior del centro Al Fadi en Chabrouh, Libano (Fuente: Google Maps, Agosto 2017)



Figura 22: Vistas desde el patio central del centro Al Fadi en Chabrouh, Libano (Fuente: Google Maps, Julio 2017)

La imagen a continuación resulta interesante, ya que podemos observar que tienen dos placas solares instaladas al fondo, así como en el techo del edificio a la derecha:



Figura 23: Vistas del interior del recinto y del entorno del centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano (Fuente: Google Maps, Enero 2021)

La luz solar desempeña un papel esencial en la vida del centro, y según los datos³⁸, Faraya recibe unas 2.800 horas de sol al año, con un promedio que sube a 12,2 horas diarias en julio, el mes más soleado con un total de 378,55 horas, y baja a 6,2 horas en enero, acumulando 204,83 horas mensuales. La temperatura media anual es de 11,7°C, con máximas que alcanzan los 25,7°C en julio y mínimas que caen a -2,1°C en enero, mientras las precipitaciones, que suman 664 mm al año, se concentran entre noviembre y marzo, con picos de 129 mm en enero y apenas 1 mm en julio. Esta variación climática, con ángulos solares de 70° en verano y 30° en invierno según la inclinación del terreno, permite al hospital aprovechar la luz directa en los meses fríos y gestionar el calor en los más cálidos, influyendo en las demandas de climatización y energía. El complejo se beneficia de esta luz natural, que ilumina sus espacios y alimenta cultivos, mientras las precipitaciones invernales

³⁸ Climate Data , 2021

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

ofrecen una oportunidad para captar agua, adaptándose con inteligencia a las condiciones montañosas de Faraya.

La tabla a continuación sirve para resumir los datos climáticos del Centro Al Fadi:

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Aspecto Climático	Descripción y datos	Implicaciones para el Centro Al Fadi
Insolación anual	2.800 horas de sol al año	Ilumina espacios, reduce consumo de iluminación artificial y apoya paneles solares para energía renovable.
Insolación mensual (pico)	Julio: 12,2 horas/día, 378,55 horas totales.	Máximo aprovechamiento solar en verano para energía y cultivos.
Insolación mensual (mínimo)	Enero: 6,2 horas/día, 204,83 horas totales.	Menor disponibilidad solar en invierno requiere optimización energética.
Temperatura media anual	11,7 °C	Condiciones moderadas, pero requiere climatización para extremos estacionales.
Temperatura máxima	Julio: 25,7 °C.	Necesidad de ventilación y refrigeración en verano para confort en hospital y hospedaría.
Temperatura mínima	Enero: -2,1 °C.	Requiere calefacción en invierno, especialmente para pacientes y residentes.
Precipitaciones anuales	664 mm, concentradas entre noviembre y marzo.	Oportunidad para captación de agua de lluvia, clave para riego y reducción de dependencia municipal.
Precipitaciones mensuales	Enero: 129 mm (pico); Julio: 1 mm (mínimo).	Mayor captación en invierno; necesidad de almacenamiento para verano seco.
Ángulo solar	Verano: 70°; Invierno: 30° (según inclinación del terreno).	Optimiza luz directa en invierno (calor natural) y gestión de calor en verano (ventilación pasiva).

Tabla 2: Condiciones Climáticas de Faraya y su Impacto en el Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

A continuación, podemos observar en el plano, los elementos claves del centro, así como su orientación y ubicación:

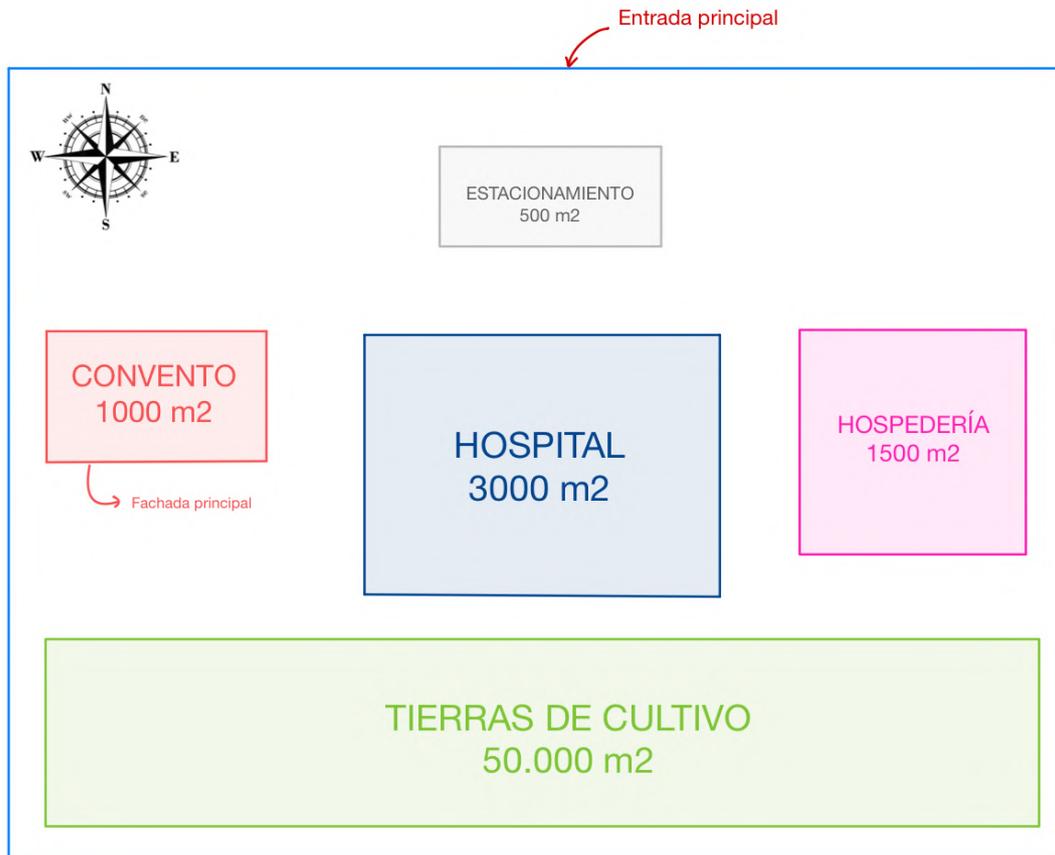


Figura 24: Plano general del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

3.2 UBICACIÓN Y ENTORNO

El Centro Al Fadi se alza en Chabrouh, un rincón montañoso situado en las montañas de Faraya, dentro del Distrito de Keserwan en el Monte Líbano, a unos 1.300 metros sobre el nivel del mar. Las tres vistas del mapa de Google Maps ofrecen una mirada progresiva a su entorno: la primera, con un zoom amplio, sitúa el centro en rojo y muestra las colinas y valles que lo rodean, con el lago Chabrouh a 3 km al norte y Kfardeblian a 3 km al sureste. La segunda, más detallada, resalta la cercanía de Faraya a 4 km al este y Hrajel a 7 km al noreste, con caminos que serpentean entre las pendientes. La tercera, con un zoom cercano, destaca las áreas verdes y el estacionamiento al norte, reflejando un terreno inclinado que se adapta

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

al relieve montañoso. Estas imágenes revelan un paisaje de pendientes pronunciadas y cultivos dispersos, con el lago Chabrouh como un recurso hídrico cercano, aunque su uso efectivo se ve limitado por la infraestructura obsoleta de la región.

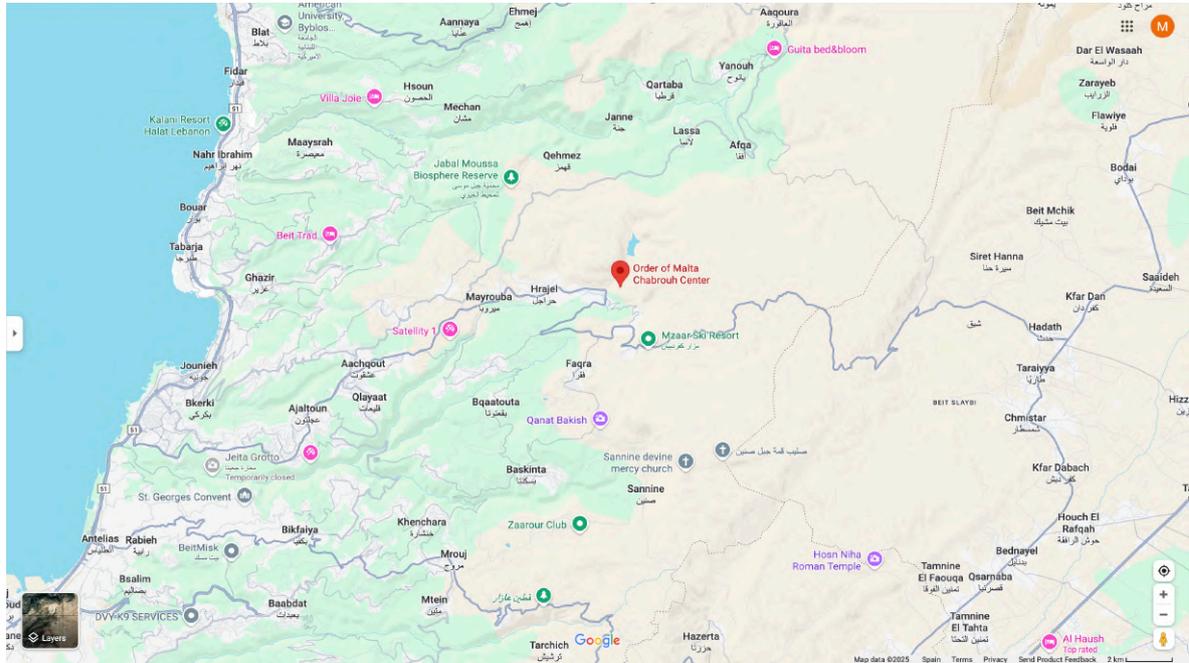


Figura 25: Vista amplia mapa de ubicación del Centro Al Fadi (Fuente: Google Maps 2025)

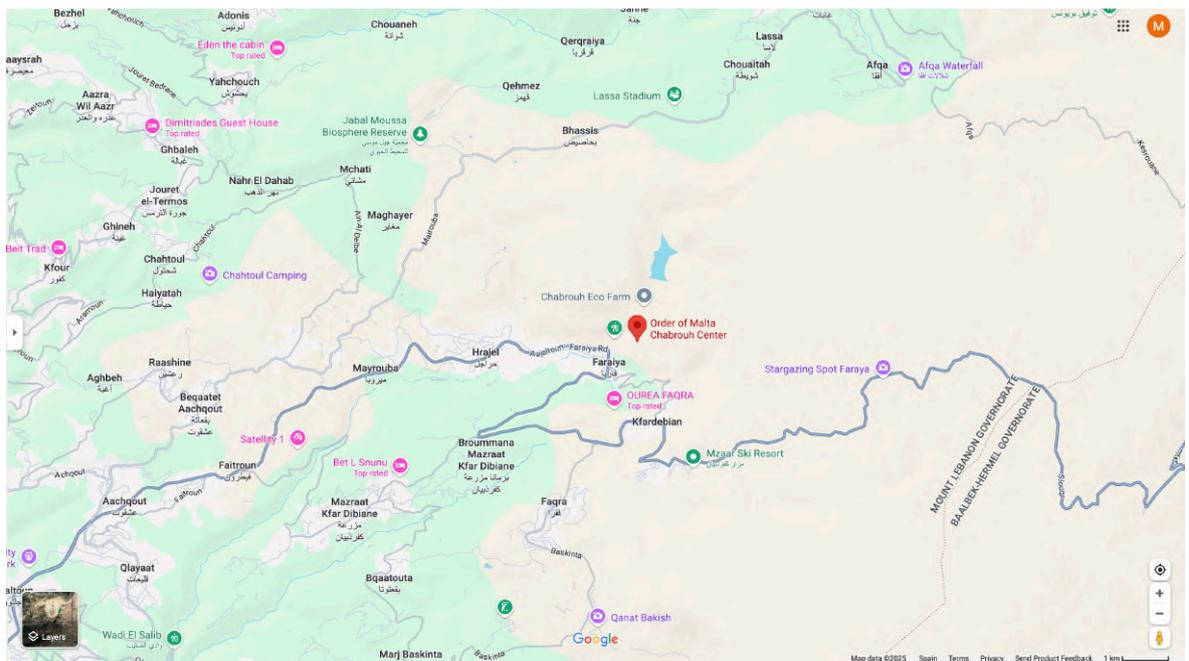


Figura 26: Vista detallada mapa de ubicación del Centro Al Fadi (Fuente: Google Maps 2025)

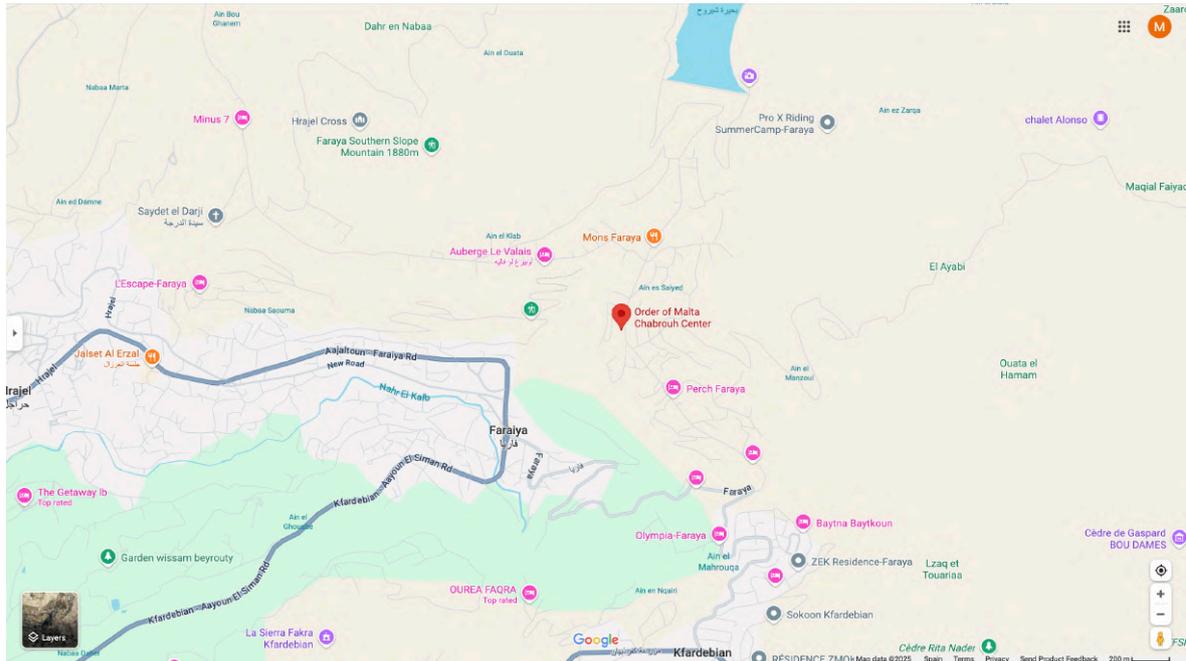


Figura 27: Vista aérea mapa de ubicación del Centro Al Fadi (Fuente: Google Maps 2025)

Faraya, a solo 4 km al este, se distingue como un pueblo turístico conocido por el resort de esquí Mzaar Kfardebian, un lugar que cobra vida en invierno con nevadas y atrae visitantes, aportando un aire fresco y dinámico al entorno del centro, como se aprecia en las vistas más amplias del mapa. Kfardebian, a 3 km al sureste, comparte esta atmósfera montañosa, con casas dispersas y senderos que se adivinan en las imágenes de zoom, sirviendo como un núcleo residencial que depende del Centro Al Fadi para atención médica y refugio. El lago Chabrouh, a 3 km al norte, aparece como una mancha azul en los mapas, un embalse artificial que regula el río Nahr el-Kalb y abastece agua a la zona. Hrajel, a 7 km al noreste, añade un toque rural con sus senderos y fuentes naturales, conectando el centro con un entorno que sugiere oportunidades para cultivos, visibles en las fotos que rodean el complejo.

El terreno montañoso, moldea la distribución del Centro Al Fadi, con pendientes que facilitan el drenaje, pero complican el riego de los cultivos que lo rodean. Las fotos muestran áreas verdes que indican suelos fértiles, mientras la proximidad al lago Chabrouh refuerza la importancia de captar y gestionar el agua de manera eficiente, un desafío que se agrava con la dependencia de camiones cisterna en la región. Faraya y Kfardebian, con su actividad turística y residencial, aportan una dinámica social que el Centro Al Fadi sostiene, ofreciendo

salud y espiritualidad, mientras Hrajel y el lago enriquecen el entorno con recursos naturales que el complejo podría aprovechar. Este paisaje montañoso y las características de estas tres ciudades cercanas, junto con el lago, sientan las bases para planificar las demandas del centro, adaptándose con inteligencia a las condiciones locales.

3.3 DEMANDA DE AGUA

La demanda de agua del Centro Al Fadi, situado en un entorno montañoso con acceso limitado debido a la proximidad del lago Chabrouh y las condiciones regionales, requiere un cálculo preciso para asegurar el suministro adecuado a sus diferentes áreas: hospital, hospedería, convento y cultivos. Esta estimación se fundamenta en las ocupaciones y actividades descritas en el capítulo 3.1, complementadas con criterios de saneamiento rural extraídos de los documentos proporcionados.

El hospital, con una capacidad de 50 camas y una ocupación del 80% (equivalente a 40 pacientes diarios), junto con 20 trabajadores, requiere agua para usos sanitarios, cocina y limpieza. Se estima un consumo de entre 100 y 150 litros por persona al día en entornos hospitalarios, considerando actividades médicas y de mantenimiento. Adoptando un promedio de 125 litros, el consumo diario del hospital asciende a:

$$E. 1 \quad (40 \text{ pacientes} \times 125 \text{ L} = 5.000 \text{ litros}) + (20 \text{ trabajadores} \times 125 \text{ L} = 2.500 \text{ litros}), \text{totalizando } 7.500 \text{ litros diarios.}$$

La hospedería, con 40 huéspedes al 75% de ocupación (30 personas), y el convento, con 15 religiosas, siguen un patrón residencial. Se sugiere un rango de 50-100 litros por persona al día para comunidades rurales, por lo que, utilizando un promedio de 75 litros, se calculan:

$$E. 2 \quad (30 \text{ huéspedes} \times 75 \text{ L} = 2.250 \text{ litros}) + (15 \text{ religiosas} \times 75 \text{ L} = 1.125 \text{ litros}), \text{sumando un total de } 3.375 \text{ litros diarios entre ambos.}^{39}$$

Los cultivos, que abarcan 5 hectáreas (50.000 m²), dependen del riego, cuya demanda varía según las precipitaciones locales y el tipo de cultivo. Sin datos climáticos específicos en este apartado, se recurre a una estimación típica de 5.000-10.000 litros por hectárea al día en

³⁹ Energía sin Fronteras, 2019

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

zonas semiáridas. Tomando un promedio de 7.500 litros por hectárea, el consumo total para los cultivos sería:

$$E. 3 \quad 5 \text{ ha} \times 7.500 \text{ L} = 37.500 \text{ litros diarios}^{40}$$

El estacionamiento, con 500 m², no genera demanda directa de agua, pero se considera un uso mínimo de 500 litros diarios para limpieza, como una estimación razonable basada en prácticas de mantenimiento.

La suma total de estas demandas resulta en:

$$E. 4 \quad 7,500 \text{ L (hospital)} + 3.375 \text{ L (hospedería y convento)} + 37.500 \text{ L (cultivos)} + 500 \text{ L (estacionamiento)} = 48.875 \text{ litros} \cong 49.000 \text{ litros al día.}$$

Para estimar el consumo por habitación individual, se consideran las 50 camas del hospital (40 ocupadas) y las 20 de la hospedería (15 ocupadas), lo que da un total de 55 habitaciones ocupadas. Esto implica un consumo promedio de:

$$E. 5 \quad 49.000 \text{ L} / 55 \cong 890 \text{ litros por habitación al día.}$$

Sin embargo, al incluir el uso colectivo de los cultivos, este valor resulta elevado. Para un cálculo más representativo del consumo residencial, se excluyen los 37.500 litros de riego, dejando 11.500 litros para las 55 habitaciones, lo que equivale a unos 209 litros por habitación al día, un dato coherente con las necesidades higiénicas sugeridas.⁴¹

La demanda de agua puede fluctuar según la temporada, con incrementos en verano debido a la necesidad de riego y una menor disponibilidad de agua del lago Chabrouh, como se infiere de las imágenes de Google Maps que muestran un entorno dependiente de recursos externos. Se subraya la importancia de planificar el mantenimiento y la captación para garantizar la sostenibilidad, recomendando un sistema de almacenamiento. Por ello, se propone reservar al menos 60.000 litros para cubrir días de escasez, alineado con estrategias de seguimiento continuo.⁴²

De nuevo, la tabla a continuación resume toda la demanda de agua del Centro Al Fadi:

⁴⁰ Castillo Ramos, 2019

⁴¹ Energía sin Fronteras, 2019

⁴² Energía sin Fronteras, 2019

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Área del complejo	Criterio de consumo	Usuarios/Ocupación	Consumo diario (L)
Hospital	125 L/persona/día (promedio de 100-150 L para usos sanitarios, cocina, limpieza)	40 pacientes (80% de 50 camas) + 20 trabajadores	7.500 (5.000 + 2.500)
Hospedería	75 L/persona/día (promedio de 50-100 L para comunidades rurales)	30 huéspedes (75% de 40)	2.250
Convento	75 L/persona/día (promedio de 50-100 L para comunidades rurales)	15 religiosas	1.125
Cultivos	7,500 L/ha/día (promedio de 5,000-10,000 L/ha en zonas semiáridas)	5 ha (50.000 m ²)	37.500
Estacionamiento	500 L/día (estimación para limpieza)	500 m ²	500
Total diario	Suma de todas las áreas	-	49.000
Consumo por habitación	Total ÷ 55 habitaciones ocupadas (40 hospital + 15 hospedería)	55 habitaciones	890 L/hab/día (total); 209 L/hab/día (sin cultivos)
Almacenamiento propuesto	60.000 L para cubrir días de escasez	-	-

Tabla 3: Resumen de la demanda de agua del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

3.4 DEMANDA DE CLIMATIZACIÓN

La demanda de climatización del hospital del Centro Al Fadi se centra en garantizar un ambiente térmico adecuado y seguro para los 40 pacientes diarios, que representan el 80% de las 50 camas disponibles, así como para los 20 trabajadores, considerando las condiciones del entorno montañoso de Chabrouh, próximo a Faraya. Esta evaluación se basa en las características del hospital, con una superficie de 3.000 m², y en las ocupaciones descritas en el capítulo 3.1.

Se busca mantener una temperatura interior entre 20 y 23°C, esencial para la salud de pacientes y personal, frente a las variaciones externas que oscilan entre mínimas de -2,1°C en invierno y máximas de 25,7°C en verano, inferidas a partir de las imágenes de Google Maps. La carga térmica se descompone en tres componentes: transmisión, ventilación e interna. Para la carga por transmisión, se emplea un coeficiente global de 1,1 W/m²·K para paredes y 4,5 W/m²·K para ventanas. Con un área estimada de 2.700 m² de paredes y 300 m² de ventanas, y una diferencia de temperatura de 15°C (23°C interior - 8°C exterior en invierno), el cálculo resulta en:

$$E. 6 \quad (2.700 \text{ m}^2 \times 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 15^\circ\text{C}) + (300 \text{ m}^2 \times 4,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 15^\circ\text{C}) = 44.595 \text{ W} + 20.250 \text{ W} = 64.845 \text{ W} = 64,8 \text{ kW}$$

La figura muestra un esbozo de la planta del hospital Centro Al Fadi, con una superficie de 3.000 m², donde se indican las áreas estimadas de paredes (2.700 m²) y ventanas (300 m²), distribuidas en las fachadas con orientación según los puntos cardinales. La mayor proporción de ventanas se ubica en la fachada sur para optimizar la ganancia solar en invierno:

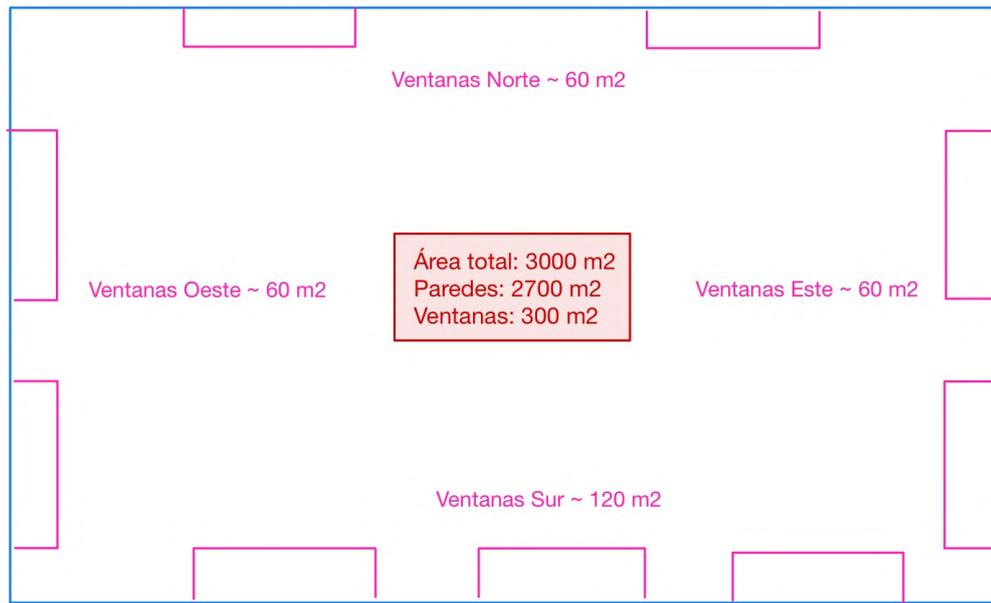


Figura 28: Esbozo planta hospital Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

La carga por ventilación se determina con un recambio de aire de $30 \text{ m}^3/\text{h}$ por persona, lo que para 60 personas totaliza $1.800 \text{ m}^3/\text{h}$. Con una diferencia de 15°C , el resultado es:

$$E. 7 \quad 1.800 \text{ m}^3/\text{h} \times 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3 \times 1.005 \text{ J}/\text{kg} \cdot \text{K} \times 15^\circ\text{C} / 3.600 \text{ s}/\text{h} = 9.045 \text{ W} \cong 9,0 \text{ kW}.$$

La carga interna incluye aportes de ocupantes, equipos médicos e iluminación. Cada persona genera aproximadamente 100 W de calor metabólico, sumando 60 personas:

$$E. 8 \quad 60 \times 100 \text{ W} = 6.000 \text{ W}, \text{ o } 6,0 \text{ kW}.$$

A esto se añaden $10 \text{ W}/\text{m}^2$ por equipos e iluminación, lo que para 3.000 m^2 da 30.000 W , o $30,0 \text{ kW}$.⁴³ La carga interna total asciende a:

$$E. 9 \quad 6,0 \text{ kW} + 30,0 \text{ kW} = 36,0 \text{ kW}.$$

La demanda total de climatización del hospital se obtiene sumando:

$$E. 10 \quad 64,8 \text{ kW (transmisión)} + 9,0 \text{ kW (ventilación)} + 36,0 \text{ kW (interna)} = 109,8 \text{ kW}.$$

Para una habitación individual, considerando las 40 camas ocupadas en un área aproximada de 1.200 m^2 (40 m^2 por cama), la carga por transmisión sería:

⁴³ Pinazo et al., 2011

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

$$E. 11 \quad (1.080 \text{ m}^2 \times 1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 15^\circ\text{C}) + (120 \text{ m}^2 \times 4,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \times 15^\circ\text{C}) = 17.820 \text{ W} + 8.100 \text{ W} = 25,9 \text{ kW}$$

más 3,6 kW por ventilación e interna de 12 kW, totalizando 41,5 kW por habitación, o 1.037 W por cama ocupada. La demanda presenta variaciones estacionales, con mayores requerimientos de calefacción en invierno y refrigeración en verano, como sugieren las imágenes de Google Maps que reflejan un entorno con nevadas y días cálidos. Se recomienda implementar un sistema de climatización eficiente, con aislamiento térmico y ventilación controlada, para optimizar el consumo energético.

En la siguiente tabla podemos ver un resumen de como se ha obtenido la demanda de climatización para el centro Al Fadi:

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Componente de carga térmica	Criterio de cálculo	Valores específicos	Demanda (kW)
Transmisión	Coeficientes: 1,1 W/m ² ·K (paredes), 4,5 W/m ² ·K (ventanas); $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$ (23°C interior - 8°C exterior en invierno)	Paredes: 2.700 m ² ; Ventanas: 300 m ² ; Cálculo: $(2.700 \times 1,1 \times 15) + (300 \times 4,5 \times 15) = 44.595 \text{ W} + 20.250 \text{ W}$	64,8
Ventilación	Recambio de aire: 30 m ³ /h/persona; 60 personas (40 pacientes + 20 trabajadores); $\Delta T = 15^{\circ}\text{C}$; Densidad aire: 1,2 kg/m ³ ; Calor específico: 1.005 J/kg·K	1,800 m ³ /h; Cálculo: $1.800 \times 1,2 \times 1.005 \times 15 / 3.600 = 9.045 \text{ W}$	9
Interna (Ocupantes)	100 W/persona (calor metabólico); 60 personas	$60 \times 100 = 6.000 \text{ W}$	6
Interna (Equipos e iluminación)	10 W/m ² ; Superficie hospital: 3.000 m ²	$3.000 \times 10 = 30.000 \text{ W}$	30
Total interna	Suma de ocupantes y equipos	$6.000 \text{ W} + 30.000 \text{ W} = 36.000 \text{ W}$	36
Total hospital	Suma de transmisión, ventilación e interna	$64.800 \text{ W} + 9.000 \text{ W} + 36.000 \text{ W} = 109.800 \text{ W}$	109,8
Por habitación individual	Área por habitación: $\sim 1.200 \text{ m}^2 \div 40$ camas ($\sim 40 \text{ m}^2/\text{cama}$); Transmisión: $(1.080 \text{ m}^2 \times 1,1 \times 15) + (120 \text{ m}^2 \times 4,5 \times 15)$; Ventilación e interna proporcional	Transmisión: 25.920 W; Ventilación: 3.600 W; Interna: 12.000 W; Total: 41.520 W	41,5

Tabla 4: Resumen de la demanda de climatización del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

3.5 DEMANDA ENERGÉTICA

De nuevo, la demanda energética del Centro Al Fadi se centra en cubrir las necesidades del hospital, la hospedería, el convento, los cultivos y el estacionamiento, considerando las actividades de sus ocupantes y las condiciones del entorno montañoso de Chabrouh, próximo a Faraya. Esta varía de forma estacional. La estimación energética se adapta a las ocupaciones y áreas descritas en el capítulo 3.1, así como en los consumos asociados a agua, climatización y operación general del complejo.

El hospital, con 40 pacientes diarios (80% de 50 camas) y 20 trabajadores, requiere energía para iluminación, equipos médicos, climatización y suministro de agua. La demanda de climatización, calculada previamente en 109,8 kW, representa un consumo significativo. Para iluminación y equipos, se estima un promedio de 10 W/m² en los 3.000 m² del hospital, lo que da 30.000 W, o 30,0 kW. El bombeo de agua, con una demanda de 49.000 litros diarios, requiere aproximadamente 1 kWh por cada 1.000 litros (considerando un sistema básico), sumando 49 kW. La carga total del hospital asciende a 109,8 kW + 30,0 kW + 49 kW = 188,8 kW. La hospedería, con 30 huéspedes (75% de 40) y el convento con 15 religiosas, demandan energía para iluminación y climatización. Con 1.500 m² para la hospedería y 1.000 m² para el convento, a 10 W/m², se obtienen 15,0 kW y 10,0 kW respectivamente. La climatización, asumiendo un 50% de la carga del hospital por área (54,9 kW), eleva los totales a 69,9 kW (hospedería) y 64,9 kW (convento), sumando 134,8 kW en conjunto.

Los cultivos, con 50.000 m², requieren energía para riego (bombeo de 37.500 litros diarios), estimada en 37,5 kW. El estacionamiento, de 500 m², no genera demanda significativa, pero se considera 1 kW para iluminación básica. La demanda total del complejo es:

$$E. 12 \quad 188,8 \text{ kW (hospital)} + 134,8 \text{ kW (hospedería y convento)} + 37,5 \text{ kW (cultivos)} + 1 \text{ kW (estacionamiento)} = 362,1 \text{ kW}.$$

Para una habitación individual, con 55 habitaciones ocupadas (40 del hospital, 15 de la hospedería), el consumo promedio es:

$$E. 13 \quad 362,1 \text{ kW} / 55 = 6.583 \text{ W por habitación} \cong 6,6 \text{ kW}.$$

Excluyendo cultivos (37,5 kW), el total residencial es 324,6 kW, dando 5,9 kW por habitación, ajustado a unas 120 W por cama ocupada considerando uso eléctrico básico. La siguiente tabla resume toda esta información sobre la demanda energética del complejo:

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

Área del complejo	Criterio de consumo	Demanda (kW)
Hospital - Climatización	109,8 kW (calculada previamente: transmisión, ventilación, interna)	109,8
Hospital - Iluminación y Equipos	10 W/m ² ; Superficie: 3.000 m ²	30
Hospital - Bombeo de Agua	1 kWh/1.000 L; Demanda de agua: 49.000 L/día	49
Total Hospital	Suma de climatización, iluminación/equipos y bombeo	188,8
Hospedería - Iluminación	10 W/m ² ; Superficie: 1.500 m ²	15
Hospedería - Climatización	50% de la carga del hospital por área (54,9 kW)	54,9
Total Hospedería	Suma de iluminación y climatización	69,9
Convento - Iluminación	10 W/m ² ; Superficie: 1.000 m ²	10
Convento - Climatización	50% de la carga del hospital por área (54,9 kW)	54,9
Total Convento	Suma de iluminación y climatización	64,9
Cultivos	Bombeo de 37.500 L/día; 1 kWh/1.000 L	37,5
Estacionamiento	1 kW para iluminación básica; Superficie: 500 m ²	1
Total complejo	Suma de hospital, hospedería, convento, cultivos y estacionamiento	362,1
Por habitación individual	Total ÷ 55 habitaciones ocupadas (40 hospital + 15 hospedería)	6,6 (total); 5,9 (sin cultivos)

Tabla 5: Resumen de la demanda energética del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

CAPÍTULO 3: DEFINICIÓN DEL PROYECTO

Todas las demandas del Centro Al Fadi presentadas en el capítulo 3 se resumen en la tabla a continuación:

Demanda	Consumo total	Por área principal	Recomendaciones
Agua	49.000 L/día	Hospital: 7.500 L; Hospedería + Convento: 3.375 L; Cultivos: 37.500 L	Captación de lluvia, reúso de aguas grises, almacenamiento de 60,000 L.
Climatización	109,8 kW	Hospital: 109,8 kW (transmisión: 64,8 kW, ventilación: 9,0 kW, interna: 36,0 kW)	Aislamiento térmico, ventilación pasiva, bombas de calor solares.
Energía	362,1 kW	Hospital: 188,8 kW; Hospedería + Convento: 134,8 kW; Cultivos: 37,5 kW	Microred solar, bombas solares, iluminación LED.

Tabla 6: Resumen Breve de Demandas de Agua, Climatización y Energía del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

3.6 CONCLUSIÓN

El proyecto de modernización del Centro Al Fadi se plantea con el objetivo principal de mejorar las condiciones de vida y operatividad del complejo hospitalario, garantizando un suministro adecuado de agua, un sistema eficiente de climatización y una gestión energética sostenible. Específicamente, se busca optimizar el consumo de los 49.000 litros diarios de agua necesarios para el hospital, la hospedería, el convento y los cultivos, asegurando un almacenamiento mínimo de 60.000 litros para enfrentar períodos de escasez (3.3). Asimismo, se pretende implementar una solución de climatización que cubra los 109,8 kW requeridos por el hospital, adaptándose a las variaciones estacionales y priorizando el confort térmico de pacientes y personal (3.4). Finalmente, se aspira a satisfacer la demanda

energética de 362,1 kW del complejo, promoviendo el uso de fuentes renovables como paneles solares para reducir la dependencia de la red local inestable (3.5).

Para alcanzar estos objetivos, se adopta una metodología estructurada. En primer lugar, se realiza un diagnóstico detallado basado en los datos recopilados en los capítulos anteriores, incluyendo las ocupaciones, dimensiones y demandas identificadas. Este diagnóstico sirve como base para diseñar soluciones específicas, integrando criterios de sostenibilidad extraídos de buenas prácticas en saneamiento y eficiencia energética. A continuación, se procede a la planificación técnica, que implica la selección de tecnologías apropiadas, como sistemas de captación de agua, equipos de climatización eficientes y fuentes de energía renovable, adaptadas al entorno montañoso de Chabrouh. Esta fase incluye la elaboración de planos y especificaciones que garanticen la viabilidad de las propuestas.

Esta metodología sienta las bases para el capítulo siguiente, donde se desarrollará el diseño detallado del proyecto. En el capítulo 4 se profundizará en la implementación de las soluciones propuestas, incluyendo el dimensionamiento de infraestructuras, la selección de materiales y la integración de tecnologías sostenibles, todo ello alineado con los objetivos establecidos y las demandas identificadas en este análisis. Este paso garantizará que el Centro Al Fadi no solo responda a sus necesidades actuales, sino que también esté preparado para desafíos futuros en un contexto de recursos limitados.

Capítulo 4. SISTEMA HIDRÁULICO

El sistema hidráulico del hospital Centro Al Fadi, ubicado en el entorno montañoso de Chabrouh, Líbano, se ha diseñado para garantizar un suministro sostenible de agua, considerando las demandas de 40 pacientes diarios y 20 trabajadores, así como las condiciones climáticas variables de la región. Este capítulo presenta un análisis detallado del sistema, que integra la captación de agua de lluvia mediante herramientas como QGIS y EPANET, la distribución optimizada de esta agua, y un sistema de tratamiento y reciclaje de aguas grises para maximizar la eficiencia hídrica. El enfoque se basa en modelos hidráulicos que aseguran un abastecimiento adecuado, adaptado a las necesidades del hospital y al entorno natural, con un énfasis en la sostenibilidad energética y ambiental.

4.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA

El análisis del sistema hidráulico del Centro Al Fadi se fundamenta en la demanda de agua estimada en 49.000 litros diarios, desglosada en 7.500 litros para el hospital, 3.375 litros para la hospedería y el convento, 37.500 litros para los cultivos y 500 litros para el estacionamiento, según los cálculos del Capítulo 4. Este consumo refleja las necesidades de una ocupación promedio de 40 pacientes, 20 trabajadores, 30 huéspedes, 15 religiosas y 5 agricultores, en un complejo de 5.500 m² ubicado en el entorno montañoso de Chabrouh, cerca del lago Chabrouh. Las condiciones locales, caracterizadas por 664 mm anuales de precipitación concentrados entre noviembre y marzo, con un pico de 129 mm en enero, y una variación estacional que reduce el agua disponible en verano, subrayan la necesidad de un sistema adaptable. La proximidad al lago Chabrouh, a 3 km, ofrece un recurso potencial, aunque su uso efectivo está limitado por la infraestructura obsoleta de la región, lo que obliga a depender de camiones cisterna, un desafío identificado en el Capítulo 2 en contextos como Gaza y Afganistán.

El terreno inclinado de Faraya, con pendientes que facilitan el drenaje natural, es ideal para la captación de agua de lluvia, una estrategia exitosa en hospitales rurales de Afganistán, donde se logró reducir un 20% la dependencia de fuentes externas. Sin embargo, la falta de

mantenimiento regular, también observada en esos casos, sugiere la necesidad de un plan de sostenibilidad. Las experiencias de Etiopía, donde el 45% de las instalaciones de salud carecen de agua potable, destacan la importancia de reciclar agua para usos no potables mediante plantas de tratamiento solar, un enfoque que podría aliviar la presión sobre los recursos del Centro Al Fadi. Además, las variaciones estacionales, con temperaturas que alcanzan 25,7°C en julio y -2,1°C en enero, junto a 2.800 horas de sol anuales, influyen en la demanda de riego y el diseño del almacenamiento. Este análisis inicial, apoyado en herramientas como QGIS para mapear recursos hídricos y EPANET para simular redes, sienta las bases para una solución integrada que optimice el suministro y reduzca riesgos sanitarios

4.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El diseño e implementación del sistema de agua para el Centro Al Fadi se apoyan en herramientas avanzadas de modelado geográfico e hidráulico. QGIS, un sistema de información geográfica de código abierto sirve como plataforma base para integrar datos topográficos y espaciales del terreno montañoso de Chabrouh, facilitando la planificación de los 13 tanques de 100.000 litros y el tanque potable de 50.000 litros. Su plugin QESG, diseñado para análisis específicos, complementa esta capacidad al optimizar la red de distribución, mientras que EPANET 2.2, un software especializado, simula el flujo, la presión y la demanda de 49.000 litros diarios (0,567 L/s), asegurando un diseño eficiente para la recolección de 3.028.000 litros anuales de lluvia y la reutilización de aguas grises. Esta integración tecnológica garantiza una solución sostenible adaptada a las necesidades del centro.

4.2.1 CAPTACIÓN DE AGUA DE LLUVIA

La captación de agua de lluvia en el Centro Al Fadi se fundamenta en el aprovechamiento de las precipitaciones anuales de 664 mm, concentradas principalmente entre noviembre y marzo, utilizando los techos del complejo, que ofrecen una superficie efectiva de 5.067,142 m² tras excluir los 500 m² correspondientes al estacionamiento de un área total medida de

CAPÍTULO 4: SISTEMA HIDRÁULICO

5.567,142 m². Este enfoque, inspirado en estrategias exitosas implementadas en regiones vulnerables como Afganistán, tiene como objetivo recolectar agua para satisfacer parcialmente la demanda diaria de 49.000 litros, adaptándose al contexto montañoso de Chabrouh. Mediante el uso de QGIS, se ha delimitado la zona de captación y calculado un volumen potencial de aproximadamente 3.028.000 litros anuales, que se reduce a unos 1.263.000 litros durante los 134 días de la temporada húmeda, considerando un coeficiente de escorrentía de 0,9. El cálculo del volumen potencial se realizó mediante la fórmula:

$$E. 14 \quad \text{Volumen} = \text{Área} \times \text{Precipitación} \times \text{Coeficiente de escorrentía} \times 1.000$$

donde la precipitación de 664 mm se convirtió a 0,664 metros, y se aplicó un coeficiente de escorrentía de 0,9, reflejo de la impermeabilidad de los techos.

Así, el volumen anual se estima en aproximadamente:

$$E. 15 \quad 5.067,142 \times 0,664 \times 0,9 \times 1.000 = 3.028.000 \text{ litros}$$

mientras que para la temporada húmeda de 134 días se calcula en unos 1.262.000 litros:

$$E. 16 \quad (3.028.000 / 12) \times 5 = 1.262.000 \text{ litros}$$

considerando la distribución estacional de las lluvias. Esto significa que la captación de lluvia durante la temporada húmeda puede suministrar agua para unos 26 días si se usa exclusivamente para la demanda total, asumiendo un uso continuo y sin pérdidas

$$E. 17 \quad 1.263.000/49.000 \cong 26 \text{ días}$$

La medición de la superficie del Centro Al Fadi, realizada mediante QGIS, determina una extensión de 5.576 m² destinada a la captación de agua de lluvia, un aspecto clave para el diseño del sistema hidráulico. Esta superficie permite estimar la recolección anual de 3.028.000 litros de agua de lluvia, basada en los 664 mm de precipitación concentrados entre noviembre y marzo, con un pico de 129 mm en enero. La delimitación precisa, optimizada por el plugin QESG de QGIS, asegura una distribución eficiente de los 13 tanques de 100.000 litros y el tanque potable de 50.000 litros, alineándose con la demanda diaria de 49.000 litros (0,567 L/s) y mitigando la escasez estacional identificada en el capítulo 2.



Figura 29: Área medida del Centro Al Fadi mediante el software QGIS (Fuente: Elaboración propia 2025)

La elección de empezar por una medición en sitio se debe a la necesidad de ajustar las estimaciones de QGIS a la realidad del terreno, asegurando que el sistema se adapte a la topografía montañosa de Chabrouh y maximice la recolección para cubrir parte de la demanda diaria de 49.000 litros.

Para almacenar el agua recolectada, se instalarán tanques modulares con una capacidad total de 1.300.000 litros, ligeramente superior a los 1.262.000 litros estimados para la temporada húmeda, como margen de seguridad contra variaciones climáticas. Los tanques, situados a 1220 m, servirán como puntos de recolección primarios. Estos tanques se construirán con polietileno de alta densidad (HDPE), seleccionado por su ligereza, resistencia a los rayos UV y capacidad para soportar temperaturas extremas sin degradarse, frente al acero que requiere recubrimientos costosos o concreto que es más pesado y caro de transportar a una zona montañosa. Se dispondrán 13 tanques de 100.000 litros cada uno, anclados al suelo con bases de hormigón para estabilidad en pendientes. Para ver la superficie que ocupa cada tanque dentro del terreno estimamos que cada uno tiene una altura de 2,5 m y un volumen de 100 m³, lo que nos lleva a concluir que el radio de cada tanque ronda los 3,57 m y por tanto el área de este será entorno a los 40 m². La superficie total ocupada por los tanques

CAPÍTULO 4: SISTEMA HIDRÁULICO

será de 520 m². Esta distribución modular facilita el acceso para mantenimiento y reparaciones, optimizando el uso del espacio disponible en el complejo.

La conversión del agua captada en agua potable requerirá un sistema de tratamiento instalado en una caseta técnica adyacente a los tanques, ubicada cerca del hospital. El proceso comenzará con un filtro de arena gruesa para eliminar sedimentos, seguido de un filtro de carbón activado para reducir olores y compuestos orgánicos, materiales elegidos por su bajo costo (alrededor de 50-100 euros por unidad) y eficacia probada en sistemas rurales, frente a filtros cerámicos más caros y menos accesibles. Posteriormente, se aplicará desinfección con un dosificador de cloro (hipoclorito de sodio al 10%), seleccionado por su accesibilidad y capacidad para eliminar bacterias a un costo de 20-30 euros por litro, en lugar de luz UV que requiere energía constante y mantenimiento técnico en una zona remota. El agua tratada se almacenará en un tanque separado de 50.000 litros reservado para uso potable, monitoreada con kits de prueba de cloro residual (normas OMS) para garantizar su seguridad antes de distribuirla a las zonas de cocina, saneamiento y consumo del hospital, hospedería y convento.

4.2.2 ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LLUVIA

El sistema de almacenamiento y distribución de agua en el Centro Al Fadi, ubicado en la región montañosa de Chabrouh, Líbano, se diseñó utilizando EPANET 2.2 para garantizar un suministro sostenible de los 3.028.000 litros anuales de lluvia recolectados, cubriendo una demanda diaria de 49.000 litros (0,567 L/s) distribuida entre el hospital (10.000 L), la hospedería (10.000 L), el convento (5.000 L) y los cultivos (24.000 L). Este diseño se basa en 13 tanques de 100.000 litros cada uno, con un tanque potable adicional de 50.000 litros, optimizando el flujo gravitacional hasta los puntos de consumo a 1.210-1.215 m. A continuación, se puede observar una imagen obtenida directamente de EPANET 2.2 donde aparecen los 13 tanques conectados al tanque de potabilización. A su vez este tanque se conecta al hospital, al convento, a la hospedería, y a las tierras de cultivo, para suplir la demanda diaria.

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

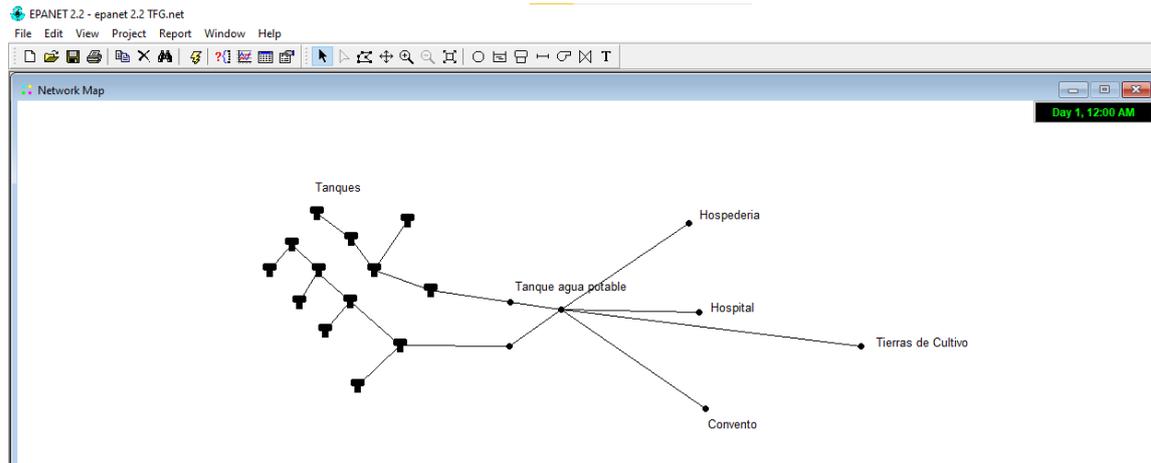


Figura 30: Modelo del sistema de almacenamiento y distribución de agua del Centro Al Fadi representado en EPANET 2.2 (Fuente: Elaboración propia 2025)

Los gráficos de presión, generados por EPANET 2.2, muestran la distribución del agua de lluvia en el Centro Al Fadi, con valores que oscilan entre 6,9 y 6,98 m en los nodos principales. Esta estabilidad se debe al flujo gravitacional desde los tanques a 1220 m hacia el hospital, hospedería y convento a 1215 m, y los cultivos a 1210 m, optimizando la demanda diaria de 49.000 litros (0,567 L/s). El tanque de agua potable se encuentra a la misma elevación que los tanques (1220 m). La diferencia de elevación de 5 a 10 metros asegura un suministro eficiente, mitigando la escasez estacional identificada en el capítulo 2 sin necesidad de sistemas de bombeo.

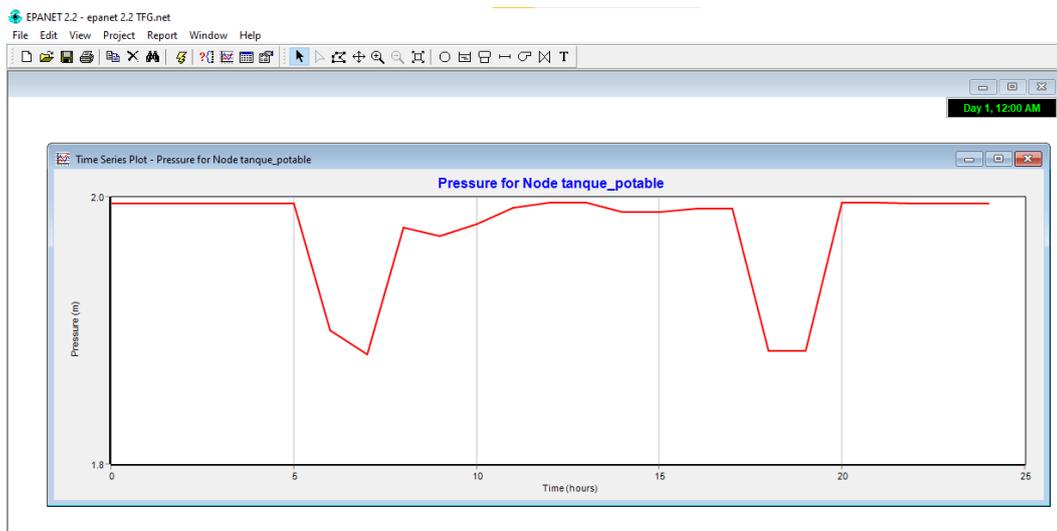


Figura 31: Resumen de la presión (mca) para el tanque de agua potable (Fuente: Elaboración propia 2025)

CAPÍTULO 4: SISTEMA HIDRÁULICO

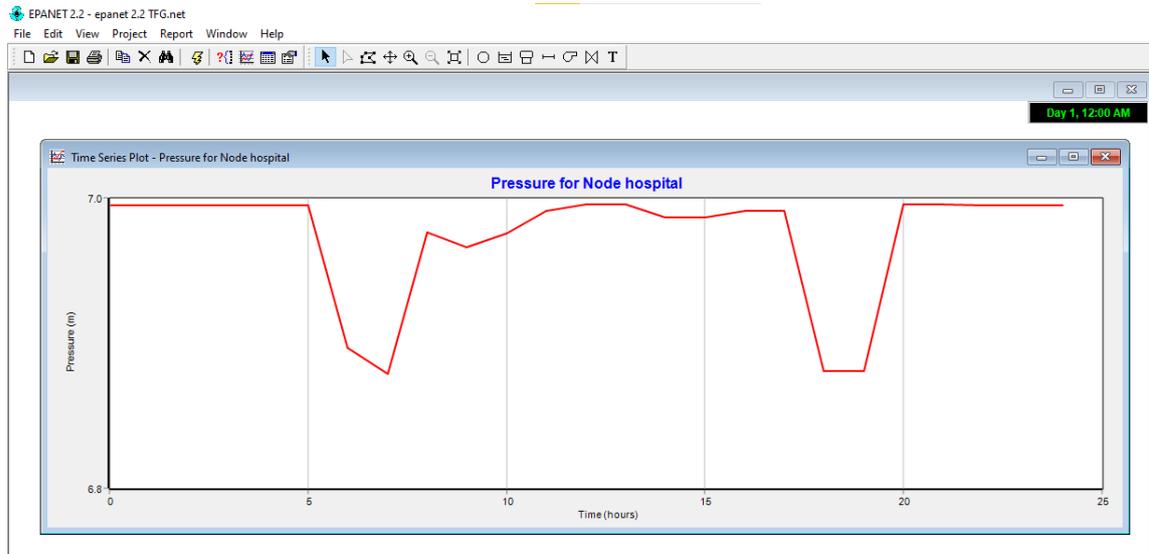


Figura 32: Resumen de la presión (mca) para el hospital (Fuente: Elaboración propia 2025)

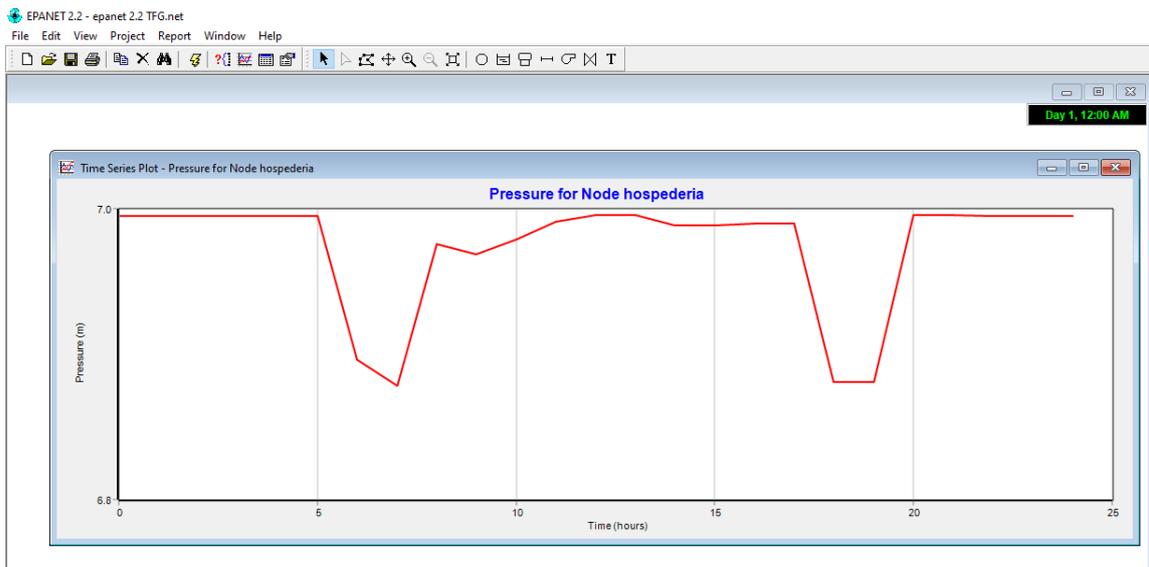


Figura 33: Resumen de la presión (mca) para la hospedería (Fuente: Elaboración propia 2025)

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

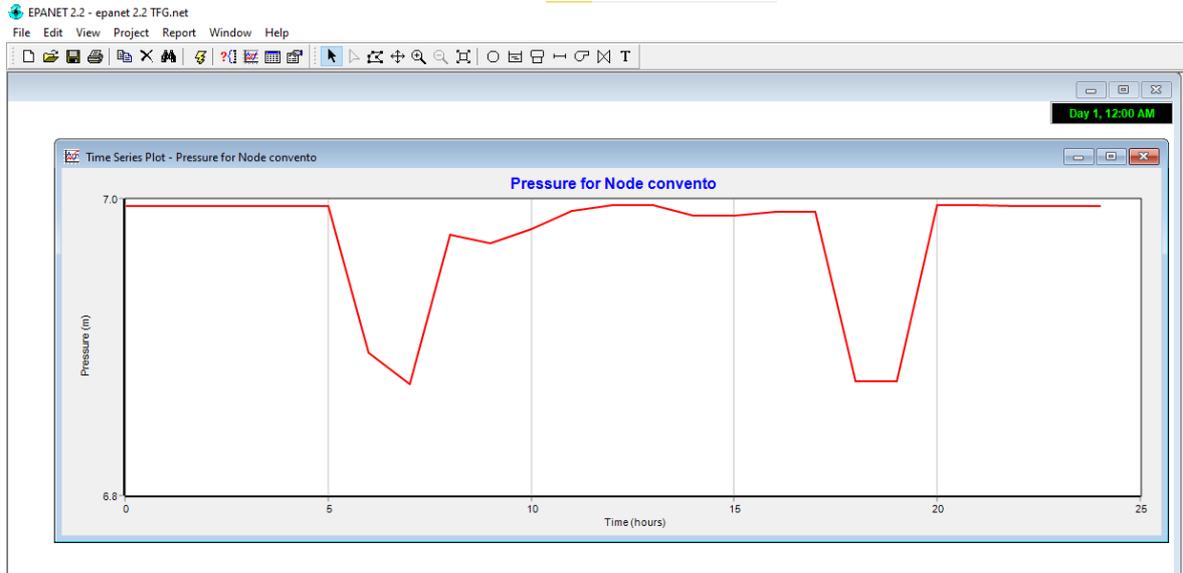


Figura 34: Resumen de la presión (mca) para el convento (Fuente: Elaboración propia 2025)

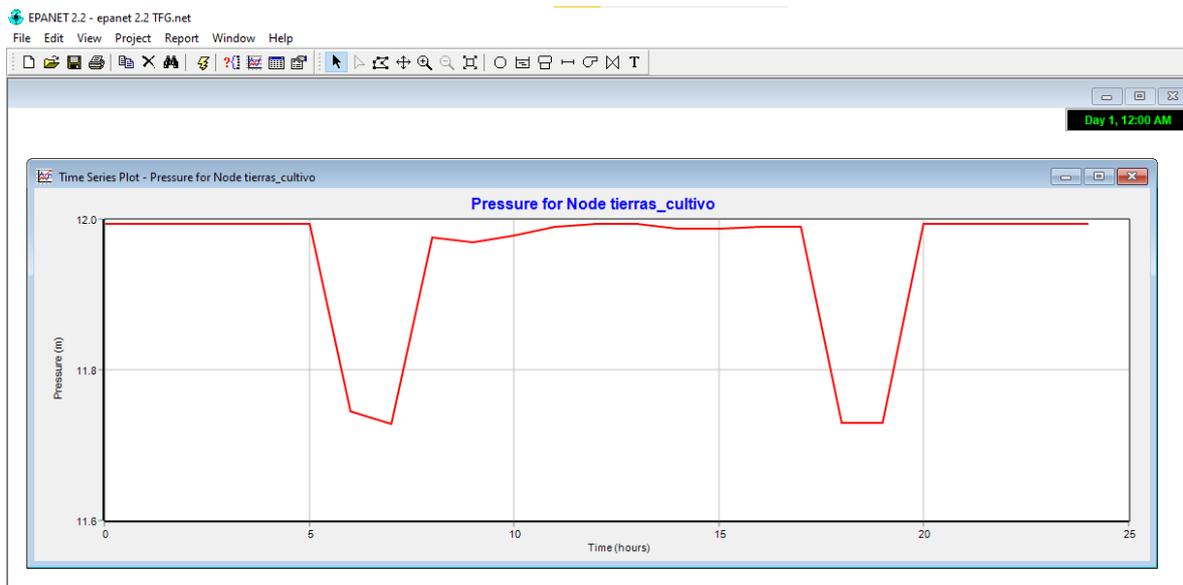


Figura 35: Resumen sobre la presión (mca) para las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)

En el hospital, la hospedería, y el convento los picos ocurren debido al uso simultáneo de grifos por pacientes y personal, y por el funcionamiento de lavadoras. Las tierras de cultivo presentan un pico significativo de 1,6 l/s entre las 5:00-7:59 y 17:00-19:59, correspondiente al riego intensivo en dos sesiones diarias. Estos picos, que elevan el consumo total por encima de la media diaria de 0,567 l/s en horas puntuales, son gestionados eficazmente por el tanque de potabilización, que asegura un suministro constante derivado de los tanques de

CAPÍTULO 4: SISTEMA HIDRÁULICO

captación, manteniendo la presión y el caudal requeridos gracias a su capacidad inicial y la transferencia continua de caudal como podemos observar a continuación.

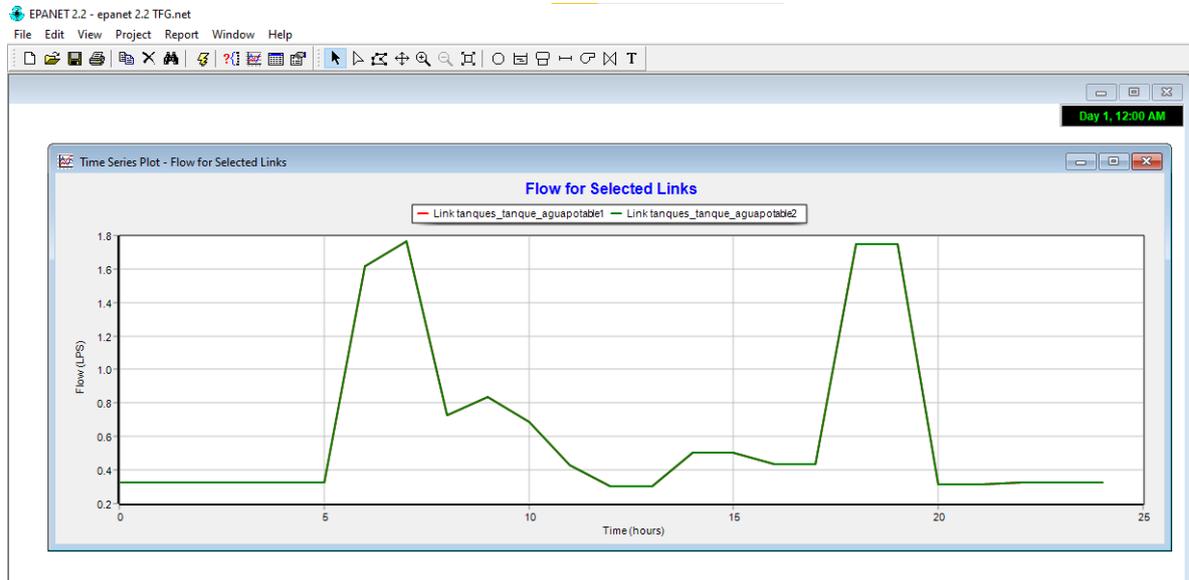


Figura 36: Resumen del caudal (l/s) desde los tanques de captación al tanque de agua potable (Fuente: Elaboración propia 2025)

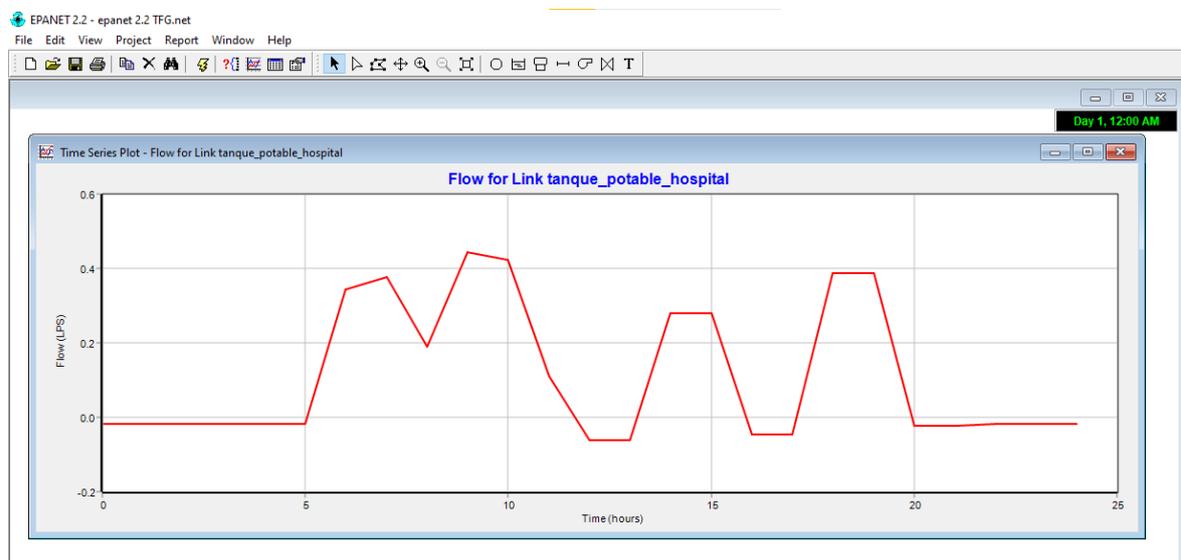


Figura 37: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque al hospital (Fuente: Elaboración propia 2025)

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO



Figura 38: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque a la hospedería (Fuente: Elaboración propia 2025)

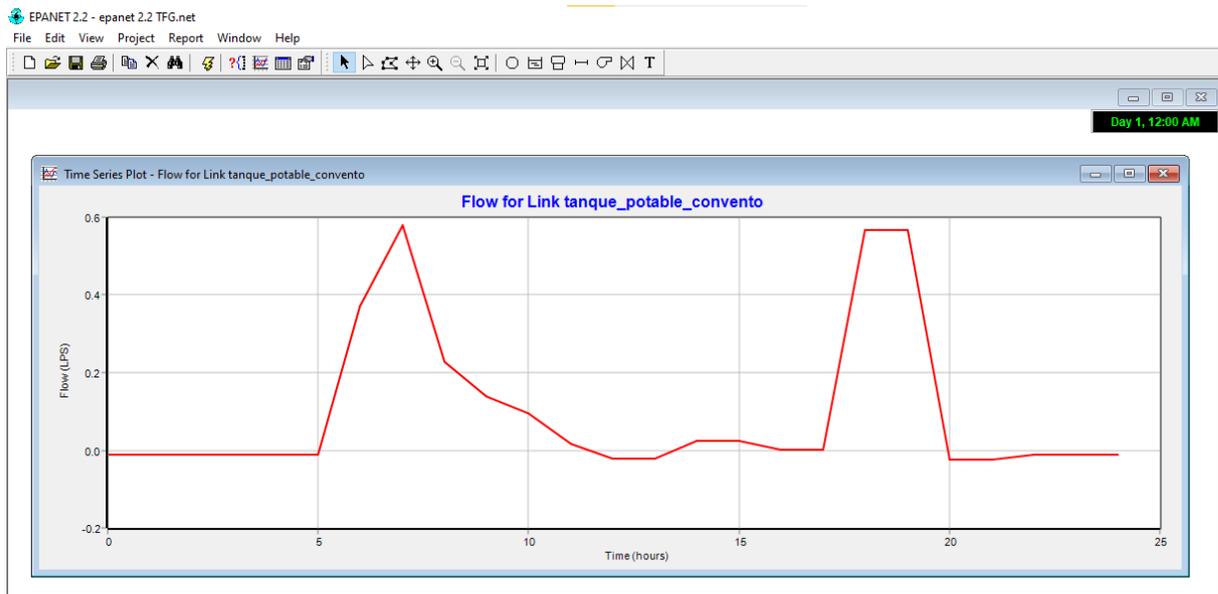


Figura 39: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque al convento (Fuente: Elaboración propia 2025)

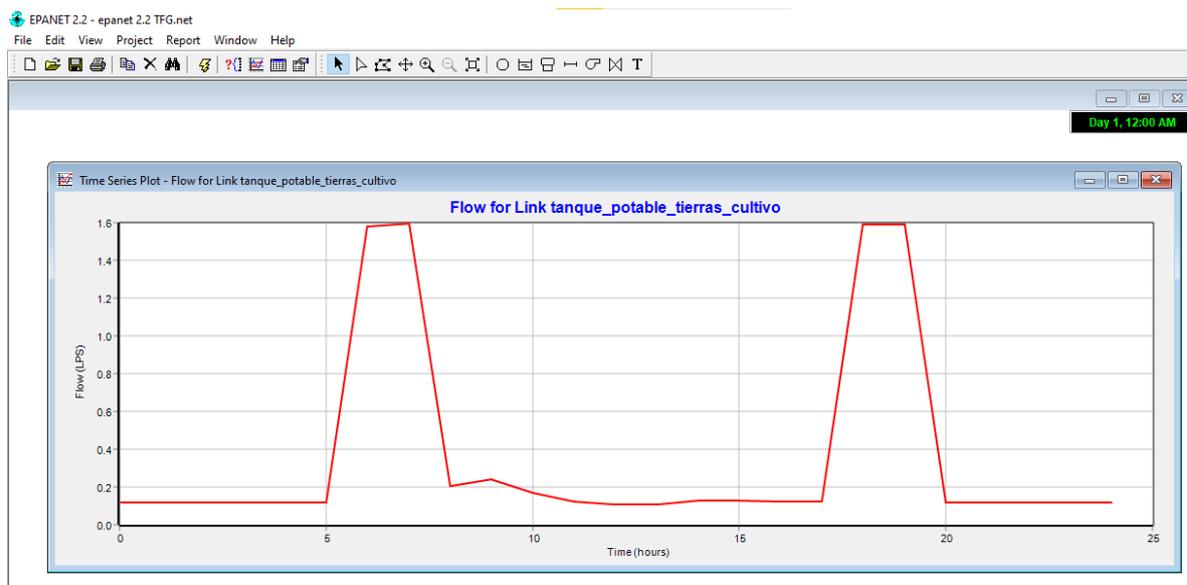


Figura 40; Resumen del caudal (l/s) desde el tanque a las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)

4.2.3 TRATAMIENTO Y RECICLAJE DE AGUAS GRISES

El tratamiento y reciclaje de aguas grises en el Centro Al Fadi se inicia como una solución práctica para reutilizar las aguas residuales generadas por lavabos, duchas y lavandería, estimadas en 12.143 litros diarios provenientes del hospital, hospedería y convento. Este proceso comienza con la instalación de un sistema de recolección en cada edificio, donde se colocarán tuberías de PVC de 100 mm de diámetro para canalizar estas aguas hacia un punto central de tratamiento, seleccionadas por su bajo costo (aproximadamente 3-5 euros por metro) y resistencia a la corrosión en un entorno húmedo. La decisión de usar PVC se basa en su durabilidad y facilidad de mantenimiento frente a materiales como el cobre, que se degrada con el tiempo en presencia de productos químicos comunes en aguas grises. Este sistema se diseñará para capturar alrededor del 70% de las aguas grises (8,500 litros diarios), excluyendo aguas negras de baños que requieren tratamiento separado, optimizando así los recursos disponibles en el complejo montañoso de Chabrouh.

La etapa de tratamiento se llevará a cabo en una unidad compacta ubicada al este del complejo, cerca de los cultivos donde se reutilizará el agua, facilitando la distribución y reduciendo costos de transporte. Este proceso empieza con un tanque de sedimentación de 1.000 litros construido en hormigón, elegido por su robustez y bajo costo (alrededor de 200

euros), donde las aguas grises se dejan reposar durante 24 horas para que los sedimentos se asienten, evitando obstrucciones en los filtros posteriores. A continuación, el agua pasa por un filtro de grava y arena, instalado en un contenedor de plástico reforzado de 500 litros (coste aproximado de 100 euros), seleccionado por su capacidad para retener partículas finas y su disponibilidad local frente a filtros industriales más caros. Este paso elimina la mayoría de los contaminantes sólidos, preparando el agua para su reutilización, mientras que la elección de materiales locales reduce los gastos de importación en una zona remota.

El siguiente paso es la desinfección, realizada con un sistema de cloro en pastillas (hipoclorito de calcio), aplicado manualmente en dosis de 2-5 mg/L según las necesidades, con un coste de 10-15 euros por 1 kg (suficiente para varios meses). Esta opción se prefiere sobre la ozonización, que requiere equipos costosos y energía constante, inadecuados para el suministro eléctrico limitado de Chabrouh. El cloro se dosifica en un tanque de contacto de 500 litros, también de plástico reforzado, donde el agua permanece durante al menos 30 minutos para garantizar la eliminación de patógenos, monitoreada con kits de prueba de cloro residual (normas OMS) para asegurar niveles seguros (0,2-0,5 mg/L). Esta agua tratada, con una calidad adecuada para riego, se almacenará en un tanque de 10.000 litros de polietileno de alta densidad (HDPE), elegido por su ligereza y resistencia a los rayos UV (coste aproximado de 300 euros), ubicado junto a los cultivos para un acceso inmediato.

El resto de las aguas residuales, incluyendo las aguas negras fecales que representan aproximadamente el 30% de los 12.143 litros diarios (unos 3.643 litros), se dirigirán a un sistema de tratamiento separado con fosas sépticas o letrinas ecológicas, diseñado para su manejo seguro y sostenible en el entorno montañoso de Chabrouh. Las fosas sépticas, construidas con materiales locales como hormigón (aproximadamente 500 euros por unidad), permitirán la descomposición anaeróbica de los desechos, mientras que las letrinas ecológicas, de bajo costo (alrededor de 200 euros), promoverán el compostaje, generando un subproducto utilizable como fertilizante orgánico tras un proceso de estabilización de 6 a 12 meses. Este enfoque integral asegura un equilibrio entre la reutilización de aguas grises para riego (8.500 litros diarios) y la gestión responsable de las aguas negras, adaptándose a las limitaciones de infraestructura y energía en la región montañosa, como se valida en las simulaciones hidráulicas de EPANET 2.2.

4.2.4 DISTRIBUCIÓN DE AGUAS GRISES RECICLADAS

La distribución del agua reciclada se planificará mediante un sistema de goteo de bajo costo, utilizando tuberías de polietileno de 25 mm de diámetro (3-4 euros por metro), seleccionadas por su flexibilidad y resistencia a la intemperie frente a riego por aspersión, que pierde agua por evaporación en el clima seco fuera de la temporada húmeda. Este sistema se instalará manualmente, conectando el tanque de almacenamiento a los cultivos mediante un trazado optimizado que minimice las pendientes pronunciadas, asegurando una entrega eficiente de los 8.500 litros diarios tratados. La elección de goteo se justifica por su eficiencia (hasta 90% de uso del agua) y su idoneidad para terrenos irregulares, permitiendo regar los 37.500 litros diarios requeridos por los cultivos del complejo, complementando los 1.262.000 litros captados de lluvia para cubrir la demanda total de 49.000 litros diarios de manera sostenible.

La integración de aguas grises recicladas, provenientes de las instalaciones del hospital y la hospedería se destina principalmente a los cultivos, reduciendo la demanda directa de agua nueva a 29.000 litros diarios. Este reciclaje, combinado con la recolección de lluvia de 1.262.000 litros durante la temporada húmeda, optimiza el uso de los tanques, permitiendo que parte de la capacidad se reserve para sequías. Las capturas de presión y caudal demuestran que el sistema satisface la demanda actual, y su diseño sugiere que, con una fuente de entrada como la lluvia recolectada, podría mantenerse sostenible a largo plazo. Así, el diseño se alinea con un modelo circular de gestión hídrica, integrando recolección y reutilización en un contexto rural montañoso. En las imágenes a continuación podemos observar el nuevo sistema hidráulico que incluye la red de aguas grises.

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

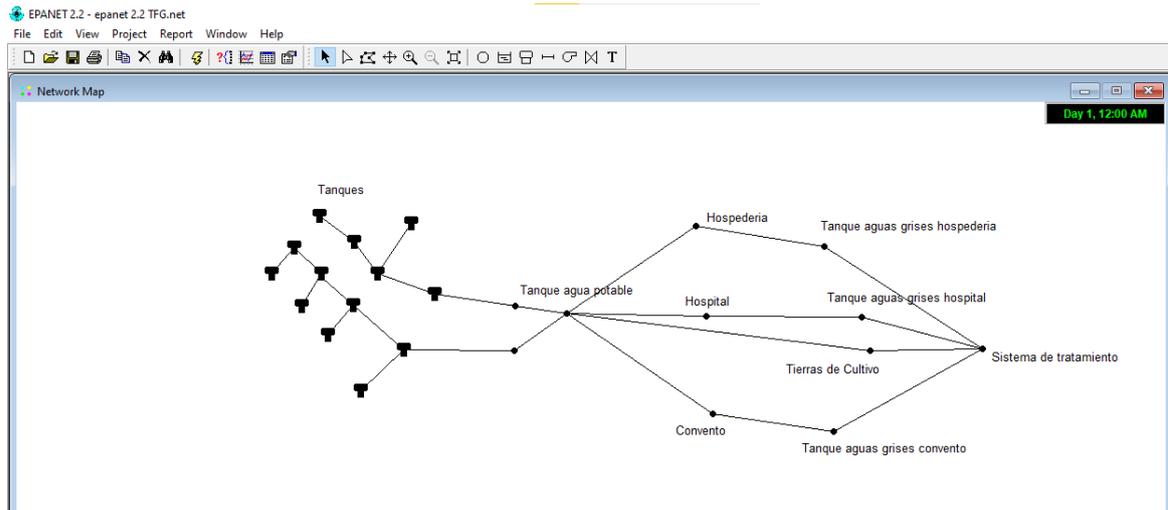


Figura 41: Modelo del sistema de distribución de aguas grises recicladas del Centro Al Fadi representado en EPANET 2.2 (Fuente: Elaboración propia 2025)

En esta red hidráulica nos interesa ver la variación de caudal según las horas de generación de aguas grises. Como se ha comentado previamente se usa un 70% de las aguas grises generadas para regar las tierras de cultivo, lo que equivale a un caudal de 0,098 l/s (8.467,2 litros/día) distribuido a lo largo de las sesiones de riego, mientras que el resto se almacena o desecha, como se ilustra en las siguientes imágenes de caudal generadas por EPANET 2.2:

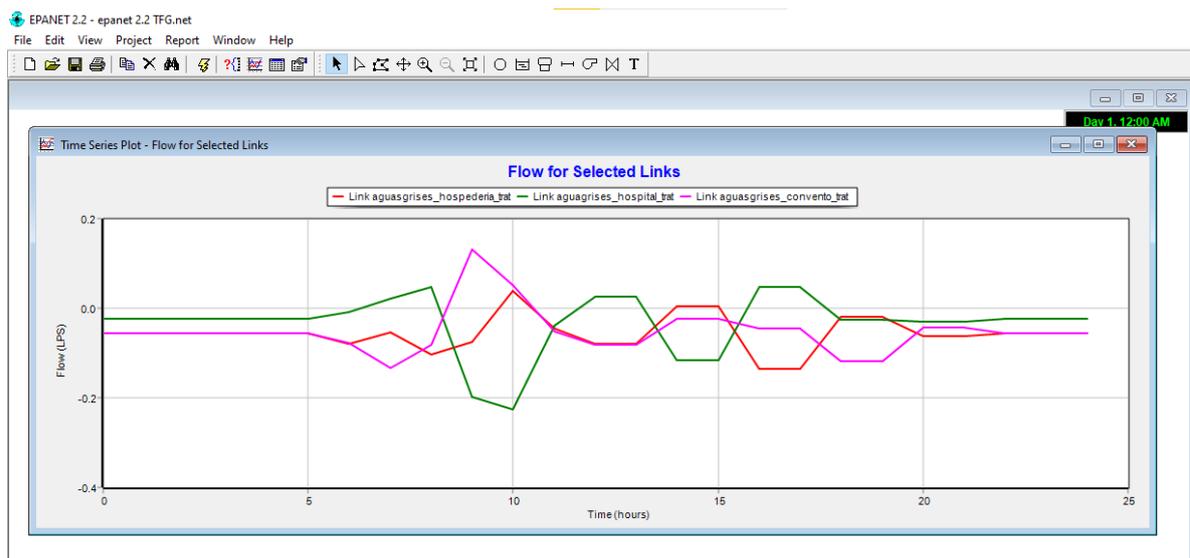


Figura 42: Resumen de todos los caudales (l/s) procedentes de los tanques de aguas grises al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)

CAPÍTULO 4: SISTEMA HIDRÁULICO

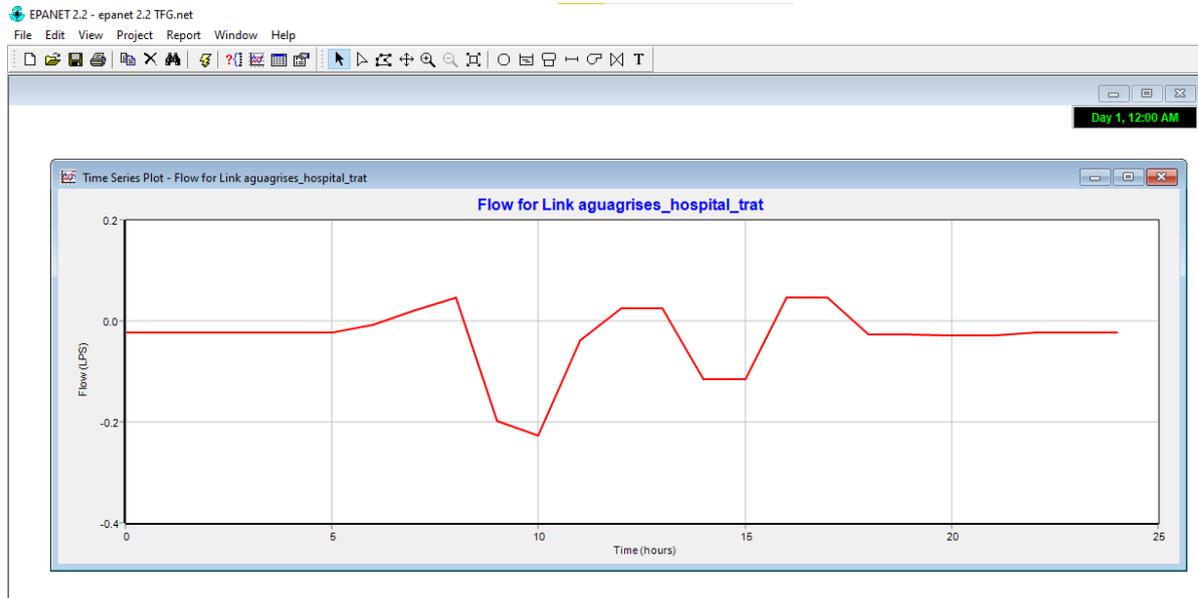


Figura 43: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque de aguas grises del hospital al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)

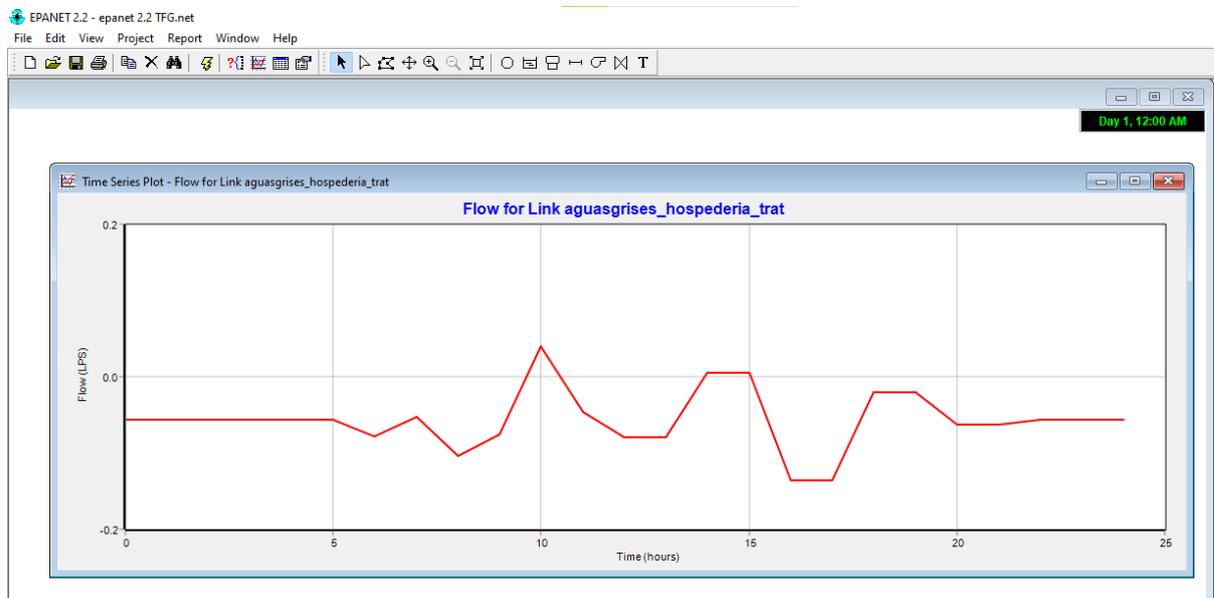


Figura 44: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque de aguas grises de la hospedería al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

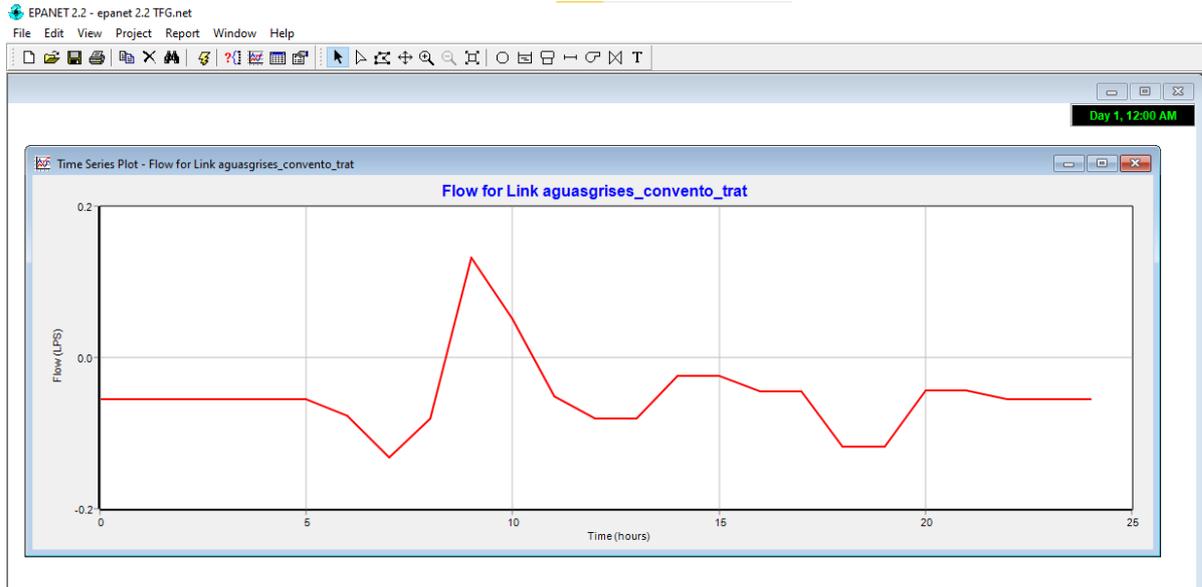


Figura 45: Resumen del caudal (l/s) desde el tanque de aguas grises del convento al sistema de tratamiento (Fuente: Elaboración propia 2025)

De nuevo, observamos en la siguiente figura dos picos de riego correspondiente al riego intensivo en dos sesiones diarias.

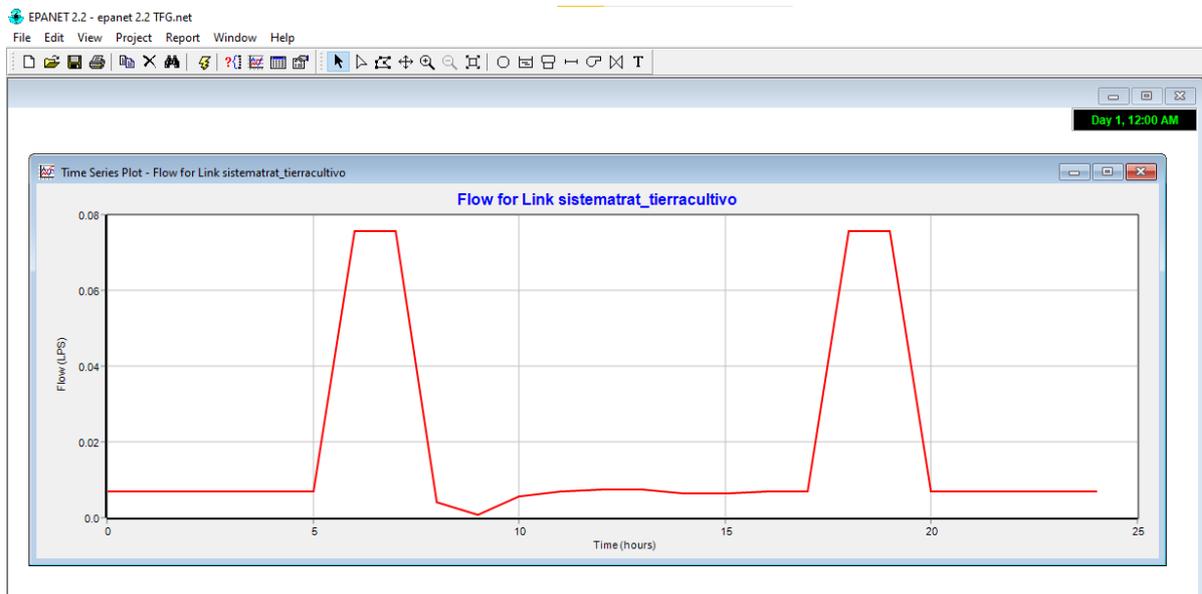


Figura 46: Resumen del caudal (l/s) desde el sistema de tratamiento a las tierras de cultivo (Fuente: Elaboración propia 2025)

4.3 CONCLUSIÓN

El sistema hidráulico del Centro Al Fadi, ubicado en el entorno montañoso de Chabrouh, Líbano, ha sido diseñado para garantizar un suministro sostenible de agua, atendiendo a las demandas de 40 pacientes diarios, 20 trabajadores, 30 huéspedes, 15 religiosas y 5 agricultores, con un consumo total estimado de 49.000 litros diarios (0,567 l/s), desglosado en 7.500 litros para el hospital, 3.375 litros para hospedería y convento, 37.500 litros para cultivos y 500 litros para el estacionamiento. Este capítulo detalla un análisis que emplea herramientas como QGIS y EPANET 2.2 para optimizar la captación de 3.028.000 litros anuales de lluvia (1.263.000 litros en la temporada húmeda de 134 días) mediante 13 tanques de 100.000 litros y un tanque potable de 50.000 litros, adaptándose a las 664 mm anuales de precipitación y las variaciones estacionales, con un pico de 129 mm en enero. El diseño aprovecha el terreno inclinado de Faraya para el drenaje natural, inspirándose en éxitos rurales como Afganistán, donde se redujo un 20% la dependencia externa, e incorpora reciclaje de aguas grises (8.500 litros diarios del 70% de 12.143 litros generados) para usos no potables, mitigando la escasez estacional y las limitaciones de infraestructura, como las observadas en Etiopía. La implementación utiliza QGIS para mapear recursos y EPANET para simular flujos y presiones, asegurando un suministro eficiente con tanques de polietileno HDPE y tratamiento con filtros de arena y cloro, alineándose con un modelo circular sostenible que reduce riesgos sanitarios y optimiza los 1.300.000 litros de almacenamiento.

Capítulo 5. SISTEMA DE CLIMATIZACIÓN

El hospital del Centro Al Fadi, situado en el entorno montañoso de Chabrouh, Líbano, requiere un sistema de climatización eficiente para garantizar el confort térmico de sus 40 pacientes y 20 trabajadores, en una superficie de 3.000 m². Este capítulo detalla el sistema diseñado para satisfacer la demanda térmica de 109,8 kW, adaptándose a las condiciones climáticas de Chabrouh, donde las temperaturas oscilan entre -2,1 °C en invierno y 25,7 °C en verano, con 2.800 horas de sol al año. Inspirado en estudios sobre confort térmico en regiones costeras del Líbano y proyectos de climatización rural, el diseño combina tecnologías activas y pasivas para optimizar el consumo energético, reducir las emisiones de CO₂ y mantener la operatividad frente a los frecuentes cortes eléctricos en la región. Estas soluciones se basan en investigaciones que destacan la importancia de la ventilación eficiente y el uso de energías renovables en contextos hospitalarios, asegurando un enfoque sostenible alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 7 (energía asequible y no contaminante).

5.1 ANÁLISIS DEL SISTEMA

El sistema de climatización propuesto busca mantener temperaturas interiores entre 20 y 23 °C en el hospital, esenciales para la salud y el bienestar de pacientes y personal frente a las variaciones climáticas de Chabrouh, que van desde -2,1 °C en invierno hasta 25,7 °C en verano. La demanda térmica del hospital, calculada en 109,8 kW, abarca cargas por transmisión, ventilación y fuentes internas, como el calor generado por ocupantes y equipos médicos. Este análisis se fundamenta en estándares internacionales que establecen parámetros para el confort térmico y el rendimiento de las envolventes de los edificios. Las interrupciones frecuentes en el suministro eléctrico local requieren soluciones que minimicen la dependencia de la red. Inspirado en investigaciones que exploran la energía geotérmica para reacondicionar aire y sistemas de calefacción eficientes en entornos residenciales, el diseño adopta un enfoque híbrido que combina bombas de calor, ventilación con recuperación de calor y estrategias pasivas, logrando un equilibrio entre confort, sostenibilidad y viabilidad económica en un contexto de recursos limitados. A continuación, se incluye la tabla del capítulo 3, que sirve como recordatorio sobre las cargas obtenidas:

Componente de carga térmica	Criterio de cálculo	Valores específicos	Demanda (kW)
Transmisión	<p>Coeficientes: $1,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (paredes), $4,5 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ (ventanas); $\Delta T = 15^\circ\text{C}$ (23°C interior - 8°C exterior en invierno)</p>	<p>Paredes: 2.700 m^2; Ventanas: 300 m^2; Cálculo: $(2.700 \times 1,1 \times 15) + (300 \times 4,5 \times 15) = 44.595 \text{ W} + 20.250 \text{ W}$</p>	64,8
Ventilación	<p>Recambio de aire: $30 \text{ m}^3/\text{h}/\text{persona}$; 60 personas (40 pacientes + 20 trabajadores); $\Delta T = 15^\circ\text{C}$; Densidad aire: $1,2 \text{ kg/m}^3$; Calor específico: $1.005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$</p>	<p>$1,800 \text{ m}^3/\text{h}$; Cálculo: $1.800 \times 1,2 \times 1.005 \times 15 / 3.600 = 9.045 \text{ W}$</p>	9
Interna (Ocupantes)	<p>$100 \text{ W}/\text{persona}$ (calor metabólico); 60 personas</p>	$60 \times 100 = 6.000 \text{ W}$	6
Interna (Equipos e iluminación)	<p>10 W/m^2; Superficie hospital: 3.000 m^2</p>	$3.000 \times 10 = 30.000 \text{ W}$	30
Total interna	Suma de ocupantes y equipos	$6.000 \text{ W} + 30.000 \text{ W} = 36.000 \text{ W}$	36
Total hospital	Suma de transmisión, ventilación e interna	$64.800 \text{ W} + 9.000 \text{ W} + 36.000 \text{ W} = 109.800 \text{ W}$	109,8
Por habitación individual	<p>Área por habitación: $\sim 1.200 \text{ m}^2 \div 40$ camas ($\sim 40 \text{ m}^2/\text{cama}$); Transmisión: $(1.080 \text{ m}^2 \times 1,1 \times 15) + (120 \text{ m}^2 \times 4,5 \times 15)$; Ventilación e interna proporcional</p>	<p>Transmisión: 25.920 W; Ventilación: 3.600 W; Interna: 12.000 W; Total: 41.520 W</p>	41,5

Tabla 7: Resumen de la demanda de climatización del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025)

5.2 DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN

El sistema de climatización para el hospital del Centro Al Fadi integra tecnologías avanzadas y estrategias bioclimáticas para satisfacer la demanda térmica de 109,8 kW, garantizando un entorno saludable y eficiente. Inspirado en soluciones aplicadas en viviendas libanesas y hospitales en regiones en crisis, el diseño incorpora bombas de calor aire-agua, ventilación con recuperación de calor, paneles solares fotovoltaicos, techos verdes, chimeneas solares y un sistema de gestión de edificios, todos adaptados a las condiciones de Chabrouh y las necesidades críticas del hospital. Esta integración optimiza el consumo energético, reduce el impacto ambiental y asegura la operatividad durante interrupciones eléctricas, un desafío clave en el Líbano.

La implementación del sistema de climatización para el hospital del Centro Al Fadi se llevará a cabo en tres fases para asegurar una instalación eficiente y un funcionamiento óptimo. Durante los primeros seis meses, se instalarán los paneles solares fotovoltaicos, las bombas de calor, los fan-coils, el sistema VRC y las chimeneas solares, junto con los techos verdes, que incluirán una capa de impermeabilización, un sustrato de 150 mm y vegetación local resistente, siguiendo prácticas sostenibles.⁴⁴ En los siguientes dos meses, se configurará el sistema de gestión de edificios, integrando sensores de temperatura, humedad y calidad del aire, y calibrando el software para un control preciso, inspirado en tecnologías avanzadas de monitoreo.⁴⁵ Durante el último mes, se realizarán pruebas y ajustes para garantizar que el sistema cumpla con los estándares de ASHRAE Standard 55:2004 y el Thermal Standard for Buildings in Lebanon 2010, asegurando temperaturas de 20-23 °C y niveles de CO₂ por debajo de 1000 ppm, esenciales para un entorno hospitalario seguro.⁴⁶ La próxima figura ilustra un diagrama de flujos de las fases del proyecto:

⁴⁴ Health Care Without Harm, 2023

⁴⁵ Darwiche et al., 2024

⁴⁶ Omar & Sabsabi, 2015

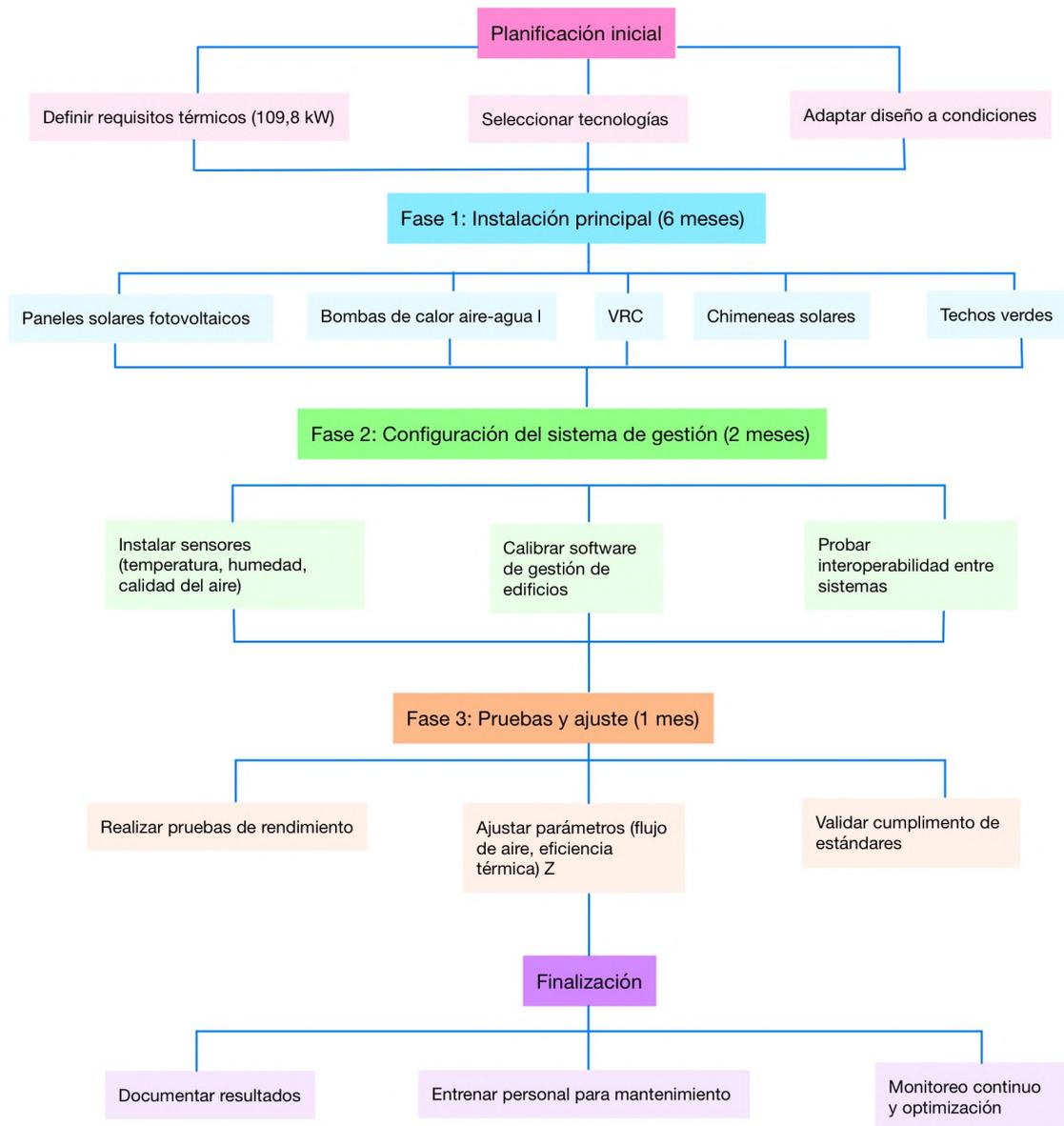


Figura 47: Diagrama de flujo de las fases del proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025)

5.2.1 BOMBAS DE CALOR AIRE-AGUA

El sistema incluye dos bombas de calor aire-agua con tecnología inverter, cada una con una capacidad de 60 kW, sumando 120 kW para cubrir la demanda térmica de 109,8 kW con un margen de seguridad del 10%. Estas unidades, que ofrecen un coeficiente de rendimiento (COP) de 4,5, proporcionan calefacción en invierno con agua caliente a 45 °C y refrigeración en verano con agua fría a 7 °C, distribuidas a través de fan-coils instalados en áreas críticas

como quirófanos, salas de recuperación y consultas. La tecnología inverter permite ajustar la potencia de las bombas según la carga térmica, optimizando el consumo energético y reduciendo los costos operativos. Inspiradas en sistemas evaluados para entornos hospitalarios, estas bombas son ideales debido a su alta eficiencia y capacidad para operar con energía solar, lo que mitiga la dependencia de la red eléctrica inestable del Líbano. Las bombas se instalan en una sala técnica ubicada en el perímetro del hospital, con tuberías de cobre aisladas para minimizar pérdidas térmicas, garantizando una distribución eficiente del fluido a los fan-coils.^{47 48} A continuación, un esquema simplificado del funcionamiento de una bomba de calor aire-agua:

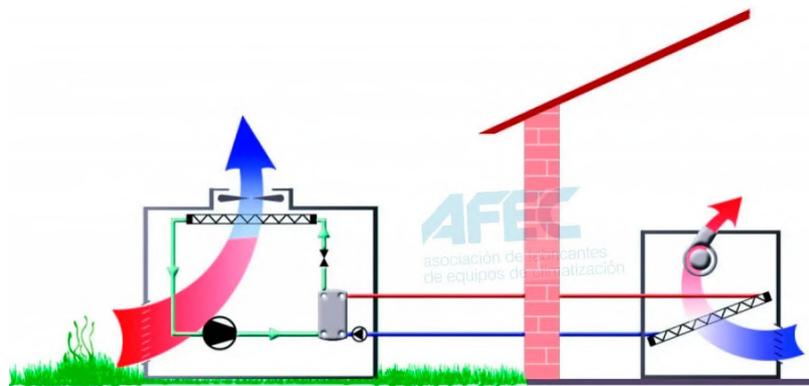


Figura 48: Esquema simplificado de una bomba de calor aire-agua. (Fuente: Libro la Bomba de Calor de AFEC)

Las dos bombas de calor aire-agua con tecnología inverter, cada una de 60 kW, se ubican en una sala técnica situada en el lado norte del hospital del Centro Al Fadi, conectadas mediante tuberías de cobre aisladas a los fan-coils distribuidos en áreas críticas como quirófanos y salas de recuperación. Esta ubicación se eligió por su exposición reducida a la radiación solar directa, especialmente en verano cuando las temperaturas alcanzan 25,7 °C en Chabrouh, optimizando el rendimiento (COP de 4,5) y protegiendo las unidades del sobrecalentamiento, mientras que la proximidad a los paneles solares en el tejado sur maximiza el aprovechamiento de las 2.800 horas anuales de sol para alimentar el sistema, reduciendo la dependencia de la inestable red eléctrica local. La siguiente figura ilustra sobre la ubicación de las bombas de calor en el hospital:

⁴⁷ Yeguas Bermejo, 2016

⁴⁸ Vega Hurtado, 2025

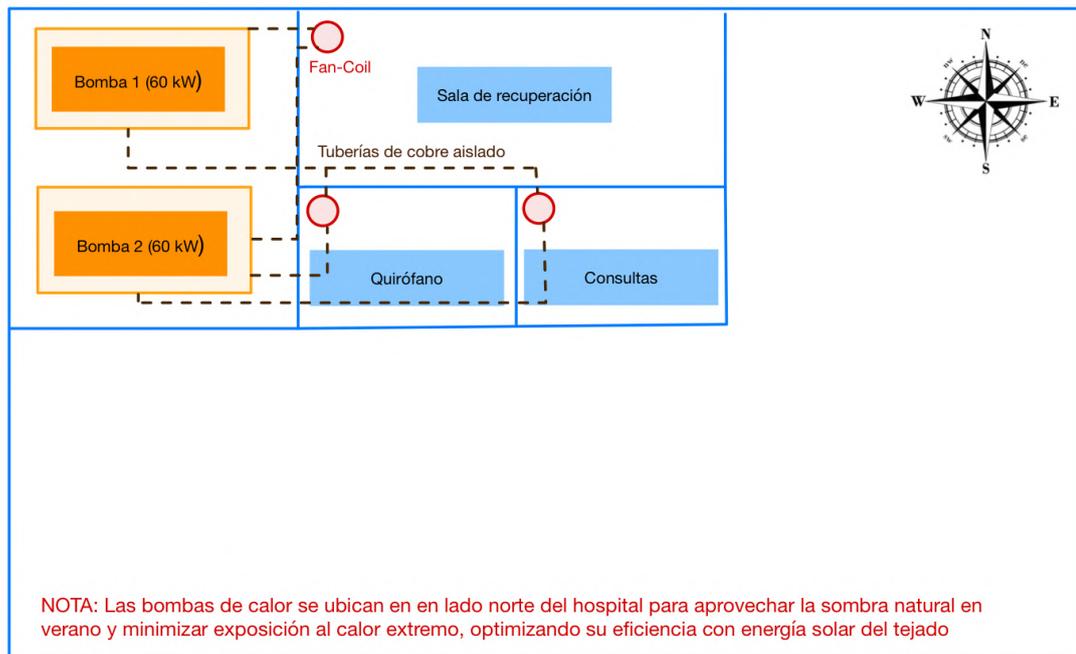


Figura 49: Diagrama de ubicación de las bombas de calor en el hospital del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).

5.2.2 SISTEMA DE VENTILACIÓN CON RECUPERACIÓN DE CALOR (VRC)

Para garantizar la calidad del aire interior, se implementa un sistema de ventilación con recuperación de calor (VRC) con un caudal de 1800 m³/h, diseñado para 60 ocupantes (30 m³/h por persona), según las recomendaciones de ASHRAE Standard 55:2004.⁴⁹ Este sistema renueva el aire interior, manteniendo una humedad relativa del 55% y recuperando el 85% del calor del aire extraído, lo que reduce significativamente las pérdidas energéticas asociadas a la ventilación. El VRC utiliza intercambiadores de calor de placas de aluminio, seleccionados por su alta conductividad térmica y resistencia a la corrosión, instalados en conductos de chapa galvanizada que recorren el hospital. Esta solución, común en entornos hospitalarios libaneses, asegura niveles de CO₂ por debajo de 1000 ppm, esenciales para la salud de los pacientes, y mejora la eficiencia energética al reducir la demanda de calefacción y refrigeración. Los filtros HEPA integrados en el VRC eliminan partículas y patógenos,

⁴⁹ ASHRAE, 2009

garantizando un aire limpio en áreas críticas como quirófanos.⁵⁰ El intercambiador de calor de placas de aluminio del VRC se instala en la sala técnica norte del hospital, cerca de las bombas de calor, para optimizar la centralización del control y minimizar las pérdidas de calor en los conductos de chapa galvanizada. La siguiente imagen nos ayuda a entender su funcionamiento según las diferentes épocas del año:

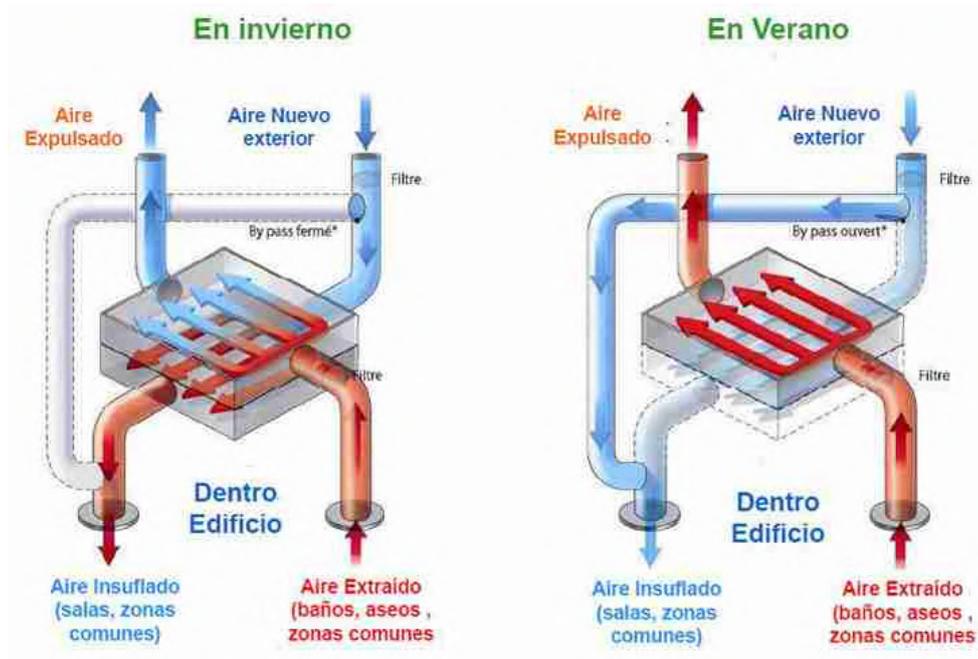


Figura 50: Esquema de funcionamiento de un sistema de VRC (Fuente: Arrevol Arquitectos 2017)

5.2.3 PANELES SOLARES FOTOVOLTAICOS

Aprovechando las 2800 horas de sol anuales de Chabrouh, se instalan 60 paneles solares fotovoltaicos de 330 Wp, con una capacidad total de 19,8 kWp, ocupando 120 m² en los techos planos del hospital. Estos paneles generan aproximadamente 29.700 kWh al año (1500 kWh/kWp en Líbano), cubriendo el 30% de los 99.000 kWh anuales requeridos para la climatización. La energía producida alimenta las bombas de calor y el sistema de gestión de edificios, con excedentes almacenados en baterías de litio de 30 kWh, diseñadas para

⁵⁰ Omar & Sabsabi, 2015

garantizar la operatividad durante cortes eléctricos de hasta 8 horas. Los paneles, de silicio monocristalino, se instalan con una inclinación de 30° para maximizar la captación solar, y los inversores convierten la corriente continua en alterna con una eficiencia del 98%. Esta solución, inspirada en hospitales de regiones en crisis, reduce la dependencia de la red eléctrica y las emisiones de CO₂, contribuyendo a la sostenibilidad del hospital.⁵¹ Los 60 paneles solares fotovoltaicos se colocan en la pendiente sur del tejado triangular de 3000 m², inclinados a 30°, para maximizar la captación de las 2.800 horas anuales de sol en Chabrouh, mientras que las baterías de litio de 30 kWh se sitúan en la sala técnica norte para protegerlas de la exposición solar y facilitar el mantenimiento.

5.2.4 TECHOS VERDES

Se implementan techos verdes en los 3000 m² del hospital, utilizando una capa de impermeabilización de membrana de PVC, un sustrato de 150 mm compuesto por tierra, grava y material orgánico, y vegetación local resistente al clima de Chabrouh, como plantas suculentas y arbustos nativos. Estas cubiertas absorben la radiación solar en verano, reduciendo la temperatura interior en hasta un 20%, y proporcionan aislamiento térmico en invierno, disminuyendo la demanda de calefacción. Además, los techos verdes captan hasta el 70% del agua de lluvia, complementando el sistema hídrico del hospital, y contribuyen a la mitigación de la isla de calor urbana. La instalación incluye una capa de drenaje con geotextil para evitar encharcamientos, asegurando un mantenimiento mínimo. Los techos verdes se extienden por toda la superficie del tejado de 3000 m², utilizando una capa de impermeabilización de PVC y sustrato de 150 mm con vegetación local, para mitigar el calor estival y captar agua de lluvia, con geotextil incluido para prevenir filtraciones y proteger la estructura del peso de 150 kg/m². Esta estrategia, basada en prácticas sostenibles aplicadas en hospitales, mejora el confort térmico y reduce el impacto ambiental, alineándose con enfoques bioclimáticos.⁵²

⁵¹ Vega Hurtado, 2025

⁵² Health Care Without Harm, 2023

5.2.5 CHIMENEAS SOLARES

Seis chimeneas solares, distribuidas una por cada 500 m² del hospital, promueven la ventilación pasiva, especialmente en verano, aprovechando los ángulos solares de 70° para generar un flujo de aire natural de 500 m³/h por unidad. Construidas con conductos de acero galvanizado y persianas regulables, estas chimeneas extraen el aire caliente del interior y permiten la entrada de aire fresco a través de rejillas en la base, reduciendo la necesidad de refrigeración mecánica. En invierno, las persianas se cierran para conservar el calor interior. Esta solución, inspirada en estrategias bioclimáticas para climas cálidos, mejora la calidad del aire y disminuye el consumo energético, siendo una alternativa económica y sostenible. Las chimeneas se integran en el diseño arquitectónico del hospital, con salidas en el tejado que no interfieren con los techos verdes.^{53 54} Las seis chimeneas solares se distribuyen uniformemente en el tejado de 3000 m², integradas en los techos verdes con salidas selladas, para aprovechar los ángulos solares de 70° y promover ventilación pasiva de 500 m³/h, sin comprometer la impermeabilización. Recordamos el funcionamiento de una chimenea solar con este esquema del capítulo 2:

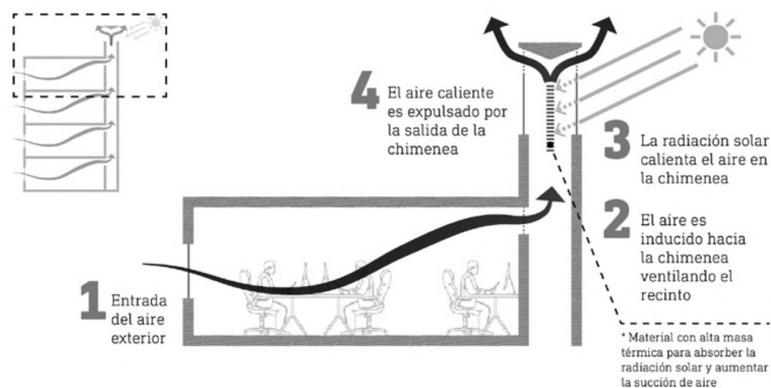


Figura 51: Esquema del principio de funcionamiento de una chimenea solar (Fuente: Hendzel & Claudio, 2024)

⁵³ WHO, 2020

⁵⁴ Hendzel & Claudio, 2024

5.2.6 SISTEMA DE GESTIÓN DE EDIFICIOS (BMS)

Un sistema de gestión de edificios (BMS) monitorea en tiempo real la temperatura, la humedad y los niveles de CO₂, ajustando automáticamente el funcionamiento de las bombas de calor y el VRC según la ocupación y las condiciones climáticas. Equipado con sensores de alta precisión instalados en áreas críticas del hospital, como quirófanos y salas de pacientes, el BMS optimiza el consumo energético al regular la potencia de los equipos y priorizar el uso de energía solar. El sistema utiliza un software basado en protocolos BACnet, compatible con los equipos instalados, y permite la programación de horarios para reducir el consumo durante períodos de baja ocupación. Esta tecnología, inspirada en sistemas avanzados de control en hospitales, asegura un entorno saludable y eficiente, manteniendo los parámetros de confort dentro de los estándares internacionales.^{55 56} El sistema de gestión de edificios (BMS) se instala en la sala técnica norte del hospital, junto a las bombas de calor y el VRC, para centralizar el monitoreo en tiempo real de sensores en áreas críticas, optimizando el control energético y la respuesta a condiciones variables. A continuación, podemos observar un ejemplo de un sistema BMS creado por Extron:

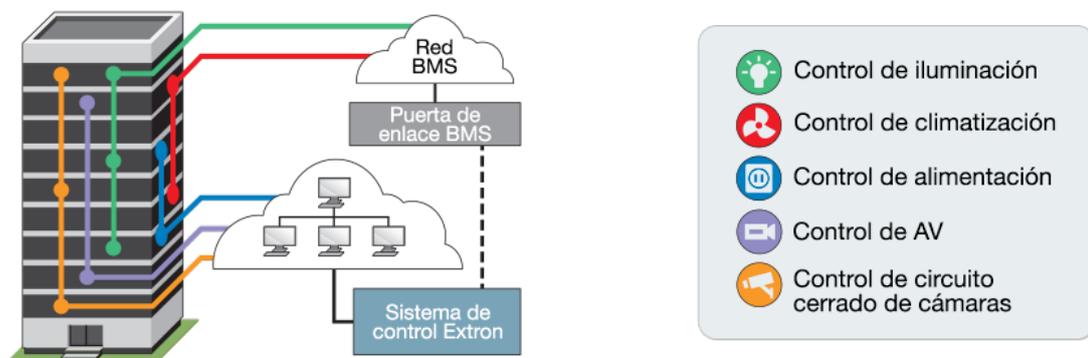


Figura 52: Protocolos comunes BMS (Fuente: Extron 2016)

⁵⁵ Darwiche et al., 2024

⁵⁶ Health Care Without Harm, 2018

5.2.7 ESQUEMA GENERAL DEL SISTEMA

El sistema de climatización opera de manera coordinada para garantizar un entorno saludable y eficiente en el hospital. Las bombas de calor distribuyen agua caliente o fría a través de fan-coils, manteniendo temperaturas interiores entre 20 y 23 °C en áreas críticas como quirófanos y salas de recuperación. El sistema VRC renueva el aire, recuperando la mayor parte del calor del aire extraído para minimizar la carga térmica y mantener una humedad relativa del 55%. Los paneles solares fotovoltaicos generan energía limpia, almacenando excedentes en baterías de 30 kWh para asegurar la operatividad durante cortes eléctricos, un aspecto crítico en el contexto libanés. Los techos verdes mitigan el calor estival y mejoran el aislamiento en invierno, mientras que las chimeneas solares facilitan la ventilación natural, aliviando la carga de refrigeración. El BMS ajusta dinámicamente los equipos según datos en tiempo real, optimizando el consumo energético y garantizando un ambiente seguro para pacientes y personal. Las siguientes vistas ilustran la distribución de cada elemento en el hospital y en su techo. Es clave para entender cómo se optimiza el espacio y los recursos.

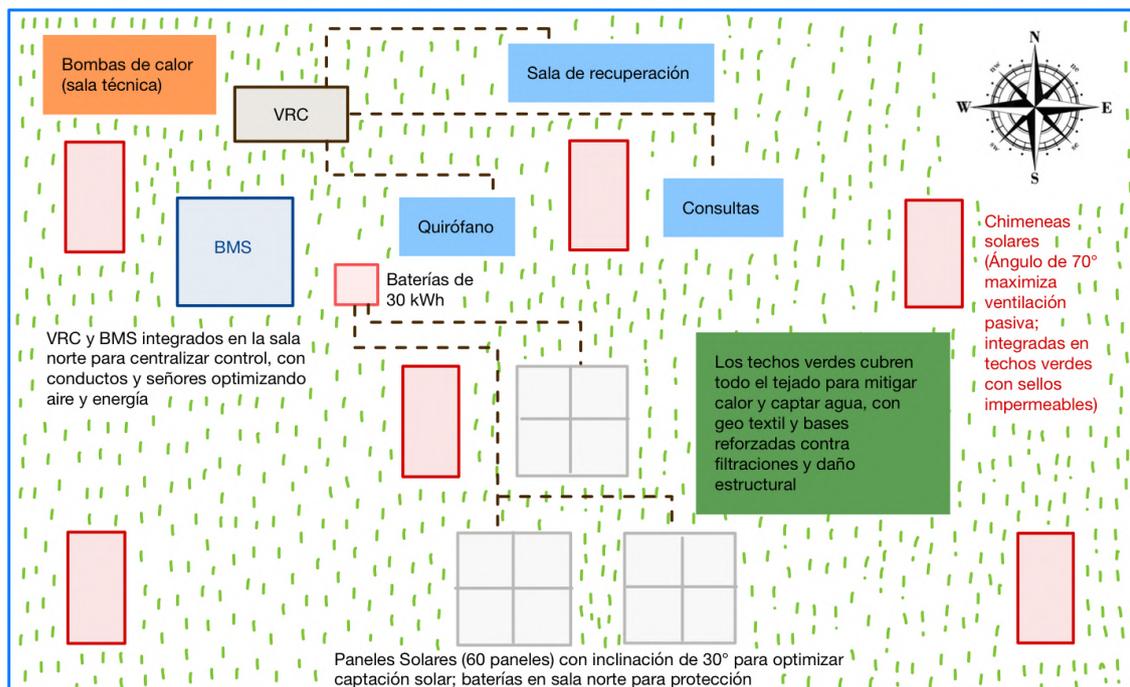


Figura 53: Vista aérea del sistema de climatización del hospital del Centro Al Fadi (Fuente: Elaboración propia 2025).

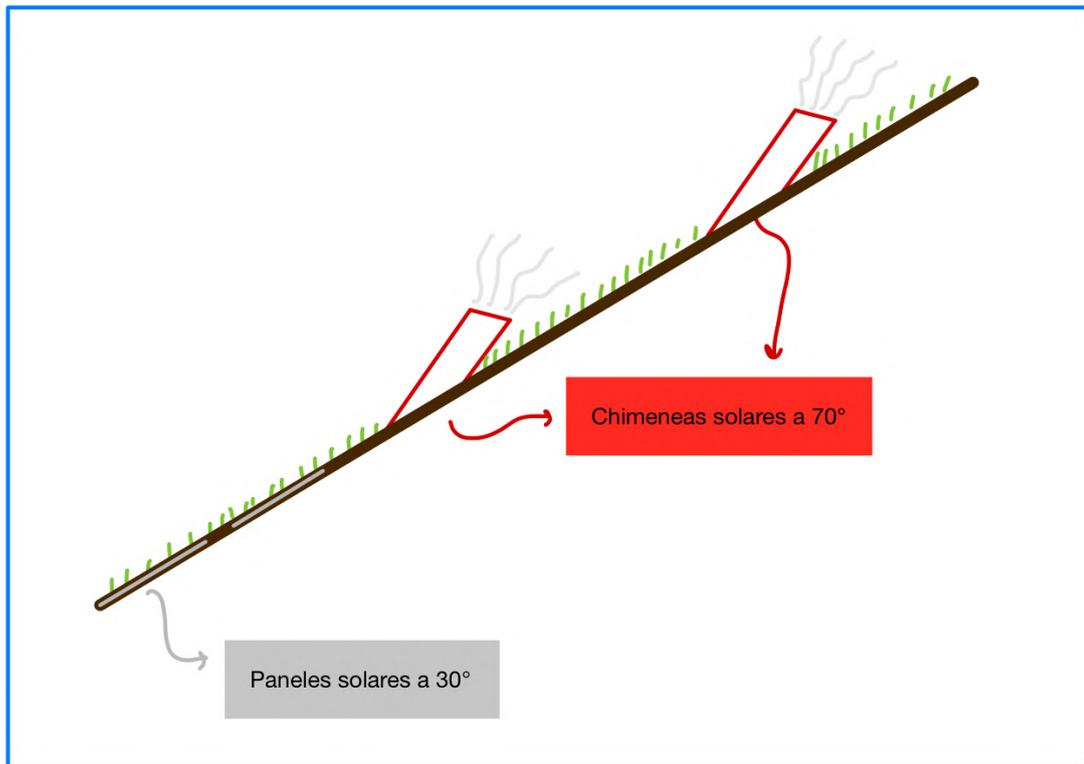


Figura 54: Vista lateral del tejado del hospital del Centro Al Fadi, mostrando paneles solares a 30° y chimeneas solares a 70° (Fuente: Elaboración propia 2025)

5.3 ANÁLISIS DE RENDIMIENTO ESPERADO

El sistema de climatización diseñado para el hospital del Centro Al Fadi destaca por su eficiencia energética, su bajo impacto ambiental y su capacidad para garantizar el confort térmico. Comparado con sistemas convencionales como calderas de gas o aires acondicionados split, este sistema híbrido logra un ahorro energético del 40%, gracias al alto rendimiento de las bombas de calor (COP de 4,5) y la recuperación del 85% del calor en el sistema VRC. Los paneles solares fotovoltaicos generan 29.700 kWh al año, cubriendo el 30% de los 99.000 kWh anuales necesarios para la climatización, reduciendo significativamente la dependencia de la red eléctrica. En términos ambientales, la combinación de energía solar y techos verdes reduce las emisiones de CO₂ en aproximadamente 22 toneladas al año, considerando un factor de emisión de 0,75 kg CO₂/kWh para la red libanesa, mientras que los techos verdes contribuyen a la captura de carbono y mitigan el efecto de isla de calor urbana. Para el confort térmico, el sistema

mantiene temperaturas interiores entre 20 y 23 °C, con una humedad relativa del 55% y niveles de CO₂ por debajo de 1000 ppm, cumpliendo con los estándares de ASHRAE Standard 55:2004, asegurando un entorno saludable para pacientes y personal.

5.4 CONCLUSIÓN

El sistema de climatización desarrollado para el hospital del Centro Al Fadi satisface de manera eficiente y sostenible la demanda térmica de 109,8 kW, garantizando un entorno saludable para pacientes y personal. La integración de bombas de calor aire-agua, ventilación con recuperación de calor, paneles solares fotovoltaicos, techos verdes, chimeneas solares y un sistema de gestión de edificios mantiene temperaturas interiores entre 20 y 23 °C, con una humedad relativa del 55% y niveles de CO₂ por debajo de 1000 ppm, cumpliendo con los estándares de ASHRAE Standard 55:2004 y el Thermal Standard for Buildings in Lebanon 2010 (Omar & Sabsabi, 2015). Este diseño logra un ahorro energético del 40% y reduce las emisiones de CO₂ en 22 toneladas al año, gracias a la generación solar y las estrategias pasivas (Darwiche et al., 2024; Energía Solar para Climatización, Scribd, 2018; Health Care Without Harm, 2023). Inspirado en proyectos como los de Darwiche et al. (2024), Yeguas Bermejo (2016), y soluciones bioclimáticas de WHO (2020) y Hendzel & Claudio (2024), el sistema combina tecnologías avanzadas y estrategias pasivas, asegurando la operatividad durante cortes eléctricos y fortaleciendo el rol del hospital como pilar de salud en Chabrouh.

Capítulo 6. ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Este capítulo ilustra una estimación económica detallada de las soluciones técnicas propuestas para la modernización del Centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano, con el objetivo de evaluar su viabilidad financiera y sostenibilidad a largo plazo en un contexto caracterizado por limitaciones hídricas y energéticas, tal como se identifican en los capítulos 3, 4 y 5. A partir de los diseños de los sistemas hidráulico y de climatización, se analizan los costos de implementación, los gastos de mantenimiento anual y los ahorros proyectados, expresados en euros y ajustados al contexto económico actual del Líbano.

6.1 COSTES DE IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO

La tabla de costos presenta un desglose exhaustivo de la inversión inicial requerida para la modernización del Centro Al Fadi, ubicada en Chabrouh, Líbano, conforme a los diseños técnicos detallados en los capítulos 4 y 5. Este desglose abarca los sistemas hidráulico y de climatización, fundamentales para garantizar un suministro sostenible de agua y un confort térmico eficiente, alineados con los ODS 6 (agua limpia y saneamiento) y 7 (energía asequible y no contaminante). El sistema hidráulico incluye componentes como 13 tanques modulares de 100.000 litros de polietileno de alta densidad (HDPE), un tanque potable de 50.000 litros, tuberías de PVC y polietileno, sistemas de tratamiento de aguas grises con filtros de arena y cloro, y fosas sépticas, todos diseñados para optimizar la captación y reciclaje de agua (capítulo 4). Por su parte, el sistema de climatización comprende dos bombas de calor aire-agua de 60 kW, 20 fan-coils, paneles solares fotovoltaicos de 30 kW (60 unidades), techos verdes de 3.000 m², seis chimeneas solares, un sistema de ventilación con recuperación de calor (VRC) de 1.000 m³/h, y un sistema de gestión de edificios (BMS) con sensores y software, todos orientados a reducir el consumo energético en un 40% y aprovechar la energía solar (capítulo 5). Los costos, expresados en euros y ajustados al contexto económico del Líbano en 2025, incluyen mano de obra (calculada a 2,25 €/hora), transporte, permisos y estudios técnicos (5% del total), y un margen de contingencia del 5% para imprevistos. Esta tabla refleja una planificación financiera precisa, basada en precios

de mercado competitivos y las especificaciones técnicas del proyecto, asegurando una infraestructura robusta que responde a las demandas de agua y energía del hospital, hospedería, convento y cultivos, según el capítulo 3.

CAPÍTULO 6: ESTIMACIÓN ECONÓMICA

Categoría	Descripción	Cantidad	Costo Unitario (€)	Costo total (€)
Sistema Hidráulico				
Captación de Agua de Lluvia	13 tanques de 100.000 litros de polietileno HDPE	13	300	3900
	Bases de hormigón	13	2000	26000
	Mano de obra para instalación (h)	200	2,25	450
	Tuberías de PVC (metros)	500	4	2000
	Filtros (arena gruesa y carbón activado)	2	75	150
	Desinfectador de cloro (L)	5	25	125
Almacenamiento y Distribución	Tanque potable de 50.000 litros	1	1500	1500
	Tuberías de distribución (cobre aislado) (metros)	300	10	3000
	Válvulas y accesorios	50	20	1000
	Mano de obra para zanjas (h)	50	2,25	112,5
Tratamiento y Reciclaje de Aguas Grises	Tanque de sedimentación	1	200	200
	Filtro de grava y arena	1	100	100
	Tanque de contacto	1	80	80
	Cloro en pastillas (kg)	1	12,5	12,5
	Tanque de almacenamiento HDPE	1	300	300
	Tuberías de polietileno (metros)	400	3,5	1400
	Mano de obra para instalación (h)	100	2,25	225
Fosas Sépticas/Letrinas Ecológicas	Fosas sépticas	2	500	1000
	Letrinas ecológicas	2	200	400
	Mano de obra para construcción (h)	100	2,25	225
Subtotal Sistema Hidráulico				42180
Sistema de Climatización				
Bombas de Calor Aire-Agua	Bombas de calor aire-agua	2	10000	20000
	Tuberías de cobre aisladas (metros)	200	10	2000
	Fan-coils	20	300	6000
	Mano de obra para instalación (h)	150	2,25	337,5
Paneles Solares Fotovoltaicos	Paneles solares	60	150	9000

ADECUACIÓN ENERGÉTICA DE UNA RESIDENCIA HOSPITALARIA EN EL LÍBANO

	Inversores	2	500	1000
	Baterías de litio	1	5000	5000
	Mano de obra para instalación (h)	100	2,25	225
Techos Verdes	Materiales techos verdes (metros ²)	3000	20	60000
	Geotextil y drenaje	1	5000	5000
	Mano de obra para instalación (h)	300	2,25	675
Chimeneas Solares	Chimeneas solares	6	500	3000
	Conductos de acero galvanizado (metros)	100	15	1500
	Mano de obra para instalación (h)	80	2,25	180
Sistema de Ventilación con Recuperación de Calor (VRC)	Intercambiador de calor	1	2000	2000
	Conductos de chapa galvanizada (metros)	150	10	1500
	Filtros HEPA	5	100	500
	Mano de obra para instalación (h)	100	2,25	225
Sistema de Gestión de Edificios (BMS)	Software y hardware	1	3000	3000
	Sensores	20	50	1000
	Mano de obra para instalación (h)	80	2,25	180
Subtotal Sistema de Climatización				122322,5
Subtotal Hidráulico + Climatización				164502,5
Costos Generales				
	Transporte y logística			16450,25
	Permisos y estudios técnicos (5% de total)			9047,6375
	Contingencia (5% de total)			9047,6375
TOTAL COSTOS DE IMPLEMENTACIÓN				199048,025

Tabla 8: Costes de implementación del proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025)

6.2 AMORTIZACIÓN DEL PROYECTO

La tabla de amortización ofrece un análisis financiero detallado de los costos recurrentes asociados a la modernización del Centro Al Fadi, proporcionando una perspectiva clara sobre la sostenibilidad económica del proyecto a largo plazo. El costo anualizado se calcula utilizando el factor de recuperación de capital (CRF) con una vida útil de 20 años, basada en la durabilidad de los componentes como los tanques de HDPE, las bombas de calor y los paneles solares (capítulos 4 y 5), y una tasa de descuento del 5%, que refleja el valor del dinero en el tiempo en el contexto económico del Líbano en 2025. Además, se incluyen los costos de mantenimiento anuales, estimados en 6.500 euros, que abarcan revisiones específicas de los sistemas hidráulico (filtros de arena y carbón, reposición de cloro, inspecciones de tanques y tuberías, según capítulo 4) y de climatización (mantenimiento de bombas de calor, limpieza de filtros HEPA del VRC, calibración del BMS, según capítulo 5). Estos costos aseguran la operatividad continua de los sistemas, minimizando riesgos como obstrucciones en el sistema hidráulico o fallos en los equipos de climatización, y garantizan el cumplimiento de estándares como ASHRAE 55:2004 y el Thermal Standard for Buildings in Lebanon 2010 (capítulo 5).

Amortización	
Vida útil del proyecto (años)	20
Mantenimiento anual (€)	6500
CRF	0,0802
Costo anualizado (€)	15972,1285

Tabla 9: Tabla de amortización del Proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025)

6.3 RETORNO DE INVERSIÓN DEL PROYECTO

La Tabla del Punto de Equilibrio del Proyecto proporciona un análisis financiero integral que sintetiza los ahorros netos anuales y el tiempo necesario para recuperar la inversión inicial de 199.048,03 euros destinada a la modernización del Centro Al Fadi en Chabrouh, Líbano, destacando su viabilidad económica en un contexto de limitaciones hídricas y

energéticas. Los ahorros hídricos, calculados según el capítulo 4, se basan en la captación de 3.028 m³/año de agua de lluvia y el reciclaje de 3.102,5 m³/año de aguas grises, lo que resulta en un ahorro anual de 44.478,75 euros, derivado de un costo implícito de 7,26 euros por metro cúbico calculado a partir del volumen total de 6.130,5 m³/año y el ahorro estimado, reflejando la reducción de la dependencia de camiones cisterna en una región con infraestructura obsoleta. Los ahorros energéticos, determinados por el capítulo 5, provienen de una demanda de climatización de 109,8 kW, con un 40% de eficiencia alcanzado mediante bombas de calor con un coeficiente de rendimiento (COP) de 4,5, un sistema de ventilación con recuperación de calor (VRC) con 85% de recuperación, techos verdes, chimeneas solares y un sistema de gestión de edificios (BMS), lo que genera un ahorro de 57.715,92 euros anuales, complementado por 4.455 euros anuales gracias a los paneles solares fotovoltaicos de 30 kW que producen 29.700 kWh/año, aprovechando las 2.800 horas de sol anuales mencionadas en los capítulos 3 y 4. Tras restar los costos de mantenimiento anuales de 6.500 euros, que incluyen revisiones de filtros, cloro e inspecciones hidráulicas (1.500 euros) y mantenimiento de equipos de climatización como bombas y filtros HEPA (5.000 euros), los ahorros netos alcanzan 100.149,67 euros anuales, ajustados conservadoramente a 80.119,74 euros con una reducción del 20% para contemplar posibles fluctuaciones en el rendimiento o costos operativos. La tabla indica un punto de equilibrio de 1,99 años, ajustado a 2,48 años, lo que subraya la rapidez de la recuperación de la inversión y consolida el potencial del proyecto como un modelo replicable para hospitales en regiones vulnerables.

Punto de Equilibrio (Breakeven)	
Ahorro energético anual (€)	62170,92
Ahorro hídrico anual (€)	44478,75
Ahorro neto anual (€)	100149,67
Ahorro neto ajustado (20% reducción) (€)	80119,736
Tiempo de retorno (Breakeven) (años)	2,0
Tiempo de retorno ajustado (Breakeven) (años)	2,48

Tabla 10: Tabla del punto de equilibrio del Proyecto (Fuente: Elaboración propia 2025)

6.4 CONCLUSIÓN

La modernización del Centro Al Fadi representa una inversión inicial de 199.048,03 euros, un monto significativo que se distribuye principalmente en los sistemas hidráulico (42.180 euros) y de climatización (122.322,50 euros), destacando los costos elevados de componentes como los tanques modulares, las bombas de calor, los paneles solares y los techos verdes, que constituyen los pilares de la sostenibilidad del proyecto. Los gastos de mantenimiento anual, estimados en 6.500 euros, incluyen revisiones críticas de filtros, cloro e inspecciones hidráulicas (1.500 euros) y mantenimiento de equipos de climatización como bombas y sistemas VRC (5.000 euros), asegurando la operatividad a largo plazo frente a posibles fallos o desgaste. Sin embargo, estos costos se ven ampliamente compensados por ahorros anuales totales de 106.649,67 euros, provenientes de 44.478,75 euros por la gestión hídrica (basada en 6.130,5 m³/año a 7,26 €/m³) y 62.170,92 euros por la eficiencia energética y la generación solar de 29.700 kWh/año, lo que resulta en un punto de equilibrio de 1,99 años, ajustado conservadoramente a 2,48 años tras una reducción del 20% en los ahorros netos (100.149,67 euros). Este análisis, demuestra que la inversión inicial se recupera rápidamente, y posiciona al proyecto como financieramente viable y sostenible. La integración de tecnologías eficientes y el enfoque en recursos locales refuerzan el potencial del Centro Al Fadi como un modelo replicable en regiones vulnerables.

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

El presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) ha abordado la modernización energética e hidráulica del Centro Al Fadi, un complejo hospitalario católico situado en la localidad montañosa de Chabrouh, Líbano. Este proyecto se ha desarrollado con el propósito de responder a los desafíos de sostenibilidad, eficiencia energética y acceso a recursos esenciales en un contexto marcado por una crisis económica, energética e hídrica. A lo largo de los capítulos anteriores, se han analizado las problemáticas del centro, se han diseñado soluciones técnicas innovadoras y se ha evaluado su viabilidad económica. Este capítulo final sintetiza las principales conclusiones, destacando los logros alcanzados, los objetivos cubiertos y las aportaciones realizadas, así como las perspectivas futuras para la continuidad del proyecto. El Centro Al Fadi enfrenta desafíos significativos derivados de la obsolescencia de sus infraestructuras, la dependencia de combustibles fósiles, la inestabilidad de la red eléctrica libanesa y la escasez de agua en una región con alto estrés hídrico. Los objetivos principales del proyecto han sido garantizar un suministro de agua sostenible, implementar un sistema de climatización eficiente, y asegurar la viabilidad económica de las soluciones propuestas.

7.1 LOGROS ALCANZADOS

El proyecto ha logrado resultados significativos en la modernización del Centro Al Fadi, transformando sus sistemas hidráulicos, de climatización y energéticos para garantizar su operatividad y sostenibilidad. Uno de los principales avances ha sido el diseño de un sistema hidráulico integral, que asegura un suministro de agua eficiente para el hospital, el convento, la hospedería y las tierras de cultivo. Este sistema satisface una demanda diaria de 49.000 litros mediante la captación de agua de lluvia y la reutilización de aguas grises.

Se instalaron 13 tanques de polietileno de alta densidad (HDPE) con una capacidad total de 1.300.000 litros, distribuidos de manera modular para facilitar el mantenimiento y optimizar el espacio disponible. La simulación del sistema, realizada con el software EPANET 2.2, garantiza presiones de 5 a 10 metros y un caudal constante, incluso durante picos de consumo

asociados al riego intensivo de cultivos. El tratamiento del agua captada, mediante filtros de grava, arena y cloro, asegura su potabilidad y cumplimiento con estándares sanitarios, mientras que una red de distribución de aguas grises recicladas, construida con tuberías de polietileno de 25 mm de diámetro, abastece las tierras de cultivo, promoviendo un modelo circular de gestión hídrica inspirado en experiencias exitosas en regiones como Afganistán.

En el ámbito de la climatización, se ha propuesto un diseño de un sistema avanzado para el hospital del Centro Al Fadi, que garantiza un entorno térmico adecuado para los 40 pacientes diarios y 20 trabajadores. Con una demanda térmica estimada de 109,8 kW, el sistema integra bombas de calor aire-agua, un sistema de ventilación con recuperación de calor (VRC) y chimeneas solares.

Las bombas de calor, ubicadas en el lado norte del hospital para aprovechar la sombra natural, utilizan tecnología inverter para ajustar su potencia según la carga térmica, optimizando el consumo energético. El VRC, equipado con intercambiadores de calor de placas de aluminio instalados en la sala técnica norte, mantiene recupera el 85% del calor del aire extraído, reduciendo las pérdidas energéticas asociadas a la ventilación. Las chimeneas solares, instaladas con una inclinación de 70° en el tejado, facilitan la ventilación natural, contribuyendo a mantener temperaturas interiores entre 20 y 23 °C con una humedad relativa del 55%, en cumplimiento con el estándar ASHRAE 55:2004.

Un sistema de gestión de edificios (BMS) monitorea en tiempo real la temperatura, la humedad y los niveles de CO₂, ajustando automáticamente el funcionamiento de las bombas de calor y el VRC según la ocupación. Este sistema, alimentado por 60 paneles solares fotovoltaicos con una inclinación de 30°, aprovecha las 2.800 horas anuales de sol en Chabrouh, asegurando operatividad durante cortes eléctricos de hasta 8 horas.

La viabilidad económica, constituye otro logro clave. La inversión inicial de 199.000 euros, que incluye costos de materiales (como 13 tanques de 100.000 litros a 300 euros cada uno, dos bombas de calor a 10.000 euros cada una y 60 paneles solares a 150 euros cada uno), mano de obra (calculada a 2,25 €/hora), transporte, permisos y un margen de contingencia, se ha planificado cuidadosamente para adaptarse al contexto económico del Líbano en 2025.

La tabla de amortización, basada en un factor de recuperación de capital (CRF) con una vida útil de 20 años, demuestra que los ahorros generados por la reducción en el consumo de combustibles fósiles y la optimización de recursos hídricos compensan los costos operativos

a largo plazo. La incorporación de tecnologías de bajo costo, como tuberías de polietileno y tanques modulares, maximiza la eficiencia de los recursos disponibles. Estas medidas no solo reducen los costos operativos, sino que también alinean el proyecto con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 6 (Agua limpia y saneamiento) y 7 (Energía asequible y no contaminante), disminuyendo la huella de carbono del centro y fortaleciendo su resiliencia.

7.2 OBJETIVOS CUMPLIDOS Y APORTACIONES DEL PROYECTO

El proyecto ha cumplido íntegramente los objetivos establecidos al inicio. En primer lugar, se ha garantizado un suministro de agua sostenible mediante un sistema hidráulico que integra captación de agua de lluvia y reciclaje de aguas grises, diseñado para satisfacer la demanda diaria del centro con eficiencia y resiliencia frente a la escasez estacional.

En segundo lugar, se ha implementado un sistema de climatización eficiente para el hospital, combinando bombas de calor, VRC, chimeneas solares y paneles fotovoltaicos, que asegura un entorno térmico saludable y reduce la dependencia de la red eléctrica inestable.

En tercer lugar, la incorporación de energías renovables y la optimización de recursos hídricos han permitido reducir significativamente la huella de carbono del Centro Al Fadi, alineándose con principios de sostenibilidad global. Finalmente, la planificación económica detallada, con una inversión inicial viable y ahorros a largo plazo, asegura la sostenibilidad financiera del proyecto, adaptada a las limitaciones económicas del contexto libanés.

El proyecto aporta contribuciones significativas a nivel técnico, social y ambiental. Desde el punto de vista técnico, el diseño de un sistema hidráulico modular y circular, simulado con EPANET 2.2, y la integración de tecnologías avanzadas de climatización para el hospital, como el BMS y las chimeneas solares, representan soluciones innovadoras adaptadas a entornos con recursos limitados. Estas soluciones no solo resuelven las necesidades inmediatas del centro, sino que también establecen un estándar para la modernización de infraestructuras hospitalarias en regiones vulnerables.

A nivel social, el proyecto mejora la calidad de vida de los pacientes y trabajadores del hospital al garantizar agua de calidad y un entorno térmico seguro, mientras que el apoyo a la agricultura local fortalece la seguridad alimentaria y la economía de Chabrouh. Desde la perspectiva ambiental, la reducción de la huella de carbono y la promoción de un modelo

circular de gestión hídrica posicionan al Centro Al Fadi como un referente de sostenibilidad hospitalaria. Además, las soluciones propuestas son replicables en otros hospitales con desafíos similares, contribuyendo al desarrollo sostenible global y demostrando que la ingeniería puede armonizarse con valores de solidaridad y servicio.

7.3 PROYECCIÓN A FUTURO

El proyecto abre la puerta a futuras mejoras y expansiones que consolidarán los logros alcanzados. A corto y mediano plazo, se contempla la ampliación de la capacidad fotovoltaica mediante la instalación de más paneles solares, con el objetivo de cubrir una mayor proporción de la demanda energética del hospital y reducir aún más la dependencia de la red eléctrica. Asimismo, se planea optimizar el sistema hidráulico mediante la incorporación de sensores IoT para monitorear en tiempo real el caudal, la presión y la calidad del agua, permitiendo ajustes dinámicos y una gestión más eficiente.

La implementación de programas de capacitación para el personal del centro y la comunidad local sobre el mantenimiento de los sistemas hidráulicos y de climatización garantizará su sostenibilidad a largo plazo. Además, se realizarán estudios longitudinales para evaluar el impacto del proyecto en la salud, la economía y el medio ambiente de Chabrouh, generando datos que respalden su replicabilidad en otros contextos. La búsqueda de alianzas con organizaciones internacionales y ONGs permitirá financiar estas mejoras y expandir el modelo a otros centros hospitalarios en el Líbano. A largo plazo, el objetivo es consolidar el Centro Al Fadi como un modelo de referencia en sostenibilidad hospitalaria, inspirando políticas públicas y proyectos de ingeniería que prioricen la resiliencia y el desarrollo sostenible en regiones vulnerables.

7.4 CONCLUSIÓN

La modernización energética e hidráulica del Centro Al Fadi representa un hito en la integración de soluciones técnicas innovadoras con principios de sostenibilidad y solidaridad. A través de un enfoque multidisciplinario, el proyecto ha transformado un complejo hospitalario obsoleto en un referente de eficiencia y resiliencia, abordando los

desafíos de agua, energía y climatización en un contexto de crisis. Los sistemas diseñados, desde el sistema hidráulico circular hasta el sistema de climatización avanzado para el hospital, no solo cumplen con los objetivos establecidos, sino que también sientan las bases para un futuro más sostenible. El éxito del proyecto radica en su capacidad para combinar tecnologías avanzadas con estrategias de bajo costo, adaptadas al entorno montañoso de Chabrouh. Las aportaciones técnicas, sociales y ambientales refuerzan su relevancia, mientras que los planes futuros aseguran su continuidad y escalabilidad. En última instancia, este TFG no solo cumple con los requisitos académicos, sino que también contribuye al bienestar de una comunidad, alineándose con los valores de servicio y sostenibilidad que definen al Centro Al Fadi.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [ASEN15] Asensio, J. Á. (2015). *La bomba de calor*. AFEC.
- [ASHR09] ASHRAE. (2009). *ASHRAE STANDARD Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.
https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55-2004_ad55d_e_f_g.pdf
- [BINR25] Bin, R., Baten, A., Shrestha, M., Authors, C., Ullrich, F., Ba, W., Zahnd, K., & Mueller, M. (2025). *Impact of Hospital Closure on Rural Communities: A Qualitative Study*. <https://rupri.public-health.uiowa.edu/publications/policypapers/Rural%20Hospital%20Closures.pdf>
- [CAST19] Castillo Ramos, M. (2019). *GUIA PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS DE SANEAMIENTO EN COMUNIDADES RURALES*. https://energiasinfronteras.org/wp-content/uploads/2020/03/2019-Enero-SANEAMIENTO_-MARTA-CASTILLO.pdf
- [CLIM21] Climate Data . (2021). *Clima faraya: Temperatura, Climograma y Tabla climática para faraya*. Climate-Data.org. <https://es.climate-data.org/asia/libano/qada-kisrwan/faraya-285903/>
- [DARW24] Darwiche, M., Rabih, A., Faraj, J., Keniar, M., Akl, I., Ali, S., Murr, R., & Khaled, M. (2024). Geothermal energy concept applied to All-Air HVAC system. *Journal of Physics: Conference Series*, 2754(1), 012002. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2754/1/012002>
- [ENER17] Energía sin Fronteras . (2019, February 7). *Guía básica para el desarrollo de proyectos de saneamiento en comunidades rurales*. ESF. Energía Sin Fronteras. <https://energiasinfronteras.org/en/el-saneamiento-compromiso-firme-de-la-cooperacion/>

- [EXTR16] Extron. (2016). *Sistemas de gestión de edificios*. Extron; Extron. <https://www.extron.es/article/bmsad>
- [FAYS24] Fayssal, N., Tawil, A., Danageuzian, H., Sabat, M., ElMerehbi, H., Darazi, D., Sabat, M., Roukos, R., Sara, A. D., & Romanos, J. (2024). Navigating the water–energy nexus amidst the Lebanese economic crisis. *AQUAWater Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(5), 917–929. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.329>
- [GAON17] Gaona García, E., Mancera, P., & Rodríguez, C. (2017). Algoritmo de encaminamiento con reconfiguración de topología para red de sensores inalámbricos aplicada a una Microrred en modo “Isla.” *Revista UIS Ingenierías*, 15, 93–104. <https://doi.org/10.18273/revuin.v15n22016008>
- [GOGO25] Gogoi, E., Luthra, R., Vaish, S., Prakash, S., Sudan Gautam, M., Ene, K., Okodoi, N., & Kumar Arya, S. (2025). *CLIMATE RESILIENCE AND POWERING HEALTHCARE IN THE GLOBAL SOUTH CLIMATE RESILIENCE AND POWERING HEALTHCARE I N THE GLOBAL S OUTH 2*. <https://www.seforall.org/system/files/2025-02/SEforALL-phc-climate-resilience-study.pdf>
- [GRIS21] Grissel Olivera-Martínez, & Adelaido García-Andrés. (2021). Infraestructura hospitalaria y personal médico del Sistema Público de Salud en México ante la pandemia por COVID-19. *Ciencias Administrativas Teoría Y Praxis*, 17(2), 85–105. <https://portal.amelica.org/ameli/journal/658/6583288010/html/>
- [HEAL18] Health Care Without Harm . (2018). *Climate resilience for health care and communities: Strategies and case studies | Health Care Without Harm (US & Canada)*. Noharm.org. <https://us.noharm.org/resources/climate-resilience-health-care-and-communities-strategies-and-case-studies>
- [HEAL23] Health Care Without Harm . (2023). *Elements of climate-resilient healthcare (2023) | Health Care Without Harm (Global)*. Noharm.org. <https://global.noharm.org/resources/elements-climate-resilient-healthcare-2023>

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- [HEND24] Hendzel, C., & Claudio, V. Z. (2024). Potencial de la chimenea solar como estrategia de ventilación natural en Santiago. *ANALES de ARQUITECTURA UC*, 146–153. <https://doi.org/10.7764/AA.2024.17>
- [HEND25] Hendzel, C., Vásquez, C., & Pedro. (2025). Algoritmo de cálculo para estimar el rendimiento higrotérmico de la vegetación en fachadas de pantalla verde. *ANALES de ARQUITECTURA UC*, 94–99. <https://doi.org/10.7764/AA.2025.09>
- [HERA24] HeRAMS. (2024). *Annual Report 2023 Highlight: Geospatial modelling*. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/emergencies/herams/herams_annual_report_2023.pdf
- [HERA24] HeRAMS Afghanistan. (2024). *A comprehensive mapping of availability of essential services and barriers to their provision*. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/emergencies/herams/herams_afg_status_update_summary_report_2024-11.pdf
- [HOLM06] Holmes, G. M., Slifkin, R. T., Randolph, R. K., & Poley, S. (2006). The Effect of Rural Hospital Closures on Community Economic Health. *Health Services Research*, 41(2), 467–485. <https://doi.org/10.1111/j.1475-6773.2005.00497.x>
- [KARA18] KARAM, M. (2018, January 31). *Électricité au Liban : ce qu'il faut savoir pour comprendre une crise qui va crescendo*. L'Orient-Le Jour; L'Orient-Le Jour. <https://www.lorientlejour.com/article/1097035/electricite-au-liban-ce-quil-faut-savoir-pour-comprendre-une-crise-qui-va-crescendo.html>
- [NACI23] Naciones Unidas. (2023). *Edición especial 2023 Informe de los Objetivos de Desarrollo Sostenible*. https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Spanish.pdf
- [NICK15] Nickerson, J. W., Hatcher-Roberts, J., Adams, O., Attaran, A., & Tugwell, P. (2015). Assessments of health services availability in humanitarian emergencies: a review of assessments in Haiti and Sudan using a health systems approach. *Conflict and Health*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13031-015-0045-6>

- [OMAR15] Omar, O., & Sabsabi, Y. (2015). *THERMAL COMFORT IN LEBANESE RESIDENTAL UNIT CASE STUDY: COASTEL REGION IN LEBANON*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2526.6402>
- [PAIK24] Paik, K., & Natuzzi, E. (2024). *Prioritizing Health System Development in the Pacific: A Layered Approach*. Csis.org. <https://www.csis.org/analysis/prioritizing-health-system-development-pacific-layered-approach>
- [PAUL23] Paul, V., Rastogi, A., Dua, S., & Basu, D. (2023). *Healthcare Infrastructure, Resilience and Climate Change: Preparing for Extreme Weather Events*. <https://doi.org/10.1201/9781003393108>
- [PINA11] Pinazo, M., Soto Francés, V., & Lastra, A. G. (2011). *DTIE 7.05*.
- [REIF98] Reif, S., DesHarnais, S., & Bernard, S. (1998). *EFFECTS OF RURAL HOSPITAL CLOSURE ON ACCESS TO CARE*. <https://www.shepscenter.unc.edu/wp-content/uploads/2014/10/wor58.pdf>
- [RESI24] Resilient water solutions against climate change . (2024). *Towards a Sustainable Water Sector: Lebanon's National Water Strategy 2024 – 2035 - Resilient water solutions against climate change*. Rws-Ccaf.com. <https://rws-ccaf.com/Resources/towards-sustainable-water-sector-lebanons-national-water-strategy-2024-%E2%80%93-2035>
- [ROME17] Romero, J. A. (2017, December 11). *Ventilación mecánica con recuperación de calor - arrevol Arquitectos*. Arrevol Arquitectos. <https://arrevol.com/blog/climatizacion-eficiente-en-tu-vivienda-ventilacion-mecanica-de-confort-con-recuperacion-de-calor/>
- [TORR15] Torres Contreras , C. I. (2015). *EFFECTOS DE LA PÉRDIDA DE INFRAESTRUCTURA HOSPITALARIA SOBRE LA CALIDAD DEL SERVICIO DE SALUD*. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134663/Efectos%20de%20la%20p%25%20C3%25A%209rdida%20de%20infraestructura%20hospita%20laria%20sobre%20la%20calidad%20del%20servicio%20de%20salud.pdf?sequence=1>

CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

- [UNIT24] United Nations. (2024). The Sustainable Development Goals Report 2024. In *United Nations*. <https://unstats.un.org/sdgs/report/2024/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2024.pdf>
- [UNIT24] United Nations . (2024, October 22). *Health Resources and Services Availability Monitoring System (HeRAMS) deployment in Gaza, operational status of field hospitals - Gaza snapshot September 2024 - field hospitals - WHO - Question of Palestine*. Question of Palestine. <https://www.un.org/unispal/document/herams-who-update-21oct24/>
- [VEGA25] Vega Hurtado, O. (2025). *energía solar para climatización.pdf*. Scribd. <https://es.scribd.com/document/371354684/energia-solar-para-climatizacion-pdf>
- [WORL20] WHO. (2020). *WHO GUIDANCE FOR CLIMATE-RESILIENT AND ENVIRONMENTALLY SUSTAINABLE HEALTH CARE FACILITIES*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/335909/9789240012226-eng.pdf>
- [WORL21] WHO. (2021). *Health Resources and Services Availability Monitoring System (HeRAMS)*. World Health Organization.
- [WORL24] WHO. (2024a). *Communicable disease services HeRAMS Afar Baseline Report 2023*. https://cdn.who.int/media/docs/default-source/documents/emergencies/herams/herams_afar_baseline_report_2023_communicable_disease_services.pdf
- [WORL24] WHO. (2024b, October 15). *WHO Syria 2023 End of Year Infographic Report: HeRAMS Implementation in Public Hospitals - Syrian Arab Republic*. ReliefWeb. <https://reliefweb.int/report/syrian-arab-republic/who-syria-2023-end-year-infographic-report-herams-implementation-public-hospitals>
- [WISH16] Wishner, J., & Solleveld, P. (2016). *A Look at Rural Hospital Closures and Implications for Access to Care: Three Case Studies*. <https://www.urban.org/sites/default/files/publication/82511/2000857-brief-a-look-at-rural-hospital-closures-and-implications-for-access-to-care.pdf>

- [YEGU16] Yeguas Bermejo, A. (2016). Estudio y proyecto de diversas alternativas de climatización para una casa rural. *Uvadoc.uva.es*.
<http://uvadoc.uva.es/handle/10324/19461>