

# UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

## **Propuesta de un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas, para optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN.**

Para obtener el Título Profesional de Ingeniero Mecánico

Elaborado por:

Eduardo Jose Tello Del Pino

 [0009-0004-3631-3452](https://orcid.org/0009-0004-3631-3452)

Asesor:

Dr. Manuel Villavicencio Chávez

 [0000-0003-0142-7930](https://orcid.org/0000-0003-0142-7930)

LIMA – PERÚ

2025

|                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Citar/How to cite              | (Tello, 2025)                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Referencia/Reference           | Tello, E. (2025). <i>Propuesta de un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas, para optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI. |
| Estilo/Style:<br>APA (7ma ed.) |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |

## ÍNDICE

|                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------|-----|
| ÍNDICE .....                                                   | iii |
| RESUMEN .....                                                  | ix  |
| ABSTRACT: .....                                                | x   |
| INTRODUCCION.....                                              | xi  |
| CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....                                 | 13  |
| 1.1.ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS .....                          | 13  |
| 1.2.IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCION DEL PROBLEMA DE ESTUDIO ..... | 2   |
| 1.3.FORMULACION DEL PROBLEMA.....                              | 3   |
| 1.3.1.Problema Principal.....                                  | 4   |
| 1.3.2.Problemas Específicos .....                              | 4   |
| 1.4.JUSTIFICACION E IMPORTANCIA.....                           | 4   |
| 1.5.OBJETIVOS .....                                            | 6   |
| 1.5.1.Objetivo General.....                                    | 6   |
| 1.5.2.Objetivos Específicos.....                               | 6   |
| 1.6.HIPÓTESIS .....                                            | 6   |
| 1.6.1.Hipótesis General .....                                  | 6   |
| 1.6.2.Hipótesis Especifica.....                                | 7   |
| 1.7.VARIABLES E INDICADORES.....                               | 7   |
| 1.7.1.Variables.....                                           | 7   |
| 1.7.2.Operacionalización de variables. ....                    | 7   |
| 1.8.METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....                      | 8   |
| 1.8.1.Unidad de náalisis .....                                 | 8   |
| 1.8.2.Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación .....             | 9   |
| 1.8.3.Diseño de la Investigación .....                         | 10  |
| 1.8.4.Fuentes de Información .....                             | 11  |

|                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.8.5.Población y Muestra .....                                                  | 12 |
| 1.8.6.Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos.....                       | 13 |
| 1.8.7.Análisis y Procesamiento de Datos .....                                    | 14 |
| CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL .....                                    | 16 |
| 2.1 BASES TEÓRICAS .....                                                         | 16 |
| 2.1.1.Transferencia de calor. ....                                               | 16 |
| 2.1.2.Conducción.....                                                            | 16 |
| 2.1.3.Conducción superficies planas y cilíndricas: .....                         | 16 |
| 2.1.4.Convección.....                                                            | 18 |
| 2.1.5.Radiación.....                                                             | 19 |
| 2.1.6.Normativa Técnica Aplicable (UNE-EN).....                                  | 20 |
| 2.1.7.Número de Reynolds .....                                                   | 21 |
| 2.1.8.Factor de fricción en conductos hidráulicos: ecuación de Colebrook .....   | 23 |
| 2.1.9.Pérdida de carga por fricción en sistemas hidráulicos: Darcy-Weisbach..... | 25 |
| 2.1.10.Flujo térmico .....                                                       | 26 |
| 2.1.11.Carga térmica total.....                                                  | 27 |
| 2.1.12.Caudal Masico .....                                                       | 27 |
| 2.1.13.Potencia Térmica .....                                                    | 28 |
| 2.1.14.Fundamentos de la climatización .....                                     | 28 |
| 2.1.14.1.Piso Radiantes (Principio de Funcionamiento).....                       | 29 |
| 2.1.14.2.Componentes. ....                                                       | 30 |
| 2.1.15.Confort Térmico. ....                                                     | 33 |
| 2.2 MARCO CONCEPTUAL.....                                                        | 34 |
| 2.2.1.Fuente Energética. ....                                                    | 34 |
| 2.2.2.Simulación Computacional.....                                              | 35 |
| 2.2.3.Gas Licuado de Petróleo (GLP). ....                                        | 36 |

|                                                                                    |    |
|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.2.4. Gas Licuado de Petróleo (GN).....                                           | 37 |
| 2.2.5. Temperatura de Bulbo Húmedo (WBT).....                                      | 38 |
| 2.2.6. Rugosidad de la Tubería.....                                                | 40 |
| 2.2.7. Costo Energético. ....                                                      | 40 |
| CAPITULO III:.....                                                                 | 41 |
| DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACION .....                                      | 41 |
| 3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO .....                                | 41 |
| 3.2 PARAMETROS DE DISEÑO .....                                                     | 42 |
| 3.3 CALCULO DEL FLUJO TERMICO Y CARGA TERMICA .....                                | 45 |
| 3.4 CALCULO DEL CAUDAL MASICO Y PARAMETROS HIDRAULICOS .....                       | 49 |
| 3.5 EVALUACION ECONOMICA Y VALIDACION DEL SISTEMA PROPUESTO ....                   | 52 |
| CAPITULO IV: RESULTADOS, CONTRASTE DE HIPOTESIS Y DISCUSION DE<br>RESULTADOS ..... | 54 |
| 4.1 PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....                                  | 54 |
| 4.2 CONTRASTE DE LA HIPOTESIS .....                                                | 59 |
| 4.3 DISCUSION DE LOS RESULTADOS.....                                               | 60 |
| CONCLUSIONES.....                                                                  | 62 |
| RECOMENDACIONES.....                                                               | 64 |
| REFERENCIAS: .....                                                                 | 66 |
| ANEXOS .....                                                                       | 67 |

## LISTA DE TABLAS

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tabla 1</b> Costo fuente energética promedio de Lima (2024) .....                                           | <b>4</b>  |
| <b>Tabla 2</b> Parámetros recomendados según UNE-EN 1264-4 .....                                               | <b>44</b> |
| <b>Tabla 3</b> Parámetros recomendados por UPONOR (2017).....                                                  | <b>44</b> |
| <b>Tabla 4</b> Parámetros recomendados Estándar Hidráulica (Manual 2022) .....                                 | <b>45</b> |
| <b>Tabla 5</b> Simulación de valores de $q$ y $Q$ para cada combinación de superficies y<br>temperaturas ..... | <b>47</b> |
| <b>Tabla 6</b> Parámetros Hidráulicos .....                                                                    | <b>52</b> |
| <b>Tabla 7</b> Tabla comparativa de Costos Energéticos.....                                                    | <b>53</b> |
| <b>Tabla 8</b> Resultados de Simulación Computacional en Python.....                                           | <b>57</b> |

## LISTA DE GRÁFICOS

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Consumo anual mundial de energía por Combustible desde 1994 a 20233                                                                 |    |
| <b>Figura 2.</b> Flujo de calor y perfil de temperaturas sobre una placa plana<br>unidimensional sujeta a condiciones de temperatura constante. .... | 17 |
| <b>Figura 3.</b> Flujo de calor y perfil de temperaturas sobre una superficie cilíndrica a<br>condiciones de temperatura constante. ....             | 18 |
| <b>Figura 4.</b> Convección forzada, Convección natural. ....                                                                                        | 19 |
| <b>Figura 5.</b> Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies<br>que circundan.....                                   | 20 |
| <b>Figura 6 :</b> Flujo laminar y Turbulento.....                                                                                                    | 23 |
| <b>Figura 7:</b> Colectores Modulares .....                                                                                                          | 30 |
| <b>Figura 8:</b> Tubería polietileno reticulada .....                                                                                                | 31 |
| <b>Figura 9:</b> Revestimiento para pisos radiantes .....                                                                                            | 31 |
| <b>Figura 10:</b> Termostatos y elementos de regulación y control .....                                                                              | 32 |
| <b>Figura 11:</b> Perfiles de distribución vertical de temperatura bajo distintos tipos de<br>calefacción .....                                      | 33 |
| <b>Figura 12:</b> Evolución de precios de GLP en locales de venta .....                                                                              | 36 |
| <b>Figura 13:</b> Precio del gas natural (PGN) .....                                                                                                 | 37 |
| <b>Figura 14:</b> Carta Psicométrica.....                                                                                                            | 39 |
| <b>Figura 15:</b> Capturas de Software .....                                                                                                         | 48 |
| <b>Figura 16:</b> Comparativa Costos Energéticos.....                                                                                                | 58 |

## RESUMEN

Este trabajo de suficiencia profesional propone una alternativa técnica para mejorar la climatización en viviendas de hasta 100 m<sup>2</sup> mediante la implementación de un sistema de piso radiante. Inspirado en la normativa europea UNE-EN 1264, el sistema fue adaptado al entorno nacional, considerando como fuentes de energía el gas natural (GN) y el gas licuado de petróleo (GLP).

Para validarlo, se desarrolló un programa en Python que automatiza los cálculos térmicos e hidráulicos requeridos en el diseño. Con esta herramienta, se evaluaron diferentes escenarios simulando variaciones en el área calefaccionada y la temperatura superficial del suelo. La información obtenida nos permitió calcular el flujo térmico, el caudal másico, la pérdida de carga y el régimen de flujo, además del costo energético mensual según el tipo de combustible empleado.

Los resultados mostraron que el uso de gas natural permite mantener el confort térmico con un menor costo de operación frente al GLP o la electricidad. Además, el sistema opera dentro de los límites técnicos definidos por la norma europea. El modelo desarrollado también se considera como una herramienta útil para ingenieros y proyectistas, ya que permite analizar escenarios personalizados y se puede proyectar su aplicación a futuros sistemas híbridos con energías renovables o automatización IoT.

**Palabras clave:** sistema de piso radiante, climatización, gas natural, gas licuado de petróleo, cálculos térmicos e hidráulicos, confort térmico, norma UNE-EN 1264, Python.

## **ABSTRACT:**

This professional sufficiency project proposes a technical alternative to improve climate control in residential spaces of up to 100 m<sup>2</sup> through the implementation of a radiant floor heating system. Inspired by the European standard UNE-EN 1264, the system was adapted to the national context, considering natural gas (NG) and liquefied petroleum gas (LPG) as energy sources.

To validate the design, a Python-based program was developed to automate the thermal and hydraulic calculations required. Using this tool, different scenarios were evaluated by simulating variations in the heated area and surface floor temperature. The resulting data allowed for the calculation of heat flux, mass flow rate, pressure loss, and flow regime, as well as the estimated monthly energy cost based on the selected fuel type.

The results showed that using natural gas makes it possible to maintain thermal comfort at a lower operational cost compared to LPG or electricity. Additionally, the system operates within the technical limits established by the European standard. The computational model is also considered a valuable tool for engineers and system designers, as it allows for the analysis of customized scenarios and can be projected for future implementation in hybrid systems using renewable energy or IoT-based automation.

**Keywords:** radiant floor heating system, climate control, natural gas, liquefied petroleum gas, thermal and hydraulic calculations, thermal comfort, UNE-EN 1264 standard, Python.

## INTRODUCCION

El confort térmico en viviendas no es un tema menor. Muchas personas lo relacionan solo con el frío o el calor, pero en realidad está ligado al bienestar general, tanto físico como mental. En ciudades como Lima, donde el clima puede parecer templado la mayor parte del año, existen épocas en que la incomodidad térmica se hace evidente, sobre todo en casas con mala ventilación o escaso aislamiento. No es casualidad que, últimamente, el interés por soluciones de climatización más eficientes haya crecido.

En muchos hogares aún se usan estufas eléctricas o calentadores portátiles. Funcionan, sí, pero no de forma óptima. El calor no se distribuye bien, los consumos son altos, y en algunos casos, representan un riesgo. Esta situación ha llevado a considerar alternativas que no solo calienten, sino que lo hagan bien, de forma uniforme, segura y sin disparar el recibo de luz. Ahí es donde entra el piso radiante.

Este sistema, que en Europa ya es bastante común, distribuye el calor desde abajo hacia arriba, logrando una sensación térmica más estable. Que tiene como ventaja que no se necesita calentar tanto el ambiente para sentir confort. Además, puede funcionar con gas natural o GLP, fuentes que en el Perú están bastante difundidas, lo que lo hace viable en muchos contextos urbanos.

Este trabajo de suficiencia profesional plantea diseñar y analizar un sistema de piso radiante adaptado al entorno nacional. La idea fue tomar la norma UNE-EN 1264 como referencia y ajustarla a nuestras condiciones. Para eso, se desarrolló un programa en Python, que calcula todos los datos necesarios para ver cómo funcionaría el sistema con distintas configuraciones: desde el tipo de combustible, hasta el área de cobertura y la temperatura del suelo.

Lo que se busca es saber si realmente este tipo de tecnología puede aportar eficiencia y ahorro, sin complicar su instalación o elevar demasiado los costos iniciales. En las siguientes secciones se explicará todo el proceso, desde los fundamentos técnicos, pasando por las herramientas usadas, hasta los resultados que se obtuvieron.

# CAPÍTULO I:

## GENERALIDADES

### 1.1. ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS

**Estándar Hidráulica. (2022)**<sup>1</sup>. Este manual recopila recomendaciones prácticas y parámetros técnicos utilizados en sistemas de climatización por suelo radiante, incluyendo datos sobre tuberías, temperaturas de impulsión, pérdidas de presión, y componentes de control. Su contenido está alineado con la normativa UNE-EN 1264 y se utiliza como guía de referencia en aplicaciones europeas y latinoamericanas.

**FEGECA (2017)**:<sup>2</sup> FEGECA es la única entidad que representa a los fabricantes de generadores y emisores de calor españoles ante la Asociación Europea de la Industria de la Calefacción (EHI).

**Lorbada, David (2015)**:<sup>3</sup> Este proyecto tiene por objetivo el diseño de un sistema de climatización de un edificio público localizado en Madrid, mediante el sistema de suelo radiante/ refrescante con bomba de calor aire-agua. Para ello se aplicarán las exigencias de la normativa vigente: el Código técnico de la edificación (CTE), el Reglamento de instalaciones térmicas (RITE) y la normativa de diseño de suelo radiante (UNE-EN1264).

---

<sup>1</sup> **Estándar Hidráulica. (2022)**. Manual técnico del sistema completo de calefacción por suelo radiante. Estándar Hidráulica – División Técnica Internacional

<sup>2</sup> **FEGECA (2017)**: “Guía de suelo radiante”, Asociación de Fabricantes de Generadores y Emisores de Calor. Madrid – España

<sup>3</sup> **Lorbada, David (2015)**: “Climatización de un edificio público mediante Suelo Radiante / Refrescante”; Universidad Carlos III de Madrid – España

Finalmente, se llevará a cabo una comparativa de eficiencia energética y coste económico de la instalación diseñada con una instalación con bomba de calor aire-aire con fancoil.

**Olivera, Davy (2011):**<sup>4</sup> Tesis para optar el título de ingeniero Mecánico. El presente trabajo de tesis busca mostrar una forma de calefacción diferente llamada calefacción por suelo radiante, que consiste en instalar tuberías de un material termoplástico denominado PEX, en el interior del suelo, por estar tuberías circula agua caliente la cual eleva la temperatura del suelo y por ende de la habitación. Por ello, el objetivo principal de esta tesis es diseñar un SUELO RADIANTE para poder mejorar la calidad de vida de las personas en el poblado de Langui, ubicado en el departamento del Cuzco, a una altura de aproximadamente 4000msnm.

## **1.2. IDENTIFICACIÓN Y DESCRIPCION DEL PROBLEMA DE ESTUDIO**

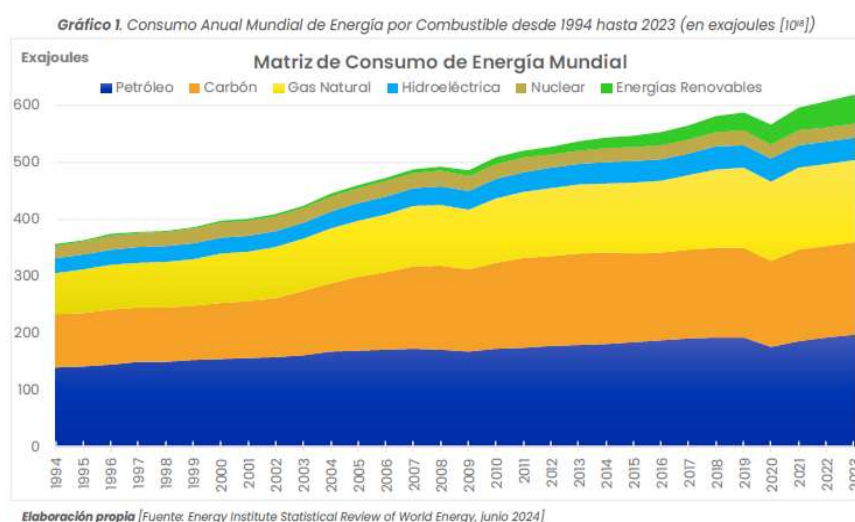
En Perú, el consumo de energía para la climatización de edificios es considerable, especialmente en zonas con climas cálidos/fríos. Los sistemas tradicionales de climatización, como el aire acondicionado central, son ineficientes y costosos, tanto en términos de consumo de energía como de impacto ambiental.

El uso de sistemas de climatización por piso radiante con GLP/GN se presenta como una alternativa eficiente y sostenible. El GLP y GN son combustibles fósiles que, al ser utilizado en este tipo de sistemas, ofrece un menor consumo de energía y una menor emisión de gases de efecto invernadero en comparación con los sistemas tradicionales (eléctricos).

---

<sup>4</sup> **Olivera, Davy (2011):** "Diseño energético de un suelo radiante para una sala de 12 m<sup>2</sup> ubicada a 4000 msnm en Langui-Cuzco", Pontificia Universidad Católica del Perú – Perú

**Figura 1: Consumo anual mundial de energía por Combustible desde 1994 a 2023**



Fuente: Boletín Trimestral 3T 2024 (Osinerghmin, 2025).

Sin embargo, no existe un modelo específico para el cálculo y dimensionamiento de sistemas de climatización por piso radiante con GLP en Perú. La falta de este modelo dificulta la adopción de esta tecnología por parte de los profesionales del sector y limita su desarrollo en el mercado peruano.

### 1.3. FORMULACION DEL PROBLEMA

En muchas zonas frías del país, las bajas temperaturas no solo generan incomodidad, sino que también pueden afectar la salud y el rendimiento diario de las personas. Aunque existen fuentes de energía disponibles, como el gas natural (GN) o el gas licuado de petróleo (GLP), en la práctica, las opciones de calefacción más comunes no siempre resultan seguras ni accesibles. Algunas son costosas, otras poco eficientes, y hay casos donde incluso representan un riesgo para los usuarios. Esta realidad pone en evidencia la necesidad de

contar con un sistema de climatización que sea eficiente, se adapte a la forma en que están construidas nuestras viviendas y garantice un uso seguro de la energía.

**1.3.1. Problema Principal**

¿De qué manera se puede optimizar la eficiencia energética en climatización utilizando GLP/GN?

**1.3.2. Problemas Específicos**

- a) ¿qué factores pueden mejorar la eficiencia energética en sistemas de climatización?
- b) ¿De qué manera se puede automatizar los cálculos de diseño para determinar la energía del sistema?
- c) ¿De qué manera se podrá aprovechar el GLP/GN, en sistemas de climatización?

**1.4. JUSTIFICACION E IMPORTANCIA**

Los sistemas de climatización desempeñan una función importante en crear y mantener ambientes confortables y saludables, en amplia gama de espacios desde hogares, departamentos, oficinas hasta industrias. Siendo de estos sistemas los pisos radiantes los que mejor perfil de confort térmico brindan, sin embargo, pueden como todos los sistemas de climatización pueden llegar a consumir una cantidad significativamente alta de energía contribuyendo a costos altos de operación.

**Tabla 1**  
*Costo fuente energética promedio de Lima (2024)*

| Fuente Energética | Costo Promedio | Rango Observado | Fuente Oficial | URL |
|-------------------|----------------|-----------------|----------------|-----|
|-------------------|----------------|-----------------|----------------|-----|

|              |          |             |                                                      |                                                                                                                                       |
|--------------|----------|-------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              | (S./kWh) |             |                                                      |                                                                                                                                       |
| Electricidad | 0.68     | 0.64 – 0.72 | Osinergmin (2024) – Tarifas eléctricas residenciales | <a href="https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/tarifas">https://www.osinergmin.gob.pe/empresas/electricidad/tarifas</a> |
| Gas Natural  | 0.11     | 0.10 – 0.13 | Cálidda (2024) – Tarifas residenciales               | <a href="https://www.calidda.com.pe/tarifas">https://www.calidda.com.pe/tarifas</a>                                                   |
| GLP          | 0.38     | 0.35 – 0.40 | Osinergmin (2024) – Precio por kg convertido a kWh   | <a href="https://www.facilito.gob.pe">https://www.facilito.gob.pe</a>                                                                 |

El sistema de suelo radiante se caracteriza por operar con temperaturas bajas de impulsión (30–45 °C), permitiendo un uso racional de la energía y una distribución térmica uniforme. Esto mejora el confort térmico, reduce el riesgo de enfermedades respiratorias y disminuye los costos de operación frente a sistemas eléctricos o de combustión directa.

El sistema propuesto responde a tres enfoques fundamentales:

- **Técnico:** cumple con la norma UNE-EN 1264 y emplea componentes probados (tuberías PE-Xa, aislantes térmicos, colectores).
- **Económico:** aprovecha fuentes accesibles como el GLP o GN, reduciendo la factura energética hasta en un 60 %, según datos del Manual Radiant (2022).
- **Social:** mejora la calidad de vida de familias y puede replicarse a mayor escala con mínima intervención estructural.

La justificación de esta investigación se fundamenta en el alto costo de operación de los sistemas de climatización que impactan de forma negativa en su implementación, por lo que se busca optimizarlo automatizando los cálculos para comparar su efectividad cambiando la

fuentes de energía por GLP/GN aprovechando la gran masificación de estos. Siendo estas fuentes de energía más limpias y de costos bajos. Posibilitando la reducción de gastos operativos y promocionando el mayor uso de sistemas de climatización.

Esta investigación es importante porque permitirá la masificación de nuevos sistemas de climatización que puedan aprovechar energías más limpias como GLP/GN además de poder generar normativa propia en base a normativa europea.

## **1.5. Objetivos**

### **1.5.1. Objetivo General**

Proponer un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas, para optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Determinar qué factores mejoran la eficiencia energética en sistemas de climatización.
- Automatizar los cálculos para evaluar el consumo energético de los pisos radiantes mediante modelo computacional en Python.
- Comparar la efectividad energética al usar como fuente de energía el GLP/GN.

## **1.6. Hipótesis**

### **1.6.1. Hipótesis General**

La propuesta de un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas permite la optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN.

### 1.6.2. Hipótesis Específica

- a) La automatización de los cálculos permite realizar un análisis más rápido del consumo energético un sistema de climatización.
- b) El GLP/GN permite una mejora en la eficiencia energética en pisos radiantes.

## 1.7. VARIABLES E INDICADORES

### 1.7.1. Variables.

- **Variable Independiente (VI):**

Sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas.

- **Variable Dependiente (VD):**

Optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN.

### 1.7.2. Operacionalización de variables.

| OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |                          |                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| VARIABLE                                                                                                          | DEFINICIÓN CONCEPTUAL                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | DIMENSIONES              | INDICADOR                                                                                |
| <b>VARIABLE INDEPENDIENTE</b><br><b>VI :</b> Sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas | Un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas es un sistema de calefacción y/o refrigeración que utiliza tuberías instaladas bajo el suelo para distribuir agua caliente o fría a fin de mantener una temperatura confortable en el interior de un recinto. Este tipo de sistema se caracteriza por su alto confort térmico y bajo impacto ambiental que lo convierte en una opción cada vez más popular en Europa y otras regiones del mundo. | Confort térmico          | Temperatura Ambiente (°C)<br>Humedad Relativa (%)                                        |
|                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Impacto ambiental        | Calidad de aire (recirculación de polvo y alérgenos en el ambiente)<br>emisiones de CO2. |
|                                                                                                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | Bienestar                | Niveles de ruido (dB)                                                                    |
| <b>VARIABLE DEPENDIENTE</b><br><b>VD :</b> Optimización de                                                        | La optimización de la eficiencia energética utilizando GLP/GN se refiere al conjunto de estrategias y tecnologías                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Consumo de energía total | kWh                                                                                      |

|                                         |                                                                                                                                                                                                                                  |                           |                                                            |
|-----------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------|
| eficiencia energética utilizando GLP/GN | implementadas en sistemas de climatización por piso radiante con el objetivo de reducir el consumo de energía y mejorar su rendimiento energético, utilizando como combustible gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural (GN). | Eficiencia energética     | (Costo kWh) / (Masa de combustible)                        |
|                                         |                                                                                                                                                                                                                                  | calculo matriz energética | comparación de eficiencias energéticas entre combustibles. |

## 1.8. Metodología de la Investigación

El presente trabajo de investigación es de **tipo aplicada**, ya que busca resolver un problema técnico específico: el diseño, implementación virtual (programa en Python) y evaluación de un sistema de climatización por piso radiante utilizando GLP/GN, con fines de optimización de la eficiencia energética en viviendas residenciales.

Se emplea un **enfoque cuantitativo**, al sustentarse en mediciones numéricas, simulaciones térmicas, cálculos hidráulicos y análisis comparativos de datos energéticos.

El diseño metodológico es **no experimental**, dado que no se manipulan directamente las variables en un entorno físico, sino que se analiza su comportamiento mediante un **estudio de casos** aplicado a tres tipos de viviendas simuladas (40, 60 y 100 m<sup>2</sup>) en Lima.

Además, el estudio se desarrolla bajo el método **hipotético-deductivo**, al usar marcos normativos (como la norma UNE-EN 1264 y ASHRAE 55) y datos técnicos actuales (como precios de GN, GLP y electricidad), los cuales permiten verificar la hipótesis propuesta a través de un programa en Python.

### 1.8.1. UNIDAD DE ANÁLISIS

Las unidades de análisis están conformadas por los siguientes elementos clave:

- El sistema de climatización por piso radiante como objeto técnico-modelado.

- Tres casos tipo de viviendas unifamiliares (40, 60 y 100 m<sup>2</sup>) en condiciones térmicas propias del invierno en Lima.
- Las fuentes energéticas comparadas: gas natural, GLP y electricidad.
- Programa en Python como herramienta de simulación y evaluación técnica.
- Los parámetros normativos de diseño: temperatura superficial, salto térmico, eficiencia energética, entre otros, establecidos por UNE-EN 1264.

### **1.8.2. Tipo, Enfoque y Nivel de Investigación**

La investigación se clasifica como aplicada, Este proyecto parte de una necesidad bastante práctica: muchas viviendas en el país no cuentan con sistemas de climatización adecuados y, cuando los tienen, suelen ser costosos o poco eficientes. Más allá de teorías, el objetivo fue proponer una solución que pueda aplicarse realmente. Por eso se diseñó una herramienta en Python —no muy compleja, pero funcional— que permite simular cómo funcionaría un sistema de piso radiante usando GLP o gas natural.

Con esa base, lo que se hizo fue probar distintos escenarios. Se cambiaron cosas como el área del piso, la temperatura de operación, el tipo de energía. Todo esto sirvió para sacar cálculos y ver cómo respondía el sistema. En lugar de limitarse a una sola configuración, se buscó entender el comportamiento bajo distintas condiciones. Las fórmulas usadas vinieron, en parte, de la norma UNE-EN 1264, pero también hubo ajustes para que encaje con la realidad local.

En cuanto al enfoque, se trabajó con datos concretos. Nada especulativo. Se midieron temperaturas, flujos, pérdidas de carga datos que se pueden verificar y calcular. Por eso se dice que el estudio es cuantitativo. Y sobre el nivel, entra en lo descriptivo porque se explica

el sistema y sus componentes, y también en lo correlacional, porque se analizaron relaciones entre variables como el tipo de combustible y la eficiencia obtenida.

### **1.8.3. Diseño de la Investigación**

El diseño adoptado para esta investigación es de tipo no experimental, ya que no se manipulan de forma directa las variables que intervienen en el estudio, ni se interviene en un entorno físico real. En su lugar, se recurre al análisis y simulación de escenarios mediante un modelo computacional que representa el comportamiento de un sistema de climatización por piso radiante bajo distintas condiciones operativas.

Este trabajo se enmarca en un estudio de casos, aplicado a tres tipologías de vivienda (de 40, 60 y 100 metros cuadrados), seleccionadas por su representatividad en construcciones residenciales urbanas. A partir de estos casos, se evalúa el rendimiento del sistema al utilizar diferentes fuentes energéticas —gas natural, GLP y electricidad—, considerando tanto parámetros técnicos como económicos.

El carácter transversal del diseño radica en que la información recolectada y analizada corresponde a un momento específico del tiempo: el comportamiento del sistema en condiciones climáticas propias del invierno limeño. Esto permite establecer comparaciones entre los casos seleccionados sin necesidad de realizar un seguimiento prolongado en el tiempo.

En conjunto, este diseño metodológico permite simular, analizar y comparar distintas alternativas de climatización sin necesidad de intervenir físicamente en edificaciones reales, lo que representa una ventaja significativa en términos de tiempo, recursos y seguridad, además de facilitar la validación de los resultados mediante normas técnicas reconocidas.

#### **1.8.4. Fuentes de Información**

Para el desarrollo de esta investigación se utilizaron tanto fuentes primarias como fuentes secundarias, con el fin de asegurar la solidez técnica y la coherencia normativa del modelo propuesto.

Las fuentes primarias corresponden a los resultados generados a partir del programa elaborado en Python. Este programa permitió simular el comportamiento térmico e hidráulico del sistema de climatización en diversos escenarios, brindando información detallada sobre caudal másico, carga térmica, consumo energético estimado y costos mensuales asociados. Los datos generados fueron organizados en tablas y gráficos, facilitando su análisis comparativo.

En cuanto a las fuentes secundarias, se consultaron documentos normativos, manuales técnicos, bases de datos oficiales y trabajos previos relevantes. Entre las normas utilizadas destacan la UNE-EN 1264, que establece los criterios de diseño para sistemas de calefacción por superficies, y el estándar ASHRAE 55 (2020), que define los rangos de confort térmico para ambientes interiores. También se emplearon guías técnicas y catálogos de fabricantes reconocidos como Uponor (2017) y Radiant Heating Solutions (2022), los cuales fueron fundamentales para definir parámetros técnicos de instalación.

Asimismo, se revisaron tarifas actualizadas de energía proporcionadas por Osinergmin y Cálidda, lo que permitió calcular los costos operativos con base en precios reales de GLP,

GN y electricidad en el mercado peruano. Finalmente, se tomaron como referencia trabajos académicos relacionados con climatización eficiente, destacando la tesis de Correa Sánchez (2023), que aborda una propuesta de calefacción radiante para viviendas rurales altoandinas, y el trabajo de Hinojosa Mateo (2020) sobre simulación energética de sistemas radiantes.

#### **1.8.5. Población y Muestra**

La población considerada en este estudio está conformada por los sistemas de climatización térmica aplicables a viviendas unifamiliares en zonas urbanas del Perú, específicamente aquellas ubicadas en regiones con condiciones climáticas templadas o húmedas, como es el caso de Lima Metropolitana. Dentro de esta población se incluyen diversas alternativas tecnológicas —como estufas eléctricas, radiadores, bombas de calor y sistemas híbridos—, sin embargo, el foco de este trabajo se centra en el análisis del sistema por piso radiante hidráulico, por tratarse de una solución eficiente y poco explorada en el contexto nacional.

En lugar de trabajar con una población estadística tradicional, se optó por un enfoque técnico, eligiendo como base de análisis una muestra representativa desde el punto de vista constructivo y térmico. En este sentido, la muestra se compone de tres tipos de vivienda unifamiliar simulada: una de 40 m<sup>2</sup>, otra de 60 m<sup>2</sup> y una tercera de 100 m<sup>2</sup>. Estas dimensiones fueron seleccionadas con base en su frecuencia de uso en edificaciones residenciales en Lima, y por ofrecer un rango suficiente para observar variaciones térmicas y energéticas en función del tamaño del recinto calefaccionado.

La selección fue no probabilística por criterios técnicos, es decir, no se recurrió a sorteo o aleatoriedad, sino a un criterio de pertinencia en función del objetivo de investigación. Cada

una de estas viviendas fue modelada computacionalmente como un caso independiente dentro del algoritmo desarrollado, aplicando condiciones climáticas reales y criterios de diseño normativo. Esto permitió no solo simular su comportamiento térmico, sino también comparar los resultados bajo distintos escenarios energéticos, como el uso de gas natural, GLP o electricidad.

La muestra resultante ofreció una base sólida para evaluar la relación entre variables clave: área calefaccionada, temperatura exterior, consumo energético y costo mensual. Asimismo, permitió validar el modelo propuesto en situaciones de distinta exigencia térmica, sin necesidad de realizar ensayos físicos en campo, lo cual fue especialmente importante dada la naturaleza no experimental del estudio.

#### **1.8.6. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos**

Debido al carácter técnico y computacional de esta investigación, se utilizó como principal técnica de recolección de datos la simulación por computadora, la cual permite analizar el comportamiento térmico y energético de un sistema de climatización sin necesidad de contar con un prototipo físico.

El instrumento central es un programa en Python. Este programa cuenta con una interfaz gráfica amigable, que permite al usuario ingresar los parámetros necesarios del sistema —como área calefaccionada, temperatura exterior, fuente energética, tipo de red hidráulica, etc.— y obtener en tiempo real los resultados correspondientes: flujo térmico, carga térmica total, caudal másico, potencia térmica y consumo energético estimado, tanto en términos técnicos como económicos.

El algoritmo incorpora ecuaciones térmicas basadas en la normativa UNE-EN 1264, así como fórmulas hidráulicas y energéticas validadas en literatura técnica. Para cada escenario, el sistema calcula automáticamente el rendimiento esperado del piso radiante y estima el costo mensual de operación en función de los precios oficiales del kWh térmico, según la fuente energética seleccionada (GN, GLP o electricidad).

Además del software, se utilizaron hojas de cálculo estructuradas en Excel para organizar los datos de salida del programa y generar cuadros comparativos, permitiendo visualizar tendencias, diferenciales de rendimiento y costos entre escenarios. También se emplearon tablas normativas y fichas técnicas de fabricantes (como Radiant Heating Solutions y Uponor) como instrumentos complementarios de validación y calibración de resultados.

#### **1.8.7. Análisis y Procesamiento de Datos**

El análisis de datos en esta investigación se fundamentó en el procesamiento de la información generada a través del modelo computacional implementado en Python, el cual fue desarrollado específicamente para simular el comportamiento térmico e hidráulico del sistema de climatización por piso radiante bajo diferentes condiciones operativas.

Una vez ingresados los parámetros clave —como el área calefaccionada, la temperatura exterior, el tipo de fuente energética y el salto térmico entre impulsión y retorno— el programa ejecutaba cálculos automáticos que permitían estimar variables fundamentales como el **flujo térmico ( $q$ )**, la **carga térmica total ( $Q$ )**, el **caudal másico ( $\dot{m}$ )** y la **potencia térmica requerida ( $P$ )**. Asimismo, el software entregaba una **estimación del consumo**

**energético anual (kWh)** y del **costo mensual de operación (S/.)**, considerando los valores tarifarios oficiales de cada fuente energética.

Los datos resultantes fueron exportados a hojas de cálculo estructuradas, donde se organizaron en tablas comparativas y gráficos de barras que permitieron identificar patrones y contrastes entre los diferentes escenarios evaluados. Por ejemplo, se comparó el rendimiento del sistema en viviendas de 40, 60 y 100 m<sup>2</sup> al usar GLP, GN y electricidad, observando no solo el impacto en consumo y costos, sino también la relación entre eficiencia térmica y tamaño del recinto.

Además, se incorporaron variables ambientales como la humedad relativa interior estimada y la temperatura operativa resultante, lo que permitió valorar el sistema no solo desde el punto de vista técnico-económico, sino también desde su contribución al confort térmico, conforme a los estándares establecidos por **ASHRAE 55** (2020).

El procesamiento de resultados no se limitó a la lectura de cifras, sino que incluyó su validación normativa frente a los criterios técnicos de la UNE-EN 1264, garantizando que los valores obtenidos se encuentren dentro de los rangos aceptables de operación. Esta validación cruzada fue esencial para comprobar la confiabilidad del modelo y sustentar las conclusiones del estudio.

## **CAPÍTULO II:**

### **MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL**

#### **2.1 BASES TEÓRICAS**

##### **2.1.1. Transferencia de calor.**

La transferencia de calor es el proceso por el cual el calor se transfiere de una región a otra debido a una diferencia de temperatura. (Yunus A.Cengel y Michael A. Boles Capitulo 4, p.103). Esta energía se transfiere en tres mecanismos principales:

##### **2.1.2. Conducción.**

El calor se transfiere a través de un material sólido debido a la interacción directa entre las partículas del material.

La transferencia de energía se da por comunicación molecular directa sin que las moléculas se desplacen de manera apreciable. Este proceso se basa en la Ley de Fourier, la que especifica que un flujo de calor ( $q_x^o$ ) es proporcional al gradiente de temperaturas ( $\partial T$ ) que se genera en una dirección "X", perpendicular al área (A) y la conductividad térmica (K)

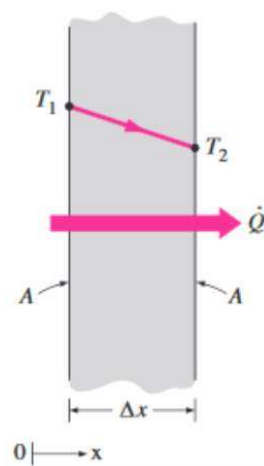
$$q_x^o(w) = k * A * \frac{\partial T}{\partial x}$$

##### **2.1.3. Conducción superficies planas y cilíndricas:**

La convección en superficies planas se refiere al proceso de transferencia de calor entre una superficie plana y un fluido adyacente que está en movimiento. La tasa de transferencia de calor depende de varios factores, incluyendo:

- **Diferencia de temperatura:** Cuanto mayor sea la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido, mayor será la tasa de transferencia de calor.
- **Propiedades del fluido:** La conductividad térmica, la viscosidad y la densidad del fluido influyen en la transferencia de calor.
- **Velocidad del fluido:** A mayor velocidad del fluido, mayor será la tasa de transferencia de calor.
- **Geometría de la superficie:** La rugosidad o textura de la superficie puede afectar la transferencia de calor.
- **Diámetro del cilindro:** Un mayor diámetro del cilindro generalmente conduce a una mayor tasa de transferencia de calor.
- **Longitud del cilindro:** La longitud del cilindro también puede afectar la transferencia de calor, pero su efecto es menos significativo que el del diámetro.

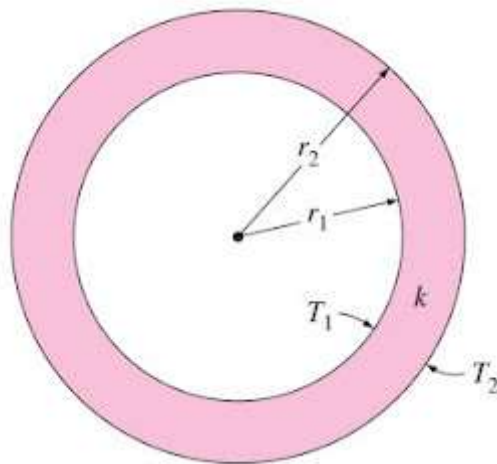
**Figura 2.** Flujo de calor y perfil de temperaturas sobre una placa plana unidimensional sujeta a condiciones de temperatura constante.



$$q_x^o(w) = k * A * \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x}$$

Fuente: (Çengel, 2007).

**Figura 3.** Flujo de calor y perfil de temperaturas sobre una superficie cilíndrica a condiciones de temperatura constante.



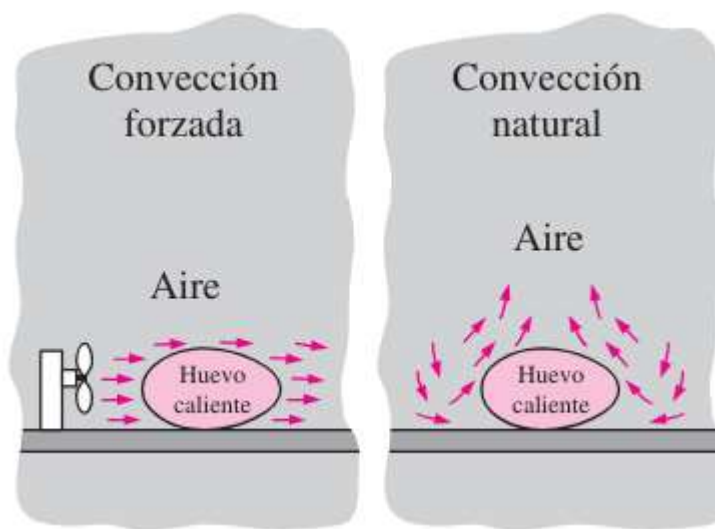
$$q_x^o(w) = 2\pi Lk * \frac{(T_1 - T_2)}{\ln(r_2 - r_1)}$$

Fuente: (Çengel, 2007).

#### 2.1.4. Convección.

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia.

**Figura 4.** Convección forzada, Convección natural.



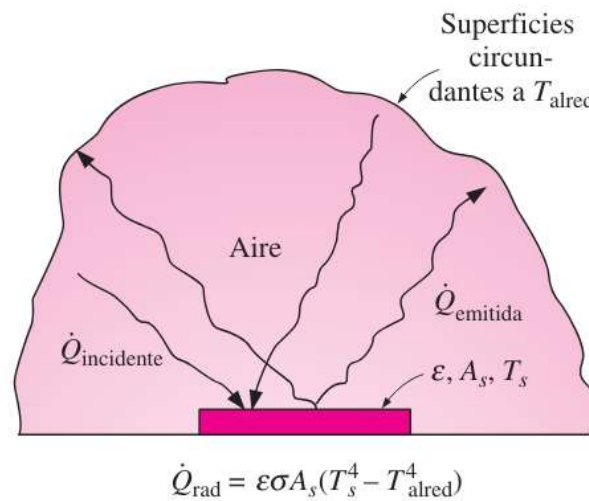
$$q_x^o(w) = h * A * (T_1 - T_2)$$

Fuente: (Çengel, 2007).

#### **2.1.5. Radiación.**

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas (o fotones) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un medio interventor. De hecho, la transferencia de calor por radiación es la más rápida (a la velocidad de la luz) y no sufre atenuación en un vacío. Ésta es la manera en la que la energía del Sol llega a la Tierra.

**Figura 5.** Transferencia de calor por radiación entre una superficie y las superficies que circundan.



$$q_x^o(w) = \varepsilon * \sigma * A * (T_1^4 - T_2^4)$$

Fuente: (Çengel, 2007).

$$\sigma = 5.6697 * 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4} \text{ (Constante de Stefan-Boltzmann)}$$

#### 2.1.6. Normativa Técnica Aplicable (UNE-EN)

El diseño y operación de sistemas de climatización por suelo radiante en el contexto europeo está regulado principalmente por la norma UNE-EN 1264, la cual se divide en cinco partes (UNE-EN 1264-1 a 1264-5) y establece los principios de diseño, requisitos técnicos, métodos de cálculo y procedimientos de validación de instalaciones térmicas por superficie radiante.

La UNE-EN 1264-2, específicamente, define los límites térmicos de seguridad y confort aceptables para el diseño del sistema. Entre los parámetros más importantes se encuentran:

- Temperatura máxima de la superficie del suelo:
  - 29 °C en áreas de ocupación continua (habitaciones, salas)
  - 33 °C en zonas húmedas (baños)
  - 35 °C en zonas de circulación (pasillos)
- Temperatura máxima del agua de impulsión: 55 °C
- Diferencial de temperatura recomendado entre impulsión y retorno ( $\Delta T$ ): 5–10 °C

Por su parte, la UNE-EN 1264-4 establece las condiciones para la instalación hidráulica, especificando que la longitud de cada circuito no debe superar los 120 metros lineales. Esta restricción busca evitar pérdidas excesivas de presión y garantizar la homogeneidad de la temperatura en toda la superficie calefaccionada.

#### **2.1.7. Número de Reynolds**

El número de Reynolds es una magnitud adimensional que se utiliza para caracterizar el tipo de régimen de flujo que se presenta en un fluido en movimiento dentro de una tubería u otro canal cerrado. Esta variable juega un papel fundamental en la ingeniería térmica e hidráulica, ya que permite determinar si el flujo es laminar, transicional o turbulento, lo cual influye directamente en la transferencia de calor, la pérdida de presión y la eficiencia del sistema.

En términos generales, el número de Reynolds ( $Re$ ) es el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido. Se calcula a través de la fórmula:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu}$$

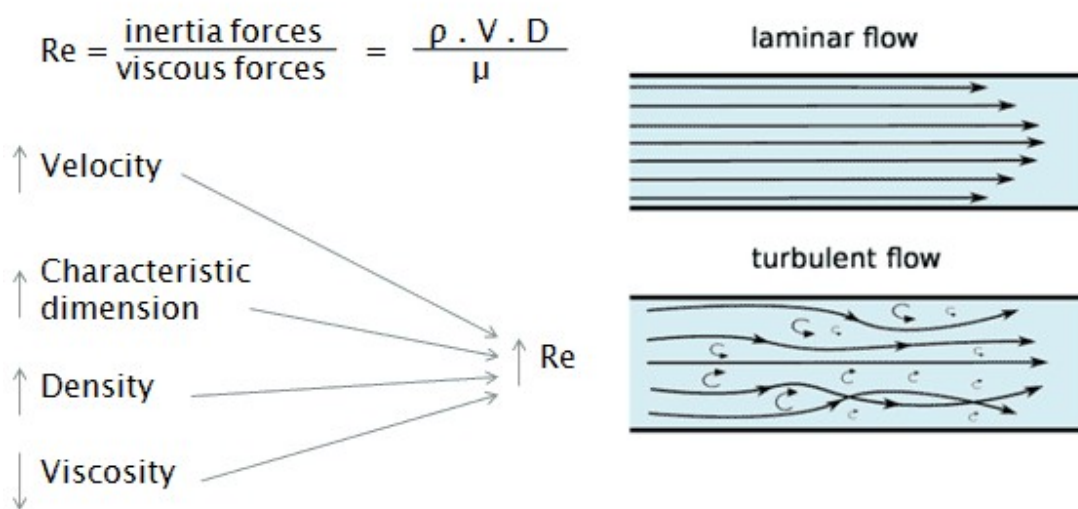
Donde:

- $\rho$  es la densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )
- $v$  es la velocidad media del fluido ( $\text{m/s}$ )
- $D$  es el diámetro hidráulico de la tubería ( $\text{m}$ )
- $\mu$  es la viscosidad dinámica del fluido ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$  o  $\text{N}\cdot\text{s/m}^2$ )

Cuando  $Re < 2300$ , el flujo se considera laminar, es decir, el fluido se desplaza en capas ordenadas con mínima mezcla entre ellas. En este régimen, la transferencia de calor es menor, pero la pérdida de presión también es baja. Cuando  $Re > 4000$ , el flujo se clasifica como turbulento, caracterizado por un movimiento caótico y mezcla intensa de partículas, lo que mejora la transferencia térmica, pero también incrementa significativamente la pérdida de carga por fricción. En el rango intermedio (2300–4000), se considera que el flujo está en régimen transicional, con comportamiento inestable.

En los sistemas de climatización por piso radiante, determinar el número de Reynolds es clave para optimizar el diseño hidráulico. Si se elige mal el diámetro o no se considera la velocidad del fluido, se podría operar en un régimen no deseado. Por ejemplo, trabajar en régimen laminar podría parecer conveniente por la baja pérdida de carga, pero sería ineficiente en cuanto a transmisión de calor. Por el contrario, un régimen excesivamente turbulento podría generar un gasto innecesario de energía en bombeo.

**Figura 6 :** Flujo laminar y Turbulento



*Fuente: Autor desconocido*

### 2.1.8. Factor de fricción en conductos hidráulicos: ecuación de Colebrook

El factor de fricción es un parámetro crucial en el diseño de sistemas de conducción de fluidos, ya que permite calcular la pérdida de presión que se produce por la fricción entre el fluido y las paredes internas de la tubería. Esta pérdida representa una forma de disipación energética inevitable en sistemas hidráulicos cerrados, como los empleados en climatización por piso radiante, y debe ser cuidadosamente considerada para dimensionar adecuadamente las bombas de circulación y garantizar la eficiencia del sistema.

En sistemas con flujo turbulento (es decir, donde el número de Reynolds es superior a 2300), el cálculo del factor de fricción es más complejo que en el caso de flujo laminar. Una de las fórmulas más aceptadas internacionalmente para determinar este valor es la ecuación de Colebrook-White, una expresión implícita que relaciona el factor de fricción con el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería:

$$1 / \sqrt{f} = -2 \log_{10} [ (\varepsilon / 3.7D) + (2.51 / (Re\sqrt{f})) ]$$

Donde:

- f: factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional)
- $\varepsilon$ : rugosidad absoluta de la tubería (m)
- D: diámetro interior de la tubería (m)
- Re: número de Reynolds

Debido a que la variable f aparece en ambos lados de la ecuación, esta no puede resolverse de forma algebraica directa. En la práctica, se emplean métodos iterativos o aproximaciones numéricas para encontrar el valor de f con suficiente precisión. Para el desarrollo de esta tesis, se implementó un procedimiento iterativo de 10 pasos dentro del programa computacional en Python, el cual parte de un valor inicial estimado (por ejemplo,  $f=0.02$ ) y lo refina sucesivamente hasta que la variación entre iteraciones es insignificante (menor a  $10^{-6}$ ).

Este nivel de detalle permite evaluar el comportamiento real del sistema frente a distintas configuraciones hidráulicas, incluyendo cambios en el tipo de tubería, el diámetro interno, la longitud del circuito o la velocidad del fluido. En instalaciones de piso radiante, donde se suelen utilizar tuberías de polietileno reticulado con rugosidades entre 0.00001 y 0.0002 m, el factor de fricción calculado correctamente garantiza que no se sobrepasen los

límites de presión definidos por la norma UNE-EN 1264 (pérdida máxima recomendada de 200–250 mbar por circuito).

#### 2.1.9. **Pérdida de carga por fricción en sistemas hidráulicos: Darcy-Weisbach**

En los sistemas de climatización por piso radiante, el agua caliente debe recorrer largos circuitos de tubería desde un colector hasta los recintos calefaccionados, y retornar nuevamente. Durante este recorrido, el fluido experimenta una pérdida de energía mecánica debido a la fricción que se genera entre el fluido en movimiento y las paredes internas de la tubería. Esta pérdida de energía se manifiesta como una disminución de presión, conocida como pérdida de carga, la cual es crítica para el diseño del sistema de bombeo y para asegurar el funcionamiento eficiente del sistema hidráulico.

La pérdida de carga puede calcularse mediante diversas expresiones, pero la más ampliamente utilizada y reconocida en la ingeniería moderna es la fórmula de Darcy-Weisbach, que establece la relación entre la pérdida de presión, la longitud de la tubería, el diámetro, la velocidad del fluido y el factor de fricción:

$$hf = f \times (L / D) \times (v^2 / 2g)$$

Donde:

- hf: pérdida de carga por fricción (m)
- f: factor de fricción de Darcy-Weisbach (adimensional)
- L: longitud total de la tubería (m)

- D: diámetro interior de la tubería (m)
- v: velocidad del fluido (m/s)
- g: aceleración de la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>)

Esta fórmula permite obtener la pérdida de presión expresada en metros de columna de agua, lo cual resulta muy útil para dimensionar la bomba circuladora del sistema. La variable  $f$ , conocida como factor de fricción, depende del régimen de flujo (laminar o turbulento) y de la rugosidad relativa de la tubería, y es calculada con la ecuación de Colebrook-White.

Cabe destacar que el diseño eficiente del sistema requiere que la pérdida de carga total no supere los límites establecidos por la normativa europea UNE-EN 1264, que recomienda mantenerla por debajo de 200 a 250 mbar por circuito, equivalente aproximadamente a 2 a 2.5 metros de columna de agua. En la práctica, se añade un 15% adicional para compensar pérdidas en accesorios como codos, válvulas y colectores, tal como ha sido incluido también en el modelo computacional desarrollado.

#### 2.1.10. Flujo térmico

El flujo térmico es la cantidad de energía térmica transferida por unidad de área y tiempo. En sistemas de climatización por piso radiante, se calcula considerando la diferencia de temperatura entre la superficie del suelo y el ambiente interior, así como la conductividad del medio.

$$q = 8.92 \times (T_s - T_a)^{1.1}$$

Donde:

- q = flujo térmico (W/m<sup>2</sup>)

- $T_s$  = temperatura superficial del suelo ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_a$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### 2.1.11. Carga térmica total

La carga térmica total es la cantidad de calor necesaria para mantener una temperatura constante en un espacio determinado durante un periodo de tiempo. Es un valor clave en el dimensionamiento del sistema de climatización.

$$Q = q \times A$$

Donde:

- $Q$  = carga térmica (W)
- $q$  = flujo térmico ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
- $A$  = área calefaccionada ( $\text{m}^2$ )

#### 2.1.12. Caudal Masico

El caudal másico representa la masa de fluido (agua) que circula por unidad de tiempo dentro del sistema de climatización. Es un parámetro esencial para determinar la capacidad de transporte de energía del sistema hidráulico.

$$\dot{m} = (A \times q) / [\Delta T \times cW \times (1 + R_o/R_u + (T_a - T_s)/(q \times R_u))]$$

Donde:

- $\dot{m}$  = caudal másico ( $\text{kg}/\text{h}$ )
- $\Delta T$  = salto térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $cW$  = calor específico del agua ( $4.186 \text{ kJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$ )
- $R_o, R_u$  = resistencias térmicas del material y entorno ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

- $T_a$  = temperatura ambiente ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_s$  = temperatura superficial ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### **2.1.13. Potencia Térmica**

La potencia térmica es la energía térmica entregada por unidad de tiempo al sistema, y permite seleccionar adecuadamente la caldera o fuente de energía.

$$P = \dot{m} \times c \times \Delta T$$

Donde:

- $P$  = potencia térmica (kW)
- $\dot{m}$  = caudal másico (kg/h)
- $c$  = calor específico del agua (kJ/kg $^{\circ}\text{C}$ )
- $\Delta T$  = salto térmico ( $^{\circ}\text{C}$ )

#### **2.1.14. Fundamentos de la climatización**

La climatización se define como el conjunto de técnicas y sistemas utilizados para controlar las condiciones térmicas, de humedad y calidad del aire en espacios interiores, con el fin de garantizar el confort y la salud de los ocupantes. En zonas con climas fríos prolongados, como ocurre en diversas regiones altoandinas del Perú, la climatización por calefacción adquiere un rol fundamental para reducir riesgos de enfermedades respiratorias y mejorar la productividad en el entorno doméstico.

El confort térmico, según la norma ASHRAE Standard 55 (2020), es la “condición de la mente que expresa satisfacción con el ambiente térmico”. Este se logra cuando la temperatura operativa interior se mantiene dentro del rango de 20–24  $^{\circ}\text{C}$  durante

el invierno, con una humedad relativa entre el 40 y el 60 %. Para alcanzar dichos valores, es necesario contar con un sistema de climatización que no solo entregue calor, sino que lo haga de forma distribuida y continua.

Los métodos tradicionales de calefacción en el Perú, como estufas eléctricas, radiadores o calentadores a gas, suelen funcionar por convección, generando un gradiente de temperatura entre la parte superior y la inferior del ambiente. Esto no solo es energéticamente ineficiente, sino que produce un nivel de confort inferior al deseado, especialmente en viviendas sin aislamiento térmico adecuado. Según Correa Sánchez (2023), estos sistemas presentan un bajo rendimiento térmico y altos costos operativos, limitando su aplicación a largo plazo en zonas de alta demanda térmica.

#### **2.1.14.1 Piso Radiantes (Principio de Funcionamiento).**

El piso radiante, también conocido como calefacción por suelo radiante, es un sistema de calefacción que utiliza tuberías de agua caliente o cables eléctricos embebidos en el subsuelo para distribuir el calor de manera uniforme por toda la superficie habitable. A diferencia de los sistemas tradicionales que dependen de radiadores o conductos de aire para calentar el aire, el piso radiante proporciona una calefacción invisible y homogénea.

El sistema opera mediante la circulación de agua caliente o electricidad a través de las tuberías o cables instalados bajo el suelo. El calor se transfiere desde las tuberías o cables al suelo, que a su vez lo irradia hacia el ambiente. La temperatura del suelo se regula mediante un termostato y un controlador que modulan el flujo de agua caliente o electricidad.

### 2.1.14.2 Componentes.

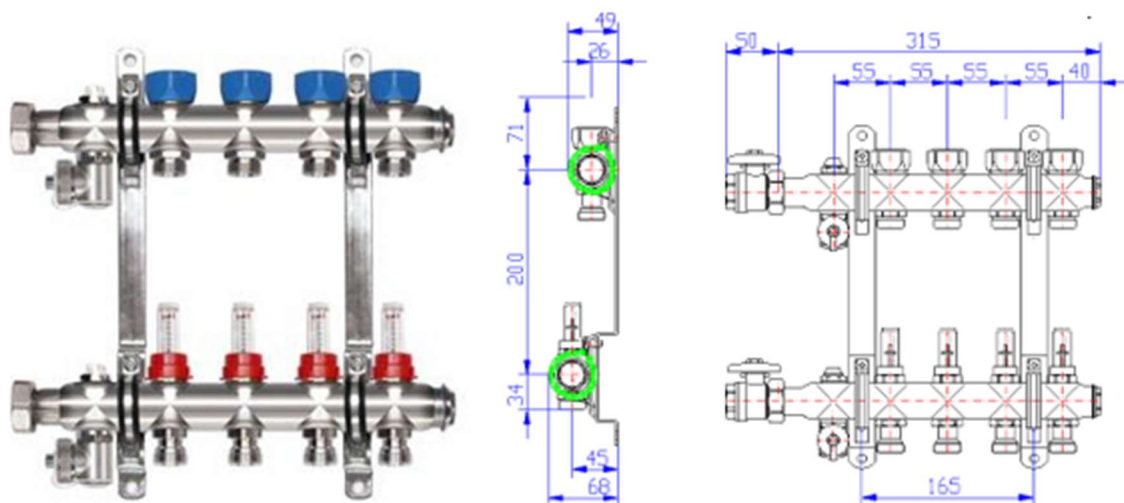
#### a) Fuente de calor:

Puede ser una caldera de gas, una bomba de calor, un sistema solar térmico o cualquier otro sistema que genere agua caliente. La selección de la fuente de calor dependerá del tamaño de la vivienda, la disponibilidad de energía en la zona y las preferencias del usuario.

#### b) Colector:

Distribuye el agua caliente desde la fuente de calor hacia las tuberías del piso radiante. El colector cuenta con varias válvulas que permiten regular el flujo de agua hacia cada circuito individual, asegurando una distribución uniforme del calor en toda la superficie del suelo.

*Figura 7: Colectores Modulares*



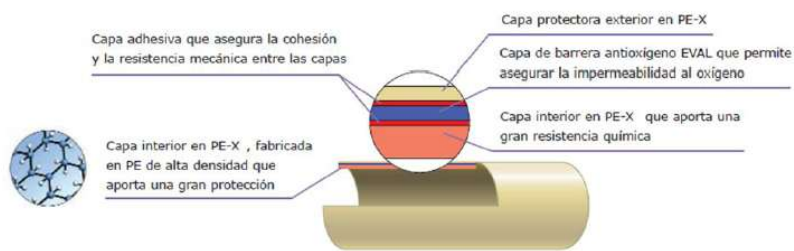
Fuente: Estándar Hidráulica. (2022) Manual técnico sistema completo de calefacción por suelo radiante., p.16.

#### c) Tuberías o cables:

Las tuberías, fabricadas de plástico o metal, se instalan en serpentín bajo el suelo, distribuyendo el calor de manera uniforme. El tipo de material, el diámetro y la

separación entre las tuberías dependerán de varios factores, como el tamaño de la vivienda, la potencia de la fuente de calor y las características del suelo. Los cables eléctricos, por otro lado, suelen ser de cobre o materiales resistentes de alta conductividad.

**Figura 8: Tubería polietileno reticulada**



Fuente: Estándar Hidráulica. (2022) Manual técnico sistema completo de calefacción por suelo radiante., p.11.

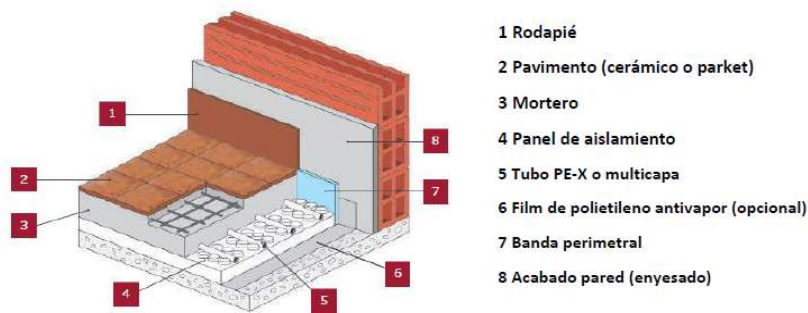
#### d) **Aislamiento térmico:**

Se coloca debajo de las tuberías o cables para evitar pérdidas de calor hacia el suelo inferior. El aislamiento térmico es crucial para la eficiencia energética del sistema, ya que reduce la cantidad de energía que se escapa hacia el exterior, optimizando el consumo y reduciendo los costos operativos.

#### e) **Revestimiento del suelo:**

Puede ser de cerámica, madera, piedra o cualquier otro material compatible con la calefacción por suelo radiante. La elección del material del revestimiento del suelo dependerá de las preferencias estéticas del usuario, las características del espacio y las propiedades de conductividad térmica del material.

**Figura 9: Revestimiento para pisos radiantes**



Fuente: Estándar Hidráulica. (2022) Manual técnico sistema completo de calefacción por suelo radiante., p.16.

#### f) **Termostato:**

Regula la temperatura del sistema en función de las preferencias del usuario. Permite establecer la temperatura deseada para cada zona del hogar, asegurando un confort personalizado y eficiente.

#### g) **Controlador:**

Modula la cantidad de agua caliente o electricidad que circula por las tuberías o cables para optimizar el consumo energético. El controlador trabaja en conjunto con el termostato para mantener la temperatura deseada en el hogar de manera eficiente, evitando el consumo excesivo de energía.

**Figura 10: Termostatos y elementos de regulación y control**



Fuente: Estándar Hidráulica. (2022) Manual técnico sistema completo de calefacción por suelo radiante., p.36.

#### h) **Elementos de control adicionales:**

Pueden incluir sensores de temperatura ambiente y temporizadores para un mayor control y eficiencia. Los sensores de temperatura ambiente permiten al sistema ajustar la producción de calor en función de la temperatura real del ambiente, mientras que los temporizadores permiten programar horarios de funcionamiento específicos.

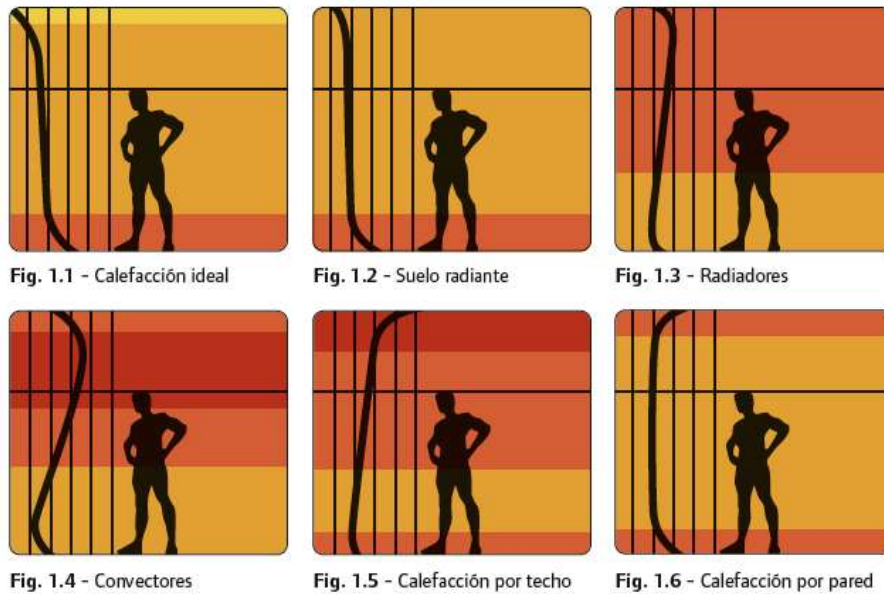
#### **2.1.15. Confort Térmico.**

El confort térmico se define como, “el estado de satisfacción mental y física que resulta de un ambiente térmico adecuado” (**ASHRAE Standard 55-2020, Thermal Environment of Buildings sección 3.1**).

Se trata de una experiencia subjetiva que depende de la percepción individual de las condiciones térmicas del ambiente. Los factores que afectan el confort térmico incluyen la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del aire, la temperatura radiante y la actividad física del individuo.

De entre todos los sistemas existentes de climatización, los sistemas radiantes son los que mejor se ajustan a la emisión óptima de calor del cuerpo humano por radiación, convección, transmisión y evaporación.

*Figura 11: Perfiles de distribución vertical de temperatura bajo distintos tipos de calefacción*



Fuente: Uponor. (2013) Manual técnico de climatización invisible., p.05.

## 2.2 MARCO CONCEPTUAL

### 2.2.1. Fuente Energética.

Una fuente energética es el origen de la energía utilizada para calentar el fluido térmico que circula por el sistema de climatización. En el contexto de esta tesis, se consideran tres fuentes principales: el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP) y la energía eléctrica. Cada una de ellas tiene ventajas y desventajas dependiendo del contexto de aplicación, disponibilidad local y estructura tarifaria del país.

El gas natural es una fuente ampliamente utilizada por su bajo costo por kilovatio-hora térmico y su disponibilidad en redes urbanas. El GLP, por su parte, es más accesible en zonas donde no existe red de gas, aunque su precio puede ser más elevado. Finalmente, la electricidad representa la opción más universal, pero también la menos eficiente en términos de conversión energética, a menos que se utilicen bombas de calor de alta eficiencia.

La selección de la fuente energética adecuada afecta directamente la eficiencia y los costos operativos del sistema. Por ello, en este trabajo se incluyen simulaciones para evaluar cómo varía el comportamiento del piso radiante al ser alimentado por cada una de estas fuentes, a fin de determinar cuál representa la opción más viable técnica y económicamente en el contexto peruano.

### **2.2.2. Simulación Computacional.**

La simulación computacional es una herramienta que permite representar el comportamiento de sistemas físicos o técnicos a través de modelos matemáticos ejecutados en una computadora. Gracias a esta técnica, es posible predecir el rendimiento de un sistema bajo distintas condiciones sin necesidad de construir un prototipo físico, lo cual reduce significativamente el tiempo y los costos del análisis.

En el ámbito de la climatización, la simulación computacional permite evaluar cómo se distribuye el calor dentro de un espacio, cuál será el consumo energético esperado, o cómo se comportará el sistema con diferentes fuentes energéticas. Esto resulta especialmente útil cuando se desea optimizar el diseño de un sistema antes de su implementación, o cuando se requiere comparar alternativas técnicas bajo criterios de eficiencia y costo.

En el presente trabajo, la simulación se ha llevado a cabo mediante un modelo desarrollado en lenguaje Python, el cual permite ingresar parámetros técnicos del sistema y obtener como resultado el flujo térmico, la carga térmica, el caudal másico y el costo estimado de operación mensual. Este enfoque computacional ha sido clave para validar la

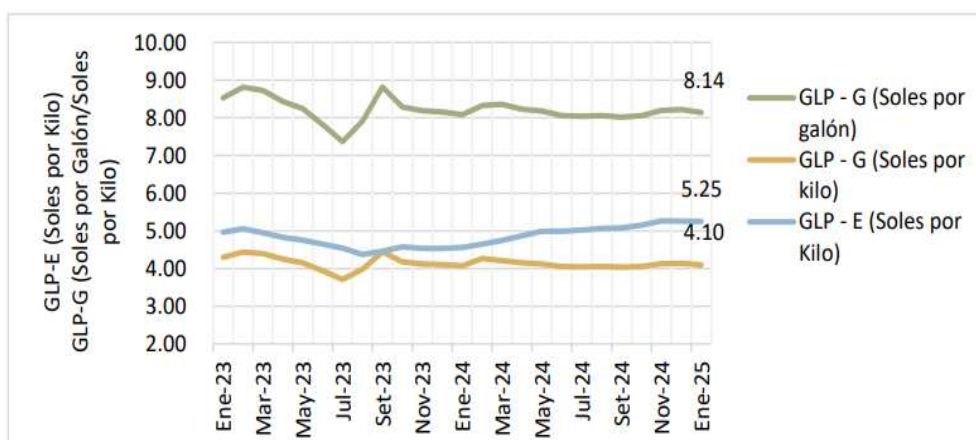
propuesta técnica sin recurrir a ensayos físicos, aprovechando las ventajas de la modelación digital en ingeniería aplicada.

### 2.2.3. Gas Licuado de Petróleo (GLP).

El Gas Licuado de Petróleo (GLP) es una mezcla de gases licuados derivados del refinamiento del petróleo crudo. Sus componentes principales son el propano y el butano, los cuales se encuentran en estado líquido cuando son almacenados bajo presión. El GLP es ampliamente utilizado como combustible doméstico, industrial y vehicular debido a su alta eficiencia energética, facilidad de transporte y bajo impacto ambiental relativo frente a otros hidrocarburos líquidos.

En el contexto de la climatización residencial, el GLP se emplea principalmente para alimentar calderas, estufas y sistemas de calefacción hidráulicos. Una de sus principales ventajas es su versatilidad: puede ser utilizado en viviendas ubicadas tanto en zonas urbanas como rurales, especialmente en lugares donde no existe red de distribución de gas natural.

**Figura 12: Evolución de precios de GLP en locales de venta**



Fuente: Reporte de precios de Combustibles OSINERGMIN.

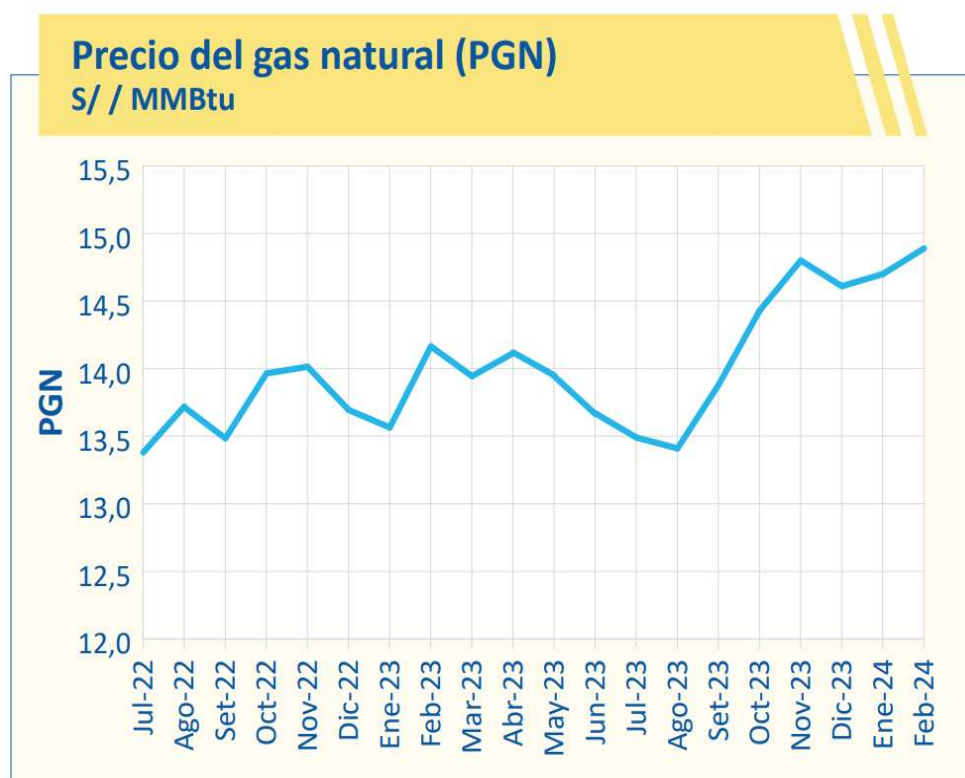
#### **2.2.4. Gas Licuado de Petróleo (GN).**

El Gas Natural (GN) es una fuente energética compuesta mayoritariamente por metano, aunque también contiene pequeñas proporciones de etano, propano y otros hidrocarburos ligeros. Se extrae de yacimientos subterráneos y es considerado uno de los combustibles fósiles más limpios, debido a su menor emisión de dióxido de carbono en comparación con otros combustibles convencionales. Su presentación en forma gaseosa y su distribución mediante redes canalizadas lo hacen muy atractivo para entornos urbanos.

El uso del gas natural en climatización ha ganado popularidad en diversos países debido a su bajo costo por unidad energética y su eficiencia térmica. En sistemas de calefacción por piso radiante, el GN alimenta calderas de condensación o intercambiadores de calor que calientan el agua del circuito hidráulico. Su regulación es automática y puede integrarse fácilmente a sistemas de control por zonas, lo que mejora tanto el confort como el rendimiento energético del sistema.

En el caso del Perú, el gas natural está disponible principalmente en Lima y algunas otras ciudades donde opera una red de distribución formal. Su inclusión como alternativa energética en esta tesis responde al interés de comparar su rendimiento frente al GLP y la electricidad. Esta comparación busca determinar cuál de estas fuentes representa la mejor opción técnica y económica para el diseño e implementación del sistema de climatización propuesto en viviendas urbanas.

*Figura 13: Precio del gas natural (PGN)*



*Fuente: Tarifas y Mercado Eléctrico boletín mensual 2024*

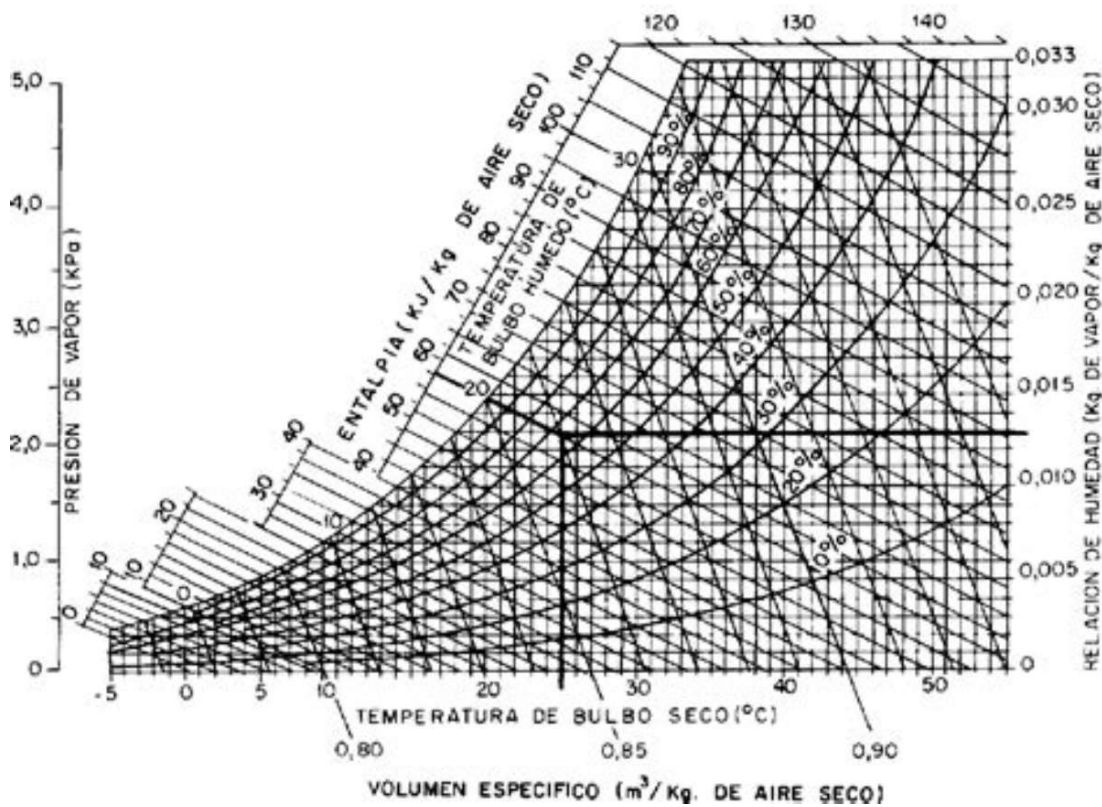
#### 2.2.5. Temperatura de Bulbo Húmedo (WBT).

La temperatura de bulbo húmedo es una medida psicrométrica que representa la temperatura más baja que puede alcanzar el aire mediante enfriamiento evaporativo a presión constante. Se obtiene al envolver un termómetro con un paño húmedo y exponerlo al flujo de aire. Su valor es siempre menor o igual al de la temperatura de bulbo seco y se acerca a este en ambientes con alta humedad relativa.

En aplicaciones de climatización, la WBT se utiliza como indicador de la capacidad del aire para absorber humedad, y tiene implicancias en el confort térmico percibido por los ocupantes. En esta investigación, aunque el sistema es radiante, la WBT se considera como parte de la validación ambiental general, ya que contribuye a evaluar condiciones interiores en combinación con la humedad relativa.

Este concepto se integra como variable de salida en el modelo computacional, facilitando la comparación entre diferentes escenarios y la anticipación de fenómenos como condensación o sobrecalentamiento en ambientes húmedos.

Figura 14: Carta Psicométrica



Fuente: Diagrama psicométrica de dominio público.

### **2.2.6. Rugosidad de la Tubería.**

La rugosidad de una tubería es una propiedad física que describe el grado de irregularidad o aspereza de su superficie interior. Este parámetro, generalmente expresado en metros (m), influye directamente en el comportamiento hidráulico del fluido que circula por su interior, ya que afecta la fricción entre el fluido y las paredes de la tubería, generando pérdidas de presión.

En sistemas hidráulicos cerrados como los utilizados en la climatización por piso radiante, la rugosidad cobra especial importancia, ya que afecta la determinación del régimen de flujo y el cálculo del factor de fricción. Valores más altos de rugosidad aumentan la resistencia al paso del agua, lo que puede requerir mayor potencia de bombeo o una redistribución del diseño del circuito. Por el contrario, tuberías con rugosidades muy bajas —como las de polietileno reticulado (PE-X)— permiten un flujo más suave, minimizando pérdidas y aumentando la eficiencia energética del sistema.

### **2.2.7. Costo Energético.**

El costo energético es una magnitud económica que representa el valor monetario asociado al consumo de energía requerido por un sistema para operar durante un determinado periodo de tiempo. Se expresa comúnmente en unidades monetarias por kilovatio-hora (S/. / kWh en el caso peruano) y depende de la fuente energética utilizada, la tarifa aplicada por el proveedor y la eficiencia del sistema que la consume.

En el contexto de este trabajo de suficiencia profesional, el costo energético se convierte en un criterio esencial para comparar la viabilidad de utilizar diferentes fuentes de energía para alimentar un sistema de climatización por piso radiante: gas natural (GN), gas licuado de petróleo (GLP) y electricidad. Cada una de estas fuentes presenta precios, accesibilidad y rendimientos distintos, lo cual influye directamente en el gasto mensual y en la sostenibilidad del proyecto. Por ejemplo, aunque la electricidad tiene mayor disponibilidad, su precio por kWh es significativamente más alto que el del gas natural, lo cual puede hacerla menos atractiva para calefacción en climas fríos.

## **CAPITULO III:**

### **DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACION**

#### **3.1 DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA PROPUESTO**

El presente trabajo de investigación propone el diseño y validación de un sistema de climatización por piso radiante, alimentado por fuentes energéticas convencionales como el GLP, el gas natural o la electricidad. Este sistema está orientado a resolver una problemática común en viviendas peruanas ubicadas en zonas urbanas con condiciones climáticas templadas o frías, especialmente durante los meses de invierno, cuando el confort térmico interior se ve comprometido por la falta de calefacción eficiente.

El sistema propuesto se basa en el uso de una red de tuberías hidráulicas embebidas en el suelo, por donde circula agua caliente a una temperatura controlada. El

calor contenido en el agua se transfiere al recubrimiento del suelo y de ahí se irradia hacia el ambiente, generando una distribución térmica vertical uniforme que prioriza el confort fisiológico de los ocupantes. Este principio de funcionamiento difiere de los sistemas de calefacción convencionales por convección, como los radiadores o estufas eléctricas, que tienden a acumular calor en la parte superior del recinto y dejan zonas frías a nivel del suelo.

La investigación considera tres escenarios típicos de vivienda: de 40 m<sup>2</sup>, 60 m<sup>2</sup> y 100 m<sup>2</sup>, representativos del sector residencial en zonas urbanas del Perú. El sistema ha sido modelado computacionalmente para cada una de estas configuraciones, utilizando parámetros reales de temperatura ambiente exterior, aislamiento térmico, fuentes energéticas y requerimientos de confort definidos por la norma ASHRAE 55. El objetivo final es determinar la viabilidad técnica, económica y energética de implementar este sistema en el contexto nacional, comparando el rendimiento de las distintas fuentes de energía disponibles y evaluando su impacto en la eficiencia y el costo operativo.

### **3.2 PARAMETROS DE DISEÑO**

Para el diseño eficiente de un sistema de climatización por piso radiante, es fundamental establecer de forma precisa los parámetros técnicos y operativos que condicionan su desempeño térmico e hidráulico. En esta sección se definen los valores de entrada asumidos para la simulación computacional, así como las condiciones de contorno y criterios normativos que guían el diseño del sistema en contextos residenciales peruanos.

Se ha considerado como base una temperatura ambiente constante de 20 °C, correspondiente al promedio registrado en zonas urbanas de Lima durante temporadas templadas. Esta temperatura sirve como referencia para el cálculo del flujo térmico necesario

para alcanzar el confort térmico interior. Para evaluar distintos niveles de rendimiento, se han simulado tres escenarios con temperaturas superficiales de 24 °C, 26 °C y 28 °C. Estos valores representan configuraciones realistas que no comprometen el confort ni exceden los límites normativos de seguridad térmica definidos en la norma UNE-EN 1264.

Las áreas de análisis seleccionadas fueron de 40, 60, 80, 100 y 120 m<sup>2</sup>, correspondientes a viviendas unifamiliares de una sola planta. En todos los casos, se asumió una altura libre de 2.6 m y una única zona térmica. El salto térmico ( $\Delta T$ ) entre la impulsión y el retorno fue de 7 °C, valor que se encuentra dentro del rango ideal para sistemas radiantes, permitiendo un equilibrio entre eficiencia energética y uniformidad térmica. Para representar un diseño hidráulico técnicamente viable, se estableció un paso de tubería de 15 cm (0.15 m), lo que garantiza una distribución uniforme del calor sin generar zonas frías entre tubos.

El modelo computacional considera una tubería de polietileno reticulado (PE-X) con un diámetro interior de 20 mm, una longitud promedio por circuito calculada en función del área calefaccionada, y colectores ubicados a 10 metros del inicio del circuito. Para garantizar condiciones térmicas realistas, se asumió un piso con revestimiento cerámico, con resistencia térmica superficial ( $R_o$ ) de 0.10 m<sup>2</sup>·K/W, y una base con aislamiento térmico moderado ( $R_u = 0.30$  m<sup>2</sup>·K/W), que representa el uso de paneles de poliestireno extruido o expandido bajo la losa.

Todos estos parámetros fueron ingresados en el software desarrollado en Python, el cual automatiza los cálculos de flujo térmico, carga térmica, velocidad del agua, número de Reynolds, factor de fricción, longitud total de tubería, y pérdida de carga. Asimismo, se calcularon los costos energéticos mensuales estimados en base al consumo anual, considerando tres fuentes energéticas: electricidad (S/. 0.68/kWh), gas natural (S/.

0.11/kWh) y GLP (S/. 0.38/kWh). Estos costos fueron evaluados para cada escenario simulado, permitiendo identificar cuál de las fuentes resulta más eficiente económicamente según el tamaño del recinto y la temperatura superficial deseada.

**Tabla 2:** Parámetros recomendados según UNE-EN 1264-4

| Parámetro                                | Valor recomendado                |
|------------------------------------------|----------------------------------|
| Diámetro exterior típico                 | 16 mm / 17 mm                    |
| Diámetro interior típico                 | 12–13 mm                         |
| Longitud máxima de circuito              | 120 metros                       |
| Caudal máximo por circuito               | 250 kg/h ( $\approx 0.07$ l/s)   |
| Pérdida de presión máxima por circuito   | 200–250 mbar                     |
| Separación entre tuberías (paso)         | 100–300 mm (recomendado: 150 mm) |
| Temperatura máxima de impulsión          | 55 °C                            |
| Salto térmico recomendado ( $\Delta T$ ) | 5–10 °C                          |

**Fuente:** Elaboración Propia

**Tabla 3:** Parámetros recomendados por UPONOR (2017)

| Parámetro        | Valor recomendado |
|------------------|-------------------|
| Tubería estándar | PE-Xa 16 × 2 mm   |

|                                                          |                                     |
|----------------------------------------------------------|-------------------------------------|
| Caudal máximo con $\Delta T = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ | 150–300 kg/h (según largo circuito) |
| Longitud ideal de circuito                               | 80–100 metros                       |
| Longitud máxima con válvula de equilibrio                | 120 metros                          |
| Separación de tubería (paso)                             | 150 mm (estándar residencial)       |
| Velocidad máx. del fluido recomendada                    | 0.3–0.5 m/s                         |
| Presión máxima recomendada en circuito                   | 250 mbar                            |

**Fuente:** Elaboración Propia

**Tabla 4:** Parámetros recomendados Estándar Hidráulica (Manual 2022)

| Parámetro                                | Valor según catálogo técnico        |
|------------------------------------------|-------------------------------------|
| Tubería utilizada                        | Polietileno reticulado (16 × 2 mm)  |
| Longitud máxima recomendada por circuito | 100–120 metros                      |
| Caudal típico por circuito               | 200–280 litros/hora                 |
| Separación mínima recomendada            | 100 mm                              |
| Separación típica en vivienda            | 150 mm                              |
| Temperatura máxima de superficie         | 29 °C (zonas de ocupación continua) |
| Pérdida de presión admisible             | ≤ 200 mbar                          |

**Fuente:** Elaboración Propia

### 3.3 CALCULO DEL FLUJO TERMICO Y CARGA TERMICA

En el diseño de sistemas de climatización por piso radiante, la determinación precisa del flujo térmico y la carga térmica total del recinto constituye el punto de partida para cualquier cálculo posterior. Estas magnitudes permiten establecer no solo la potencia que debe generar la fuente térmica, sino también el volumen de fluido caloportador necesario, el tipo de red hidráulica a emplear y el régimen de funcionamiento esperado del sistema. A lo

largo de esta sección se desarrollan las fórmulas utilizadas, los escenarios planteados, y las implicancias que tienen los valores obtenidos en el diseño completo del sistema.

El flujo térmico superficial se estima mediante una relación empírica derivada del comportamiento de los sistemas de calefacción radiante, validada por estudios europeos y considerada una referencia en proyectos residenciales:

$$q = 8.92 \times (T_s - T_a)^{1.1}$$

Donde:

- $q$  : Flujo térmico en  $\text{W/m}^2$
- $T_s$  : Temperatura superficial del piso ( $^{\circ}\text{C}$ )
- $T_a$  : Temperatura ambiente interior ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Para esta tesis se ha considerado una temperatura ambiente estándar de  $20^{\circ}\text{C}$ . Con ello, se analizaron tres temperaturas superficiales representativas del piso radiante ( $24^{\circ}\text{C}$ ,  $26^{\circ}\text{C}$  y  $28^{\circ}\text{C}$ ), las cuales aseguran confort térmico sin transgredir los márgenes establecidos por la norma UNE-EN 1264 para áreas de ocupación prolongada ( $29^{\circ}\text{C}$  como máximo en zonas de confort). Los resultados del flujo térmico obtenido para cada temperatura fueron los siguientes:

- $T_s = 24^{\circ}\text{C} \rightarrow q \approx 57.17 \text{ W/m}^2$
- $T_s = 26^{\circ}\text{C} \rightarrow q \approx 70.93 \text{ W/m}^2$
- $T_s = 28^{\circ}\text{C} \rightarrow q \approx 87.85 \text{ W/m}^2$

La carga térmica total ( $Q$ ) se calcula como el producto del flujo térmico ( $q$ ) por el área calefaccionada ( $A$ ):

$$Q = q \times A$$

Donde:

- $Q$  : Carga térmica total en W
- $A$  : Área del recinto calefaccionado ( $m^2$ )

Se han considerado áreas típicas de vivienda de 40, 60, 80, 100 y 120  $m^2$  para representar distintos escenarios. A continuación, se muestran ejemplos de cargas térmicas estimadas para diferentes combinaciones de superficie y temperatura superficial:

- $A = 40 \text{ m}^2$ ,  $T_s = 24 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow Q = 57.17 \times 40 \approx 2,286.8 \text{ W}$
- $A = 60 \text{ m}^2$ ,  $T_s = 26 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow Q = 70.93 \times 60 \approx 4,255.8 \text{ W}$
- $A = 100 \text{ m}^2$ ,  $T_s = 28 \text{ }^\circ\text{C} \rightarrow Q = 87.85 \times 100 \approx 8,785 \text{ W}$

Estos valores de carga térmica son fundamentales para elegir adecuadamente la fuente térmica (caldera, bomba de calor, etc.), así como para dimensionar el caudal de agua caliente que deberá circular por las tuberías. Una subestimación del flujo térmico resultaría en insuficiencia térmica y mal confort, mientras que una sobreestimación provocaría sobredimensionamiento del equipo, mayor consumo energético y costos innecesarios.

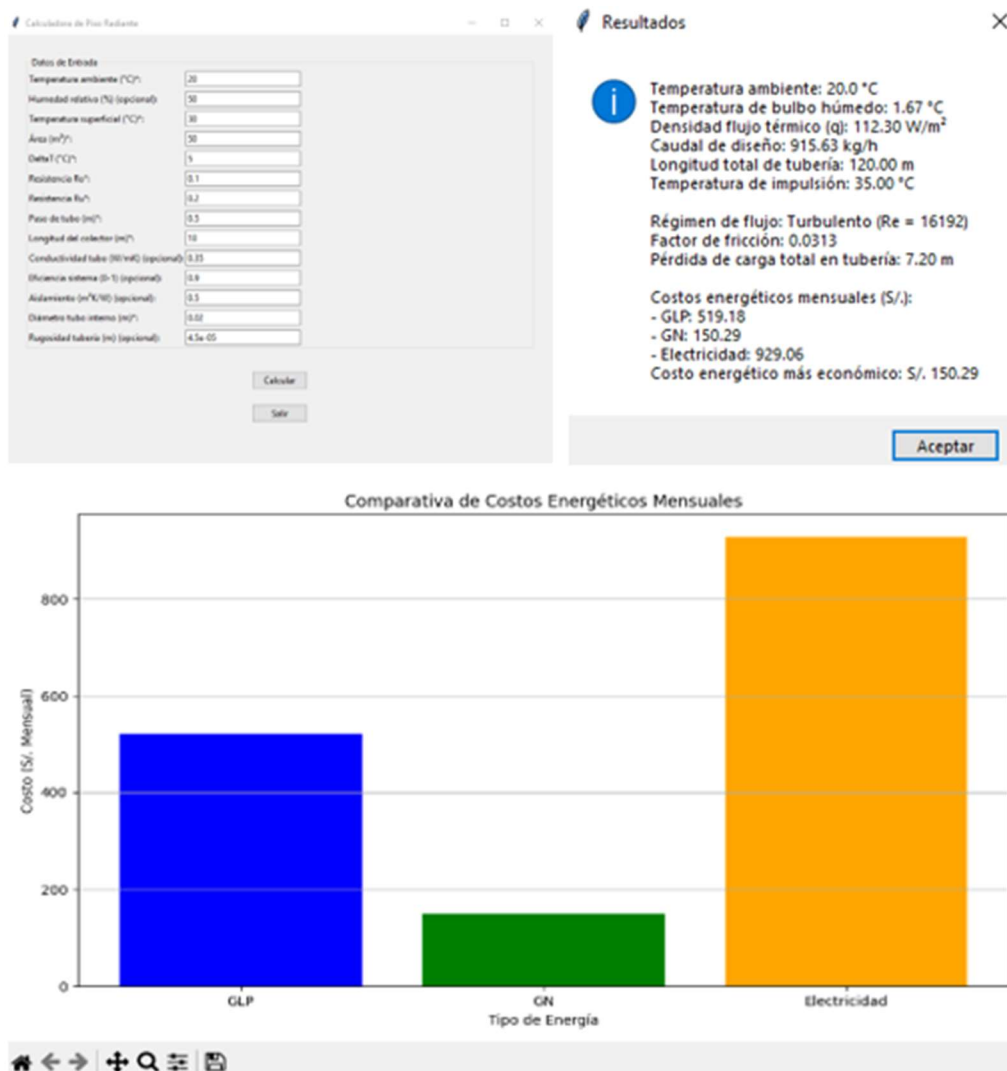
Además, el cálculo de  $Q$  es insumo directo para las siguientes etapas de dimensionamiento del sistema: cálculo del caudal másico, estimación de velocidad del agua en la red, determinación del régimen de flujo, y finalmente, cálculo de la pérdida de carga. El modelo computacional desarrollado en Python automatiza estos procesos a partir de la carga térmica y permite simular escenarios en tiempo real, ofreciendo al usuario no solo resultados numéricos, sino recomendaciones prácticas según los límites técnicos del sistema hidráulico.

Tabla 5: Simulación de valores de  $q$  y  $Q$  para cada combinación de superficies y temperaturas

| Área (m²) | Temp. ambiente (°C) | Temp. superficial (°C) | DeltaT (°C) | Ro (m²·K/W) | Ru (m²·K/W) | Longitud colector (m) | Longitud total tubería (m) | Flujo térmico (q) [W/m²] | Carga térmica (Q) [W] |
|-----------|---------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|
| 40        | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 286.67                     | 40.99                    | 1639.42               |
| 40        | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 286.67                     | 64.02                    | 2560.89               |
| 40        | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 286.67                     | 87.85                    | 3514.18               |
| 60        | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 420                        | 40.99                    | 2459.13               |
| 60        | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 420                        | 64.02                    | 3841.34               |
| 60        | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 420                        | 87.85                    | 5271.27               |
| 80        | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 553.33                     | 40.99                    | 3278.84               |
| 80        | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 553.33                     | 64.02                    | 5121.78               |
| 80        | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 553.33                     | 87.85                    | 7028.36               |
| 100       | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 686.67                     | 40.99                    | 4098.56               |
| 100       | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 686.67                     | 64.02                    | 6402.23               |
| 100       | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 686.67                     | 87.85                    | 8785.45               |
| 120       | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 820                        | 40.99                    | 4918.27               |
| 120       | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 820                        | 64.02                    | 7682.68               |
| 120       | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | 10                    | 820                        | 87.85                    | 10542.54              |

Fuente: Elaboración Propia

**Figura 15: Capturas de Software**



Fuente: Elaboración Propia

### 3.4 CALCULO DEL CAUDAL MASICO Y PARAMETROS HIDRAULICOS

Una vez determinada la carga térmica del recinto, el siguiente paso en el diseño del sistema de climatización por piso radiante consiste en calcular el caudal másico del fluido caloportador, así como otros parámetros hidráulicos fundamentales que definen el comportamiento dinámico del sistema. Estos incluyen la velocidad del fluido, el régimen de flujo (laminar o turbulento), el número de Reynolds, el factor de fricción y la pérdida de carga

total del circuito. Todos estos valores están interrelacionados y condicionan tanto el diseño de la red como la selección de la bomba circuladora.

El caudal másico se calcula mediante la fórmula energética derivada de la conservación de energía, considerando el calor requerido (carga térmica) y el salto térmico ( $\Delta T$ ) entre la impulsión y el retorno:

$$\dot{m} = Q / (c \times \Delta T)$$

Donde:

- $\dot{m}$ : caudal másico (kg/s)
- Q: carga térmica total (W)
- c: calor específico del agua (4186 J/kg°C)
- $\Delta T$ : salto térmico entre impulsión y retorno (°C)

A partir de los valores de carga térmica previamente calculados, y considerando un  $\Delta T$  de 7 °C, se obtuvieron caudales másicos que oscilan entre 350 y 700 kg/h según el tamaño del recinto y la temperatura superficial del suelo. Por ejemplo, para un recinto de 60 m<sup>2</sup> con  $T_s = 26$  °C, se tiene  $Q \approx 4,255$  W, lo que implica:

$$\dot{m} = 4255 / (4186 \times 7) \approx 0.145 \text{ kg/s} \rightarrow \dot{m} \approx 522.6 \text{ kg/h}$$

Con este caudal y conociendo el diámetro interior de la tubería (20 mm), se procede al cálculo de la velocidad media del fluido dentro de la red:

$$v = \dot{m} / (\rho \times A)$$

Donde:

- v: velocidad del agua (m/s)
- $\rho$ : densidad del agua (1000 kg/m<sup>3</sup>)
- A: área de la sección transversal del tubo

$$A = \pi \times (D / 2)^2$$

Una velocidad típica calculada para este escenario fue de 0.37 m/s, valor que se encuentra dentro del rango ideal (0.2–0.5 m/s) para minimizar tanto la pérdida de presión como el riesgo de ruido hidráulico o erosión interna. Posteriormente, se determinó el régimen del flujo mediante el cálculo del número de Reynolds:

$$Re = (\rho \times v \times D) / \mu$$

Donde:

$\mu$  : viscosidad dinámica del agua (~0.001 Pa·s)

Para el mismo ejemplo, se obtiene  $Re \approx 7414$ , lo cual indica un régimen claramente turbulento. Este tipo de flujo, aunque incrementa la pérdida de carga, mejora significativamente la transferencia de calor, siendo ideal para el funcionamiento eficiente de sistemas de climatización por superficie.

A partir del número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería, se calculó el factor de fricción mediante la ecuación de Colebrook-White, utilizando un proceso iterativo. Este factor se emplea en la ecuación de Darcy-Weisbach para estimar la pérdida de carga:

$$hf = f \times (L / D) \times (v^2 / 2g)$$

Donde:

- Hf: es la pérdida de carga en metros de columna de agua (m.c.a),
- L: es la longitud del circuito, g es la gravedad (9.81 m/s<sup>2</sup>), y f es el factor de fricción.

Tabla 6 Parámetros Hidráulicos

| Área (m <sup>2</sup> ) | Temp. ambiente (°C) | Temp. superficial (°C) | Caudal másico (kg/h) | Velocidad (m/s) | Reynolds | Régimen    | Factor de fricción (f) | Pérdida carga total (m.c.a) |
|------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|-----------------|----------|------------|------------------------|-----------------------------|
| 40                     | 20                  | 24                     | 199.82               | 0.1767          | 3534     | Turbulento | 0.0435                 | 1.14                        |
| 40                     | 20                  | 26                     | 308.17               | 0.2725          | 5450     | Turbulento | 0.039                  | 2.43                        |
| 40                     | 20                  | 28                     | 419.25               | 0.3707          | 7414     | Turbulento | 0.0363                 | 4.2                         |
| 60                     | 20                  | 24                     | 299.72               | 0.265           | 5300     | Turbulento | 0.0393                 | 3.39                        |
| 60                     | 20                  | 26                     | 462.26               | 0.4087          | 8175     | Turbulento | 0.0356                 | 7.32                        |
| 60                     | 20                  | 28                     | 628.88               | 0.5561          | 11121    | Turbulento | 0.0334                 | 12.72                       |
| 80                     | 20                  | 24                     | 399.63               | 0.3534          | 7067     | Turbulento | 0.0367                 | 7.44                        |
| 80                     | 20                  | 26                     | 616.35               | 0.545           | 10899    | Turbulento | 0.0336                 | 16.16                       |
| 80                     | 20                  | 28                     | 838.51               | 0.7414          | 14828    | Turbulento | 0.0317                 | 28.28                       |
| 100                    | 20                  | 24                     | 499.54               | 0.4417          | 8834     | Turbulento | 0.035                  | 13.74                       |
| 100                    | 20                  | 26                     | 770.43               | 0.6812          | 13624    | Turbulento | 0.0322                 | 30.07                       |
| 100                    | 20                  | 28                     | 1048.13              | 0.9268          | 18535    | Turbulento | 0.0306                 | 52.85                       |
| 120                    | 20                  | 24                     | 599.45               | 0.53            | 10601    | Turbulento | 0.0337                 | 22.78                       |
| 120                    | 20                  | 26                     | 924.52               | 0.8175          | 16349    | Turbulento | 0.0312                 | 50.11                       |
| 120                    | 20                  | 28                     | 1257.76              | 1.1121          | 22242    | Turbulento | 0.0298                 | 88.42                       |

Fuente: Elaboración Propia

### 3.5 EVALUACION ECONOMICA Y VALIDACION DEL SISTEMA PROPUESTO

Una vez determinado los parámetros de temperaturas e hidráulicos del sistema de piso radiante, se procede a la etapa de validación económica. Este análisis tiene como objetivo determinar la viabilidad financiera del sistema propuesto considerando distintas fuentes energéticas, los consumos esperados y el costo proyectado de operación mensual.

Los consumos energéticos fueron calculados en función del flujo térmico (q), del área calefaccionada y de un tiempo promedio de operación de 8 horas diarias durante todo el año. Con estos datos, se estimó el consumo energético anual (en kWh) y se multiplicó por el precio unitario de cada fuente energética para obtener un costo mensual estimado. Los precios considerados fueron:

- Electricidad: S/. 0.68 / kWh
- Gas Natural (GN): S/. 0.11 / kWh

- Gas Licuado de Petróleo (GLP): S/. 0.38 / kWh

Los resultados muestran que, en todos los escenarios simulados, el **gas natural** representa la fuente más económica, seguido del **GLP**, mientras que la **electricidad**, pese a su disponibilidad, resulta significativamente más costosa. Por ejemplo, para un sistema operando en una vivienda de 60 m<sup>2</sup> a 26 °C, el costo mensual estimado de operación fue de:

- GLP: S/. 282.91
- GN: S/. 81.89
- Electricidad: S/. 506.54

Estos valores permiten seleccionar la fuente de energía para la climatización. Además, refuerzan la necesidad de contar con un modelo computacional como el desarrollado, que automatiza el análisis económico al mismo tiempo que evalúa el comportamiento técnico del sistema.

**Tabla 7:** Tabla comparativa de Costos Energéticos

| Área (m <sup>2</sup> ) | Temp. ambiente (°C) | Temp. superficial (°C) | Caudal másico (kg/h) | Reynolds | Factor de fricción (f) | Pérdida carga total (m.c.a) | Costo GLP (S/.) | Costo GN (S/.) | Costo Electricidad (S/.) |
|------------------------|---------------------|------------------------|----------------------|----------|------------------------|-----------------------------|-----------------|----------------|--------------------------|
| 40                     | 20                  | 24                     | 199.82               | 3534     | 0.0435                 | 1.14                        | 151.59          | 43.88          | 271.27                   |
| 40                     | 20                  | 26                     | 308.17               | 5450     | 0.039                  | 2.43                        | 236.8           | 68.55          | 423.74                   |
| 40                     | 20                  | 28                     | 419.25               | 7414     | 0.0363                 | 4.2                         | 324.94          | 94.06          | 581.48                   |
| 60                     | 20                  | 24                     | 299.72               | 5300     | 0.0393                 | 3.39                        | 227.39          | 65.82          | 406.9                    |
| 60                     | 20                  | 26                     | 462.26               | 8175     | 0.0356                 | 7.32                        | 355.2           | 102.82         | 635.61                   |
| 60                     | 20                  | 28                     | 628.88               | 11121    | 0.0334                 | 12.72                       | 487.42          | 141.09         | 872.22                   |
| 80                     | 20                  | 24                     | 399.63               | 7067     | 0.0367                 | 7.44                        | 303.18          | 87.76          | 542.54                   |
| 80                     | 20                  | 26                     | 616.35               | 10899    | 0.0336                 | 16.16                       | 473.59          | 137.09         | 847.48                   |
| 80                     | 20                  | 28                     | 838.51               | 14828    | 0.0317                 | 28.28                       | 649.89          | 188.13         | 1162.96                  |
| 100                    | 20                  | 24                     | 499.54               | 8834     | 0.035                  | 13.74                       | 378.98          | 109.7          | 678.17                   |
| 100                    | 20                  | 26                     | 770.43               | 13624    | 0.0322                 | 30.07                       | 591.99          | 171.37         | 1059.36                  |
| 100                    | 20                  | 28                     | 1048.13              | 18535    | 0.0306                 | 52.85                       | 812.36          | 235.16         | 1453.7                   |
| 120                    | 20                  | 24                     | 599.45               | 10601    | 0.0337                 | 22.78                       | 454.78          | 131.65         | 813.81                   |
| 120                    | 20                  | 26                     | 924.52               | 16349    | 0.0312                 | 50.11                       | 710.39          | 205.64         | 1271.23                  |
| 120                    | 20                  | 28                     | 1257.76              | 22242    | 0.0298                 | 88.42                       | 974.83          | 282.19         | 1744.44                  |

**Fuente:** Elaboración Propia

## **CAPITULO IV:**

### **RESULTADOS, CONTRASTE DE HIPOTESIS Y DISCUSION DE RESULTADOS**

#### **4.1 PRESENTACION DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS**

En esta sección se presentan los resultados técnicos obtenidos a partir del desarrollo y ejecución del programa diseñado para la evaluación de un sistema de climatización por piso radiante. El programa fue construido utilizando Python con una interfaz gráfica que permite la interacción directa del usuario para el ingreso de datos técnicos, visualización de resultados y generación de análisis comparativos.

El objetivo principal del software es automatizar los cálculos térmicos e hidráulicos requeridos para diseñar y validar un sistema de calefacción radiante utilizando gas natural (GN), gas licuado de petróleo (GLP) o electricidad como fuentes de energía. Entre las variables de entrada consideradas destacan: temperatura ambiente, temperatura superficial deseada del piso, área total a calefaccionar, resistencia térmica de los materiales, características del aislamiento, diámetro y rugosidad de la tubería, así como eficiencia y conductividad térmica del sistema.

El programa calcula, a partir de estos datos, una serie de resultados críticos para el diseño del sistema, tales como:

- Flujo térmico superficial ( $\text{W/m}^2$ )
- Carga térmica total (W)
- Caudal másico requerido (kg/h)
- Velocidad del fluido dentro de la red (m/s)

- Número de Reynolds y tipo de régimen de flujo (laminar o turbulento)
- Factor de fricción y pérdida de carga (m.c.a.)
- Consumo energético anual estimado (kWh/año)
- Costos mensuales proyectados según la fuente de energía empleada

Para realizar el análisis, se definieron tres temperaturas superficiales: 24 °C, 26 °C y 28 °C, manteniendo constante una temperatura ambiente de 20 °C. Las áreas calefaccionadas evaluadas fueron de 40, 60, 80, 100 y 120 m<sup>2</sup>, representando configuraciones residenciales frecuentes en viviendas unifamiliares. Cada combinación fue simulada y evaluada individualmente para determinar el comportamiento térmico del sistema y su respuesta hidráulica, garantizando que los resultados estén alineados con las exigencias establecidas por la normativa europea UNE-EN 1264.

Los valores de flujo térmico calculados aumentan exponencialmente con la temperatura superficial. Por ejemplo, para  $T_s = 24\text{ °C}$  se obtuvo un flujo de 57.17 W/m<sup>2</sup>, mientras que para  $T_s = 28\text{ °C}$  el valor ascendió a 87.85 W/m<sup>2</sup>. Estos resultados tienen un impacto directo sobre la carga térmica total y el caudal másico requerido, así como en la longitud de tubería necesaria y la presión que deberá vencer la bomba circuladora.

Asimismo, se realizó el cálculo del número de Reynolds para determinar el régimen de flujo. En la mayoría de los escenarios, el flujo resultó ser turbulento, con valores promedio de  $Re$  entre 7000 y 11000, lo cual mejora la transferencia de calor pero también exige un diseño hidráulico que limite las pérdidas de presión. El programa calcula automáticamente el factor de fricción mediante la ecuación de Colebrook-White.

En términos económicos, los resultados reflejan que el uso de gas natural permite obtener costos de operación significativamente menores en comparación con GLP y electricidad.

Por ejemplo, en una vivienda de 60 m<sup>2</sup> con  $T_s = 26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , el costo mensual estimado fue de S/. 81.89 para GN, frente a S/. 282.91 para GLP y S/. 506.54 para electricidad. Esto confirma la superioridad económica del uso de GN, reforzando su viabilidad como fuente energética en contextos urbanos donde está disponible.

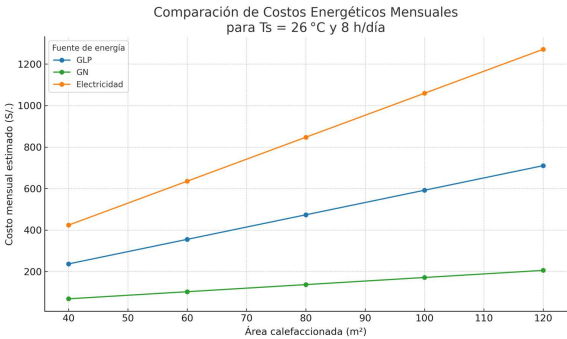
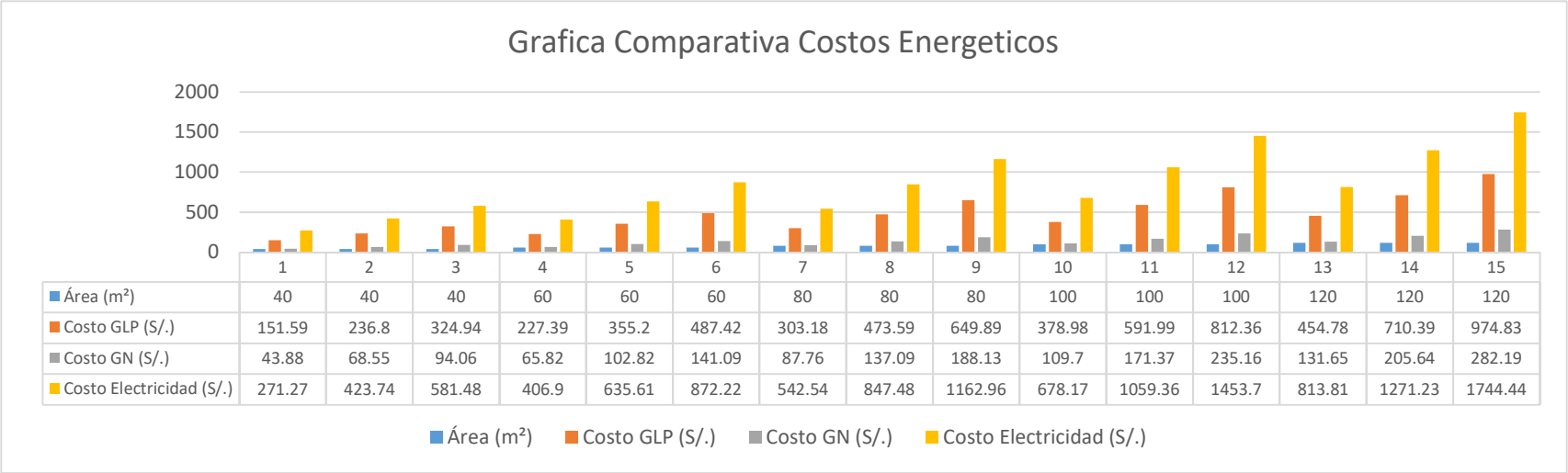
En conjunto, los resultados presentados validan la funcionalidad técnica y operativa del programa desarrollado. La herramienta se comporta como un sistema experto capaz de guiar el diseño de una instalación térmica eficiente, automatizando cálculos complejos y ofreciendo información clave para la toma de decisiones.

**Tabla 8** Resultados de Simulación Computacional en Python

| Área (m²) | Temp. ambiente (°C) | Temp. superficial (°C) | DeltaT (°C) | Ro (m²·K/W) | Ru (m²·K/W) | Nivel de aislamiento | Material de piso | Diámetro interior (m) | Paso de tubo (m) | Longitud colector (m) | Longitud total tubería (m) | Flujo térmico (q) [W/m²] | Carga térmica (Q) [W] | Caudal másico (kg/h) | Velocidad (m/s) | Reynolds | Régimen    | Factor de fricción (f) | Pérdida carga total (m.c.a) | Costo GLP (\$/.) | Costo GN (\$/.) | Costo Electricidad (\$/.) |
|-----------|---------------------|------------------------|-------------|-------------|-------------|----------------------|------------------|-----------------------|------------------|-----------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------|----------|------------|------------------------|-----------------------------|------------------|-----------------|---------------------------|
| 40        | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 286.67                     | 40.99                    | 1639.42               | 199.82               | 0.1767          | 3534     | Turbulento | 0.0435                 | 1.14                        | 151.59           | 43.88           | 271.27                    |
| 40        | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 286.67                     | 64.02                    | 2560.89               | 308.17               | 0.2725          | 5450     | Turbulento | 0.039                  | 2.43                        | 236.8            | 68.55           | 423.74                    |
| 40        | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 286.67                     | 87.85                    | 3514.18               | 419.25               | 0.3707          | 7414     | Turbulento | 0.0363                 | 4.2                         | 324.94           | 94.06           | 581.48                    |
| 60        | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 420                        | 40.99                    | 2459.13               | 299.72               | 0.265           | 5300     | Turbulento | 0.0393                 | 3.39                        | 227.39           | 65.82           | 406.9                     |
| 60        | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 420                        | 64.02                    | 3841.34               | 462.26               | 0.4087          | 8175     | Turbulento | 0.0356                 | 7.32                        | 355.2            | 102.82          | 635.61                    |
| 60        | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 420                        | 87.85                    | 5271.27               | 628.88               | 0.5561          | 11121    | Turbulento | 0.0334                 | 12.72                       | 487.42           | 141.09          | 872.22                    |
| 80        | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 553.33                     | 40.99                    | 3278.84               | 399.63               | 0.3534          | 7067     | Turbulento | 0.0367                 | 7.44                        | 303.18           | 87.76           | 542.54                    |
| 80        | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 553.33                     | 64.02                    | 5121.78               | 616.35               | 0.545           | 10899    | Turbulento | 0.0336                 | 16.16                       | 473.59           | 137.09          | 847.48                    |
| 80        | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 553.33                     | 87.85                    | 7028.36               | 838.51               | 0.7414          | 14828    | Turbulento | 0.0317                 | 28.28                       | 649.89           | 188.13          | 1162.96                   |
| 100       | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 686.67                     | 40.99                    | 4098.56               | 499.54               | 0.4417          | 8834     | Turbulento | 0.035                  | 13.74                       | 378.98           | 109.7           | 678.17                    |
| 100       | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 686.67                     | 64.02                    | 6402.23               | 770.43               | 0.6812          | 13624    | Turbulento | 0.0322                 | 30.07                       | 591.99           | 171.37          | 1059.36                   |
| 100       | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 686.67                     | 87.85                    | 8785.45               | 1048.13              | 0.9268          | 18535    | Turbulento | 0.0306                 | 52.85                       | 812.36           | 235.16          | 1453.7                    |
| 120       | 20                  | 24                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 820                        | 40.99                    | 4918.27               | 599.45               | 0.53            | 10601    | Turbulento | 0.0337                 | 22.78                       | 454.78           | 131.65          | 813.81                    |
| 120       | 20                  | 26                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 820                        | 64.02                    | 7682.68               | 924.52               | 0.8175          | 16349    | Turbulento | 0.0312                 | 50.11                       | 710.39           | 205.64          | 1271.23                   |
| 120       | 20                  | 28                     | 7           | 0.1         | 0.3         | Moderado             | Cerámico         | 0.02                  | 0.15             | 10                    | 820                        | 87.85                    | 10542.54              | 1257.76              | 1.1121          | 22242    | Turbulento | 0.0298                 | 88.42                       | 974.83           | 282.19          | 1744.44                   |

**Fuente:** Elaboración Propia

Figura 16: Comparativa Costos Energéticos



Fuente: Elaboración Propia

## 4.2 CONTRASTE DE LA HIPOTESIS

La hipótesis general planteada establece que:

- “La propuesta de un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas permite la optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN”.

Los resultados obtenidos a través del programa permiten validar esta afirmación. El modelo desarrollado, al aplicar criterios técnicos normativos de la UNE-EN 1264 y al automatizar los cálculos del sistema, permitió demostrar que la eficiencia energética del sistema mejora sustancialmente al utilizar gas natural o GLP frente a otras fuentes energéticas como la electricidad.

Los costos energéticos mensuales estimados para cada fuente, considerando una operación de 8 horas diarias durante todo el año, fueron significativamente más bajos para el gas natural.

En escenarios de viviendas de 60 m<sup>2</sup> a 26 °C de temperatura superficial, el gasto mensual con gas natural fue de aproximadamente S/. 81.89, en contraste con S/. 282.91 para GLP y S/. 506.54 para electricidad. Esto demuestra que el sistema es económicamente más eficiente con el uso de GN/GLP, confirmando la hipótesis general.

La primera hipótesis específica señala que:

- “La automatización de los cálculos permite realizar un análisis más rápido del consumo energético de un sistema de climatización”.

Esta afirmación se valida plenamente mediante la implementación del programa en Python, que permitió automatizar el proceso de cálculo según la fuente energética seleccionada. La herramienta no solo reduce el tiempo requerido para realizar estos cálculos manualmente, sino que también permite evaluar múltiples escenarios en tiempo real.

La segunda hipótesis específica afirma que:

- “El GLP/GN permite una mejora en la eficiencia energética en pisos radiantes”.

Este planteamiento queda corroborado por los resultados obtenidos del programa, donde se observa que el consumo energético anual se mantiene constante para un mismo requerimiento térmico, pero el costo operativo varía según la fuente. Dado que tanto el GLP como el GN tienen un menor precio por kilovatio-hora que la electricidad y además presentan un buen rendimiento térmico, la eficiencia energética global del sistema se ve favorecida al usar estas fuentes. El gas natural, en particular, proporciona la mejor relación entre eficiencia, disponibilidad y costo.

### **4.3 DISCUSION DE LOS RESULTADOS**

Al revisar los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto, fue posible hacer un análisis más claro y realista sobre cómo se comporta el sistema de climatización por piso radiante. Desde lo técnico hasta lo económico, se pudo observar que, cuando el diseño está bien dimensionado y sigue criterios establecidos, como los de la norma UNE-EN 1264, este tipo de soluciones pueden adaptarse perfectamente a las condiciones de vivienda que tenemos en el Perú. Es algo que ya se intuía, pero que la simulación permitió confirmar con cifras.

Un aspecto que resultó bastante interesante fue cómo se comporta el flujo térmico. A medida que se eleva la temperatura superficial del suelo, también lo hace el flujo térmico, aunque no de manera proporcional.

Por ejemplo, pasar de 24 °C a 28 °C marcó una diferencia importante en la carga térmica total. Eso muestra que no se puede tomar a la ligera: hay que encontrar un punto de equilibrio entre confort y consumo energético.

Desde el lado hidráulico, los cálculos relacionados al número de Reynolds y la velocidad del agua mostraron resultados dentro del rango esperado. En cuanto al análisis económico, se evidenció que el gas natural es la opción más rentable para operar el sistema, con una diferencia significativa frente al GLP y, especialmente, frente al uso de electricidad.

En viviendas de tamaño medio (60 m<sup>2</sup>), los ahorros pueden superar los S/. 200 mensuales si se elige la fuente energética adecuada. Esta diferencia es crítica para muchas familias y puede marcar la decisión de adoptar o no este tipo de sistema.

Otro punto clave fue la automatización de los cálculos. La herramienta permite hacer comparaciones y proyecciones en tiempo real, lo que puede ser útil tanto en el diseño inicial como en la evaluación posterior del sistema instalado.

En resumen, los resultados no solo respaldan la viabilidad del sistema propuesto, sino que también confirman que el uso de herramientas computacionales puede mejorar sustancialmente el proceso de diseño en climatización. Esto abre la puerta a seguir desarrollando versiones más avanzadas del modelo, que incorporen refrigeración, energías renovables o incluso inteligencia artificial para optimización continua.

## CONCLUSIONES

En relación con el objetivo general de proponer un sistema de climatización por piso radiante basado en normas europeas para la optimización de eficiencia energética utilizando GLP/GN, se concluye que el sistema diseñado cumple con los criterios de desempeño térmico y económico establecidos en la normativa UNE-EN 1264. A través del programa desarrollado, se evidenció que el sistema puede operar eficientemente en condiciones reales de viviendas peruanas, logrando temperaturas confortables con un consumo energético contenido, particularmente cuando se emplea gas natural como fuente principal. Esta propuesta posiciona al sistema de piso radiante como una solución integral, sostenible y adaptable al contexto urbano local.

Respecto al objetivo específico de determinar qué factores mejoran la eficiencia energética en sistemas de climatización, se concluye que variables como la temperatura superficial del suelo, el aislamiento térmico del recinto, el diámetro de la tubería, y el tipo de fuente energética influyen directamente en el rendimiento del sistema. El programa permitió comprobar que una correcta selección de factores reduce significativamente la carga térmica total y las pérdidas de carga hidráulica. Además, se identificó que la selección adecuada del tipo de energía (GN/GLP) tiene un impacto decisivo en los costos operativos mensuales.

En lo que respecta al objetivo de automatizar los cálculos para evaluar el consumo energético de pisos radiantes, se concluye que el software desarrollado en Python es una herramienta eficaz, precisa y adaptable. Su implementación reduce el tiempo de análisis, también permitió evaluar múltiples escenarios en tiempo real.

Finalmente, en cuanto al objetivo de comparar la efectividad energética al usar como fuente de energía el GLP/GN, los resultados indicaron que el uso de gas natural es el

más eficiente en términos económicos, mientras que el GLP representa una alternativa viable en contextos donde el GN no está disponible. Ambas fuentes, al ser combustibles térmicamente eficientes y de menor costo por kWh en comparación con la electricidad, aportan a la optimización energética del sistema, alineándose con los principios propuestos en este estudio.

## RECOMENDACIONES

Se recomienda ampliar la presente investigación mediante la aplicación del sistema propuesto en viviendas reales, tanto en Lima como en otras regiones del país con condiciones climáticas distintas, a fin de contrastar los resultados simulados con condiciones operativas concretas. Esta validación en campo permitirá mejorar el programa y ajustar los parámetros de entrada conforme a la variabilidad de materiales, instalaciones y hábitos de uso de energía en los hogares peruanos.

Se sugiere incorporar módulos adicionales al programa desarrollado que permitan evaluar sistemas combinados de climatización, tales como calefacción-refrigeración, así como integrar tecnologías complementarias como bombas de calor, colectores solares térmicos o energía fotovoltaica. Esto permitiría proyectar escenarios más sostenibles y convertir la herramienta en un sistema integral de apoyo para diseño HVAC de alta eficiencia.

Se recomienda incluir el análisis de impacto ambiental del uso de distintas fuentes energéticas en futuras investigaciones, especialmente en lo relativo a emisiones de CO<sub>2</sub> y consumo energético primario. Este enfoque ambiental complementaría la visión desarrollada en este estudio, ofreciendo una perspectiva más integral sobre climatización eficiente en viviendas.

Se propone la incorporación del presente modelo computacional como material de estudio en cursos universitarios de transferencia de calor, eficiencia energética o diseño de instalaciones térmicas. Su uso como herramienta didáctica puede mejorar la comprensión de los conceptos técnicos por parte de los estudiantes, promoviendo la formación de

profesionales con una visión práctica, analítica y actualizada de los sistemas térmicos modernos.

Finalmente, se sugiere explorar en futuras investigaciones la conexión del modelo con sensores IoT o plataformas de domótica, de modo que el sistema pueda integrarse a hogares inteligentes y responder de manera dinámica a variaciones de temperatura, demanda o tarifa energética. Esta evolución natural del modelo hacia la automatización avanzada y la conectividad digital puede posicionar al sistema de piso radiante como una alternativa robusta dentro del concepto de vivienda inteligente y eficiente.

## REFERENCIAS:

Contreras Cerron, Amanda (2022). Sistemas de calefacción pasiva para lograr el confort térmico en viviendas alto andinas de Perú

Fenegas (2017). Guía de suelo radiante.

Hinojoza Mateo, Antonio (2012). Evaluación de un Sistema de calefacción por suelo radiante.

Huamancayo Inga Cristian Newton (2017). ANALISIS DE UN CALDERO PIROTUBULAR DE 300 BHP, USANDO COMBUSTIBLES DIESEL Y GLP, PARA MEJORAR LA EFICIENCIA, EN LA EMPRESA AGROMANTARO S.A.C.

Lorbada, David (2015): “Climatización de un edificio público mediante Suelo Radiante / Refrescante”; Universidad Carlos III de Madrid – España.

Olivera, Davy (2011): “Diseño energético de un suelo radiante para una sala de 12 m<sup>2</sup> ubicada a 4000 msnm en Langui-Cuzco”, Pontifica Universidad Católica del Perú – Perú.

UNE-EN-1264 (2022). Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies.

Uponor. (2011). Manual técnico de climatización invisible. Manual técnico de climatización invisible. Uponor, Madrid, Guatemala.

Yunus A. Cengel (2020). Transferencia de calor y masa 6ta Edición.

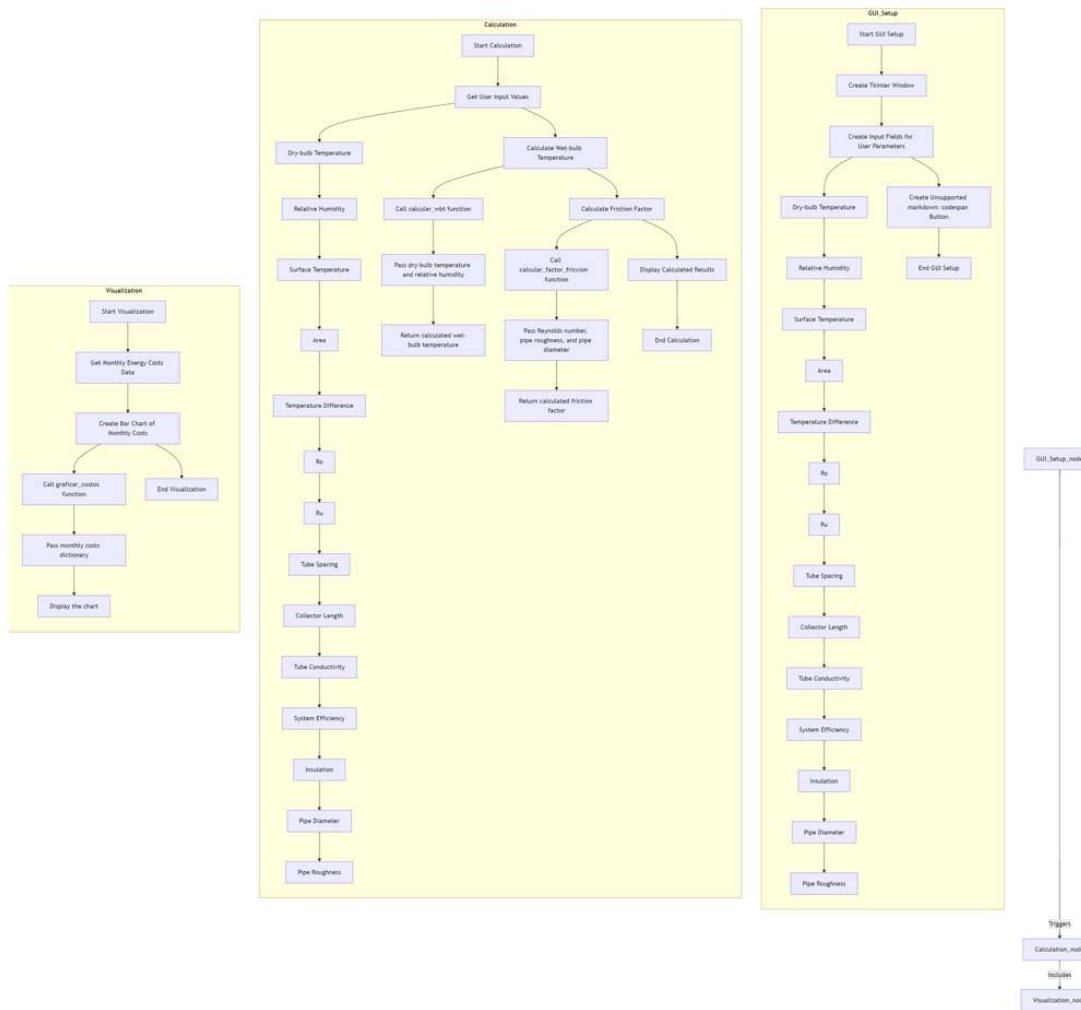
UNE-EN-1264 (2022). Sistemas de calefacción y refrigeración de circulación de agua integrados en superficies.

BRC GAS EQUIPMENT. (2004). CATALOGUE 2004. Italia.

Espindola, C., & Valderrama, J. (10 de Septiembre de 2011). Huella del Carbono. Parte 1: Conceptos, Métodos de Estimación y Complejidades Metodológicas.

## ANEXOS

### Anexo 01: Diagrama de flujo programa Python



Fuente: Elaboración Propia

## Anexo 02: Código fuente del programa en Python

```
import tkinter as tk
from tkinter import ttk, messagebox
import math
import matplotlib
matplotlib.use('TkAgg') # Forzar backend gráfico que permita ventana independiente
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.backends.backend_tkagg import FigureCanvasTkAgg

def calcular_wbt(dbt, hr):
    """Calcula la temperatura de bulbo húmedo (WBT) a partir de DBT y HR."""
    wbt = dbt * math.atan(0.151977 * math.sqrt(hr + 8.313659) / (hr - 1.676331)) + \
        math.atan(dbt + hr) - math.atan(hr - 1.676331) + \
        0.00391838 * hr**(3/2) * math.atan(0.023101 * hr)
    return wbt

def calcular_factor_friccion(Re, rugosidad, D):
    """Calcula el factor de fricción f basado en Re y rugosidad de tubería."""
    if Re < 2300:
        # Flujo laminar
        return 64 / Re
    else:
        # Flujo turbulento - usar fórmula de Colebrook-White iterativa
        f = 0.02 # valor inicial
        for _ in range(10):
            rhs = -2.0 * math.log10((rugosidad / (3.7 * D)) + (2.51 / (Re * math.sqrt(f))))
            f_new = (1 / rhs)**2 if rhs != 0 else f
            if abs(f - f_new) < 1e-6:
                break
            f = f_new
        return f

def graficar_costos(costos_mensuales):
    etiquetas = list(costos_mensuales.keys())
    valores = list(costos_mensuales.values())

    plt.figure(figsize=(10, 6))
    plt.bar(etiquetas, valores, color=['blue', 'green', 'orange'])
    plt.title('Comparativa de Costos Energéticos Mensuales')
    plt.xlabel('Tipo de Energía')
    plt.ylabel('Costo ($/. Mensual)')
    plt.grid(axis='y')
    plt.tight_layout()
```

```

plt.show() # Abre ventana independiente del gráfico

def calcular():
    try:
        # Datos entrada del usuario
        temperatura_ambiente = float(entry_temperatura_ambiente.get())
        humedad_relativa = float(entry_humedad_relativa.get() or 0)
        temperatura_superficial = float(entry_temperatura_superficial.get())
        area = float(entry_area.get())
        deltaT = float(entry_deltaT.get())
        Ro = float(entry_Ro.get())
        Ru = float(entry_Ru.get())
        paso_tubo = float(entry_paso_tubo.get())
        longitud_colector = float(entry_longitud_colector.get())
        conductividad_tubo = float(entry_conductividad_tubo.get() or 0.35)
        eficiencia_sistema = float(entry_eficiencia_sistema.get() or 0.9)
        aislamiento = float(entry_aislamiento.get() or 0.5)
        diametro_tuberia = float(entry_diametro_tuberia.get())
        rugosidad_tuberia = float(entry_rugosidad_tuberia.get() or 0.000045)

        # Calculo temperatura bulbo húmedo
        if humedad_relativa > 0:
            temperatura_bulbo_humedo = calcular_wbt(temperatura_ambiente,
            humedad_relativa)
            resultado_humedad = f"Temperatura de bulbo húmedo:
{temperatura_bulbo_humedo:.2f} °C\n"
        else:
            resultado_humedad = "Temperatura de bulbo húmedo: No calculada (HR
no proporcionada)\n"

        # Calculo densidad flujo térmico q
        q = 8.92 * (temperatura_superficial - temperatura_ambiente) ** 1.1

        # Calculo caudal masa (kg/s)
        cW = 4186 # J/kg·K
        mH_kg_s = (area * q) / (deltaT * cW * (1 + (Ro / Ru) +
((temperatura_ambiente - temperatura_superficial) / (q * Ru))))

        # Convertir a kg/h para mostrar
        mH = mH_kg_s * 3600

        # Calculo longitud total tubo
        L = (area / paso_tubo) + (2 * longitud_colector)

        # Temperatura impulsión
        V_des = temperatura_superficial
        V = V_des + deltaT

```

```

# Calculo velocidad agua (m/s)
area_circulacion = math.pi * (diametro_tuberia / 2) ** 2
velocidad = mH_kg_s / (1000 * area_circulacion) # Convertir kg/s a
m3/s dividiendo por 1000 kg/m3

# Calculo Numero de Reynolds
mu = 0.001 # viscosidad agua Pa.s (N.s/m2)
rho = 1000 # densidad agua kg/m3
Re = (rho * velocidad * diametro_tuberia) / mu

# Determinar régimen de flujo
regimen = "Laminar" if Re < 2300 else "Turbulento"

# Calculo factor de friccion
f = calcular_factor_friccion(Re, rugosidad_tuberia, diametro_tuberia)

# Calculo perdida de carga Darcy-Weisbach (m)
g = 9.81 # gravedad m/s2
perdida_carga = f * (L / diametro_tuberia) * (velocidad ** 2) / (2 * g)

# Añadir 15% pérdidas accesorios
perdida_total = perdida_carga * 1.15

# Costos energía promedio Perú (S/. por kWh)
costos = {'GLP': 0.38, 'GN': 0.11, 'Electricidad': 0.68} # S/. / kWh
(GLP convertido a kWh)

# Consumo energético anual aproximado (Wh)
consumo_anual = q * area * 8 * 365 # 8 horas/día

# Costos mensuales S/.
costo_glp_mensual = consumo_anual / 1000 * costos['GLP'] / 12
costo_gn_mensual = consumo_anual / 1000 * costos['GN'] / 12
costo_electricidad_mensual = consumo_anual / 1000 *
costos['Electricidad'] / 12

# Construir texto resultado
resultado = (
    f"Temperatura ambiente: {temperatura_ambiente} °C\n"
    f"{resultado_humedad}"
    f"Densidad flujo térmico (q): {q:.2f} W/m²\n"
    f"Caudal de diseño: {mH:.2f} kg/h\n"
    f"Longitud total de tubería: {L:.2f} m\n"
    f"Temperatura de impulsión: {V:.2f} °C\n\n"
    f"Régimen de flujo: {regimen} (Re = {Re:.0f})\n"
    f"Factor de fricción: {f:.4f}\n"
    f"Pérdida de carga total en tubería: {perdida_total:.2f} m\n\n"
    f"Costos energéticos mensuales (S/.):\n"

```

```

        f"- GLP: {costo_glp_mensual:.2f}\n"
        f"- GN: {costo_gn_mensual:.2f}\n"
        f"- Electricidad: {costo_electricidad_mensual:.2f}\n"
        f"Costo energético más económico: S/. {min(costo_glp_mensual,
costo_gn_mensual, costo_electricidad_mensual):.2f}\n"
    )

    messagebox.showinfo("Resultados", resultado)

    # Generar gráfico de costos
    graficar_costos({
        'GLP': costo_glp_mensual,
        'GN': costo_gn_mensual,
        'Electricidad': costo_electricidad_mensual
    })

except Exception as e:
    messagebox.showerror("Error", f"Revise los datos ingresados.\nDetalle:
{e}")

root = tk.Tk()
root.title("Calculadora de Piso Radiante")
root.geometry("750x900")

main_frame = ttk.Frame(root, padding=20)
main_frame.pack(fill="both", expand=True)

def crear_label_entry(row, text, parent, default=None):
    ttk.Label(parent, text=text).grid(column=0, row=row, sticky='w', pady=3)
    ent = ttk.Entry(parent, width=25)
    ent.grid(column=1, row=row, pady=3)
    if default is not None:
        ent.insert(0, str(default))
    return ent

input_section = ttk.LabelFrame(main_frame, text="Datos de Entrada")
input_section.pack(fill='x', padx=10, pady=10)

entry_temperatura_ambiente = crear_label_entry(0, "Temperatura ambiente
(°C)*:", input_section, 20)
entry_humedad_relativa = crear_label_entry(1, "Humedad relativa (%)
(opcional):", input_section, 50)
entry_temperatura_superficial = crear_label_entry(2, "Temperatura superficial
(°C)*:", input_section, 30)
entry_area = crear_label_entry(3, "Área (m²)*:", input_section, 50)
entry_deltaT = crear_label_entry(4, "DeltaT (°C)*:", input_section, 5)
entry_Ro = crear_label_entry(5, "Resistencia Ro*:", input_section, 0.1)
entry_Ru = crear_label_entry(6, "Resistencia Ru*:", input_section, 0.2)

```

```

entry_paso_tubo = crear_label_entry(7, "Paso de tubo (m)*:", input_section,
0.5)
entry_longitud_colector = crear_label_entry(8, "Longitud del colector (m)*:",
input_section, 10)
entry_conductividad_tubo = crear_label_entry(9, "Conductividad tubo (W/mK)
(opcional):", input_section, 0.35)
entry_eficiencia_sistema = crear_label_entry(10, "Eficiencia sistema (0-1)
(opcional):", input_section, 0.9)
entry_aislamiento = crear_label_entry(11, "Aislamiento (m²K/W) (opcional):",
input_section, 0.5)
entry_diametro_tuberia = crear_label_entry(12, "Diámetro tubo interno (m)*:",
input_section, 0.02)
entry_rugosidad_tuberia = crear_label_entry(13, "Rugosidad tubería (m)
(opcional):", input_section, 0.000045)

boton_calcular = ttk.Button(main_frame, text="Calcular", command=calcular)
boton_calcular.pack(pady=20)

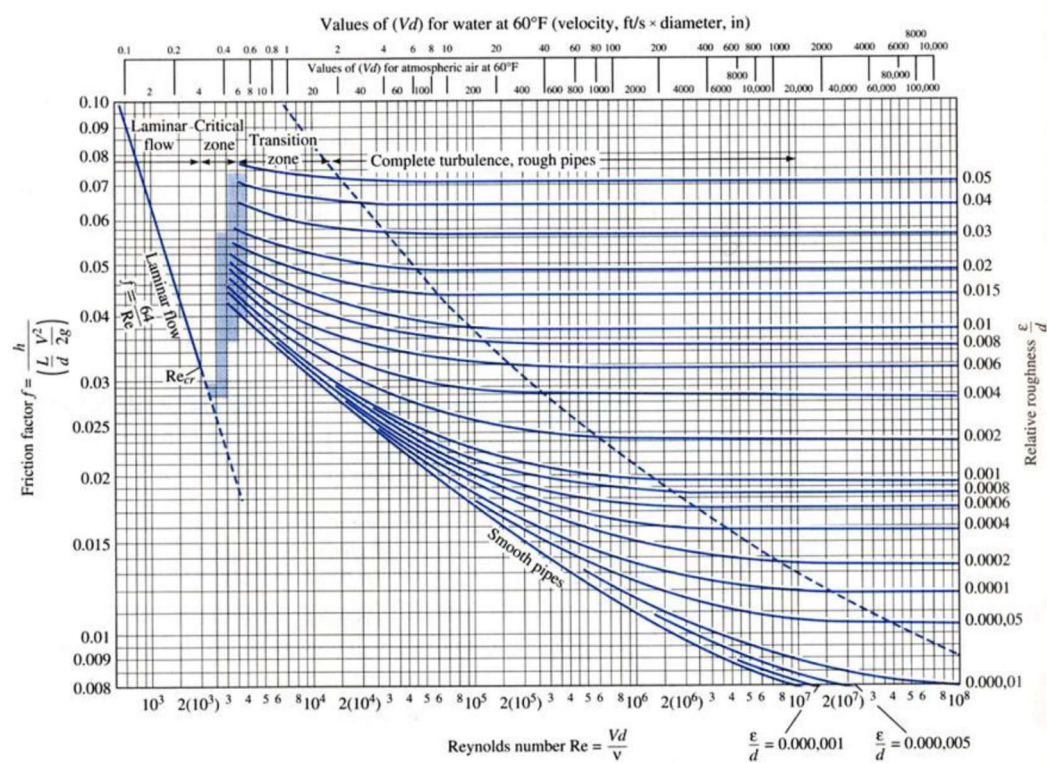
boton_salir = ttk.Button(main_frame, text="Salir", command=root.destroy)
boton_salir.pack()

root.mainloop()

```

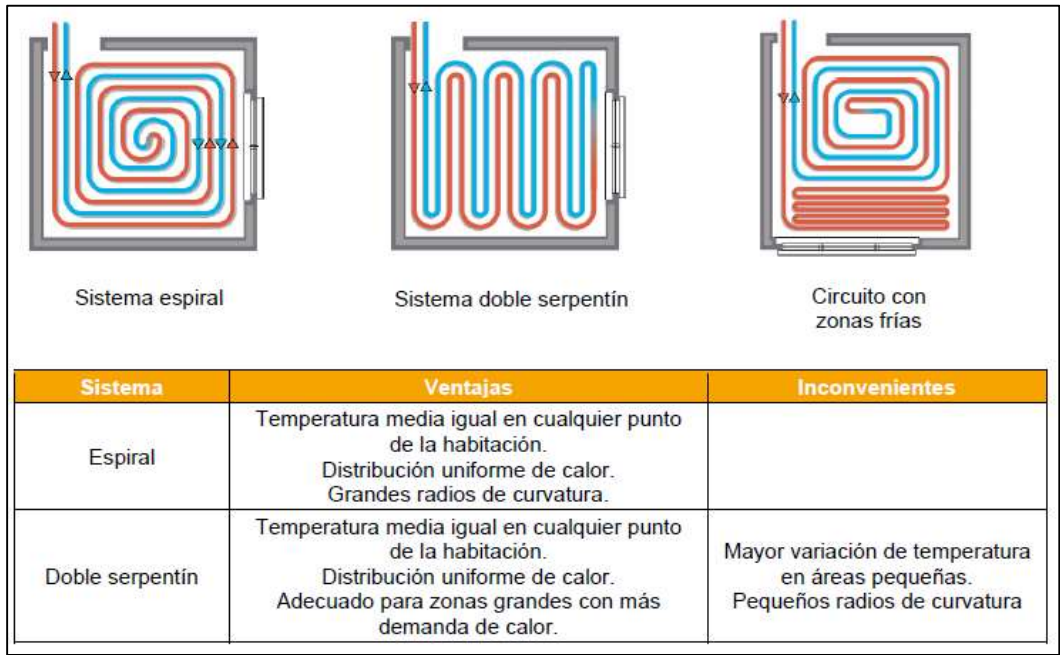
**Fuente:** Elaboración Propia

Anexo 03: Diagrama de Moody



Fuente: Diagrama de dominio público

Anexo 04: Circuitos de Circulación



Fuente: Standard Hidráulica

**Anexo 05: Circuitos de Circulación**

| Cerramientos y particiones interiores de la envolvente térmica                   | $U_{\text{máx}}(\text{proyecto})(1)$ |   | $U_{\text{máx}}(2)$ |
|----------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------|---|---------------------|
| Muros de fachada                                                                 | 0.52 W/m²K                           | ≤ | 0.86 W/m²K          |
| Primer metro del perímetro de suelos apoyados y muros en contacto con el terreno | 0.57 W/m²K                           | ≤ | 0.86 W/m²K          |
| Particiones interiores en contacto con espacios no habitables                    | 0.19 W/m²K                           | ≤ | 0.86 W/m²K          |
| Suelos                                                                           | 0.27 W/m²K                           | ≤ | 0.64 W/m²K          |
| Cubiertas                                                                        | 0.38 W/m²K                           | ≤ | 0.49 W/m²K          |
| Vidrios y marcos de huecos y lucernarios                                         | 2.30 W/m²K                           | ≤ | 3.50 W/m²K          |

**Fuente:** UPONOR