

**Diseño e implementación de un software de propiedades psicométricas para la industria de
HVAC**

Carlos David Vargas Varón

Universidad Santo Tomás

Facultad De Ingeniería Mecánica

División De Ingenierías

Bogotá D. C

2024

**Diseño e implementación de un software de propiedades psicométricas para la industria de
HVAC**

Carlos David Vargas Varón

Trabajo de Grado en la modalidad de diseño e implementación de un software de ingeniería para
optar al título de Ingeniero Mecánico

Director

Ing. Andrés José Zapata Saad

Universidad Santo Tomás

Facultad De Ingeniería Mecánica

División De Ingenierías

Bogotá D. C

2024

Tabla De Contenido

Contenido

1.Generalidades.....	6
1.1 Resumen	6
1.2. Introducción	7
2. Planteamiento del Problema	8
3. Objetivos	11
3.1 Objetivo General	11
3.2 Objetivos Específicos	11
4. Marco Referencial.....	12
4.1 Marco Conceptual	12
4.2 Marco Teórico	17
4.3 Marco de Antecedentes	28
4.3.1 Revisión de Softwares Existentes	29
5. Modelo de desarrollo del software.....	40
5.1 Definición de Requisitos	40
Análisis Comparativo de Softwares Psicrométricos.....	40
Análisis Encuestas Empresas.....	47
5.1.2 Requerimientos Funcionales no funcionales	65
Tabla 3 Requerimientos	65

5.2: Selección de Ambiente de Desarrollo	67
5.2.1 Lenguaje de Programación seleccionado	67
5.2.2 Frameworks y Bibliotecas Utilizadas	68
5.3 Diseño del Sistema	70
5.4 Desarrollo del Software- Definición de propiedades y selección de método de análisis	76
5.4.1 Definición Propiedades psicrométricas y sus ecuaciones.....	77
Temperatura de bulbo Seco	78
Temperatura de bulbo Húmedo	78
Humedad Relativa	84
Humedad absoluta o especifica	86
Entalpía del aire húmedo	89
Volumen específico del aire húmedo	91
Presión de saturación	94
Presión parcial de vapor de agua	99
Temperatura de punto rocío.....	100
5.4.2 Definición Procesos psicrométricos y sus ecuaciones.....	102
Procesos simples	102
Calentamiento Sensible	102
Enfriamiento sensible (W constante).....	106
Humidificación (aprox. isotérmica).....	108

Deshumidificación (ideal isotérmica).....	109
Enfriamiento con deshumidificación (coil húmedo)	111
Calentamiento con humidificación	112
Enfriamiento evaporativo directo (adiabático).....	114
Enfriamiento evaporativo indirecto (IE).....	115
Evaporativo indirecto-directo (IDE).....	116
Calentamiento con deshumidificación (dsecante adiabático).....	117
Mezcla de corrientes de aire	118
Mezcla adiabática de corrientes de aire.....	119
Recalentamiento (reheat).....	120
Bypass de serpentín (coil bypass).....	121
Recuperación de calor sensible (HRV)	122
Recuperación entálpica (ERV).....	122
Saturación adiabática (modelo teórico).....	123
Observaciones finales y uso en diseño:	124
5. Proceso de condensación	125
5.4.3 Selección de método inicial y desarrollo en Python.....	126
5.4 Desarrollo del aplicativo	128
5.4.2 Requerimientos Funcionales no funcionales.....	129
Tabla 3 Requerimientos.....	129

5.4.3 Bocetos iniciales	131
5.5: Pruebas y Validación de rendimiento	182
6. Análisis de Resultados	186
8. Bibliografía	202
9. ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

1.Generalidades

1.1 Resumen

Este trabajo presenta el diseño y la implementación de un software para el cálculo de propiedades psicrométricas y el análisis de procesos de acondicionamiento de aire, pensado para pequeñas y medianas empresas (PYMES) del sector HVAC. El punto de partida fue identificar qué necesitan realmente estas empresas: se revisaron diferentes programas existentes y se consultó a personal técnico y de ingeniería para definir los requerimientos funcionales y técnicos del aplicativo. Con base en ello, se desarrolló un software en Python, utilizando una interfaz gráfica construida con Tkinter, que permite calcular propiedades del aire húmedo (como temperatura de punto de rocío, razón de humedad, entalpía y volumen específico), representar los puntos en una carta psicrométrica interactiva y trazar procesos típicos de climatización. Además, el programa incluye funciones para editar puntos y procesos, exportar resultados y trabajar a distintas presiones atmosféricas, lo que lo hace útil tanto a nivel del mar como en ciudades de gran altitud. La validación se realizó con un conjunto de 50 casos de prueba, comparando los resultados del software con una librería de referencia y con un programa psicrométrico comercial, obteniéndose errores relativos medios menores al 0,6 % en todas las propiedades evaluadas. También se hicieron pruebas con usuarios, en las que se observó una reducción importante en el tiempo de resolución de cálculos y una buena percepción de facilidad de uso. En conjunto, el software ofrece una herramienta precisa y práctica que puede apoyar el trabajo diario de las PYMES HVAC y servir como apoyo en la formación de estudiantes y profesionales en climatización.

1.2. Introducción

- Contexto del Problema
- Estado Actual de la Industria HVAC y la Digitalización
- Objetivo del Documento

2. Planteamiento del Problema

La psicrometría, como rama de la termodinámica que estudia las mezclas de aire y vapor de agua (Mitchell & Braun, 2012), es esencial en la ingeniería por su capacidad para analizar y controlar las condiciones ambientales a través de variables como la temperatura, la humedad relativa y la entalpía. Esto es clave para optimizar sistemas de climatización, refrigeración y ventilación, garantizando tanto el confort térmico como la eficiencia energética y la calidad del aire (ASHRAE, 2017). Su importancia se extiende a diversas aplicaciones, desde el diseño de sistemas de climatización en edificios hasta procesos industriales que requieren un control preciso del ambiente, como la fabricación de productos farmacéuticos, la agricultura en invernaderos y el secado de alimentos. Además, la psicrometría juega un papel crucial en la gestión de la humedad para prevenir la proliferación de moho y la corrosión en infraestructuras, permitiendo que los ingenieros desarrollen soluciones que favorecen el bienestar humano, la sostenibilidad y el ahorro energético (Stoecker & Jones, 2013).

En el sector de la climatización, especialmente en el ámbito de las pequeñas y medianas empresas (PYMES) dedicadas al diseño e instalación de sistemas HVAC (Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado), la necesidad de contar con personal capaz de realizar cálculos psicrométricos precisos es necesario para garantizar tanto el confort térmico como la eficiencia energética de los sistemas (ASHRAE, 2017). Sin embargo, muchas de estas empresas no cuentan con ingenieros especializados que puedan realizar estos cálculos de manera precisa, sino con técnicos que, si bien tienen experiencia en la instalación y operación de sistemas, carecen de la formación necesaria para manejar el desarrollo de los cálculos psicrométricos de manera adecuada (Suaznábar, Herrera & Cathles, 2022).

El sector empresarial requiere cálculos necesarios para ajustar las condiciones de temperatura, humedad y calidad del aire, la carencia de personal con habilidades enfocadas en este tipo de cálculos representa un desafío significativo. Aunque los ingenieros pueden realizar estos cálculos utilizando modelos como el de gas ideal (McQuiston, Parker, & Spitler, 2005), los técnicos que suelen llevar a cabo las labores prácticas no tienen la formación suficiente para realizar estos cálculos con precisión. Una de las maneras en las que estas empresas pueden solventar este desafío es mediante el uso de herramientas que faciliten estos procesos sin requerir un alto nivel de conocimiento específico.

Las PYMES enfrentan diferentes opciones para solucionar este problema: recurrir a tablas de referencia, utilizar software especializado o adoptar métodos manuales. Sin embargo, algunas de estas herramientas han quedado obsoletas y las soluciones gratuitas o accesibles en el mercado a menudo carecen de precisión, funcionalidad o adaptabilidad, ya que muchas no incluyen la capacidad de calcular procesos complejos, como la mezcla de diversas calidades de aire, la visualización de un diagrama psicrométrico completo (Ver Tabla 1) e incluso no consideran variables importantes como la presión atmosférica reducida por la altura, lo que es particularmente relevante en ciertas aplicaciones industriales (Beltrán, Beltrán, & Bach, 2015) como por ejemplo a las condiciones de presión atmosférica de Bogotá. En contraste, las soluciones más avanzadas suelen tener costos elevados, lo que las hace inaccesibles para muchas PYMES que operan con presupuestos limitados (International Energy Agency, 2021) (Ver Tabla 2).

Finalmente, las pequeñas y medianas empresas en América Latina, y específicamente en la industria de climatización, enfrentan un rezago tecnológico siendo que muchas dependen de métodos manuales o herramientas básicas para el cálculo psicrométrico, dando como resultado

la disminución de competitividad en comparación con empresas que adoptan herramientas avanzadas que permiten ajustes rápidos y precisos a las condiciones ambientales cambiantes, promoviendo tanto el ahorro energético como el bienestar en espacios climatizados (CEPAL, 2020; International Energy Agency, 2021). Esta falta de acceso a herramientas tecnológicas avanzadas y asequibles no solo afecta su productividad, sino también su capacidad de crecimiento (Suaznábar, Herrera & Cathles, 2022).

Por lo tanto, este proyecto propone desarrollar un software de libre distribución y accesible que permita a los técnicos realizar cálculos psicrométricos de manera sencilla y precisa, generando resultados visuales claros, como una carta psicrométrica que muestre el proceso particular, facilite el ajuste de las condiciones climáticas en espacios cerrados mediante el balance de masa y energía.

En la sección 4.2 del presente documento se realizó una revisión bibliográfica de los softwares gratuitos encontrados en el mercado. Luego de dicha revisión (Ver tabla 1 y 2), se llegó a la determinación de los requerimientos preliminares del software principalmente porque ninguno de los encontrados cumplía todas las necesidades. El software de climatización debe incorporar cálculos psicrométricos precisos y actualizados, permitiendo la personalización de propiedades termodinámicas y el uso de diferentes sistemas de unidades. Debe ofrecer la generación de cartas psicrométricas interactivas y ajustables, con capacidades de edición visual y adaptación a condiciones locales específicas. La interfaz debe ser intuitiva y fácil de navegar, permitiendo a los usuarios sin conocimientos técnicos avanzados utilizarlo con facilidad, además de incluir manuales accesibles en varios idiomas. El software debe permitir la edición, adición y eliminación de puntos de estado, mostrando propiedades en tiempo real y permitiendo la

asociación de notas. Finalmente, es esencial que el software tenga un modelo de acceso gratuito o de bajo costo, promoviendo su adopción en el sector HVAC. De esta manera, se intenta solventar la falta de personal altamente especializado y se ofrece una solución asequible que puede mejorar la eficiencia operativa de estas empresas.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

- Diseñar e implementar un software para la industria HVAC que mejore los procesos en las PYMES mediante cálculos psicrométricos, análisis de balance de masa y energía, y herramientas interactivas para evaluar confort y eficiencia.

3.2 Objetivos Específicos

- Identificar los requerimientos funcionales y técnicos del software según las necesidades de las PYMES en la industria HVAC.

- Diseñar e implementar un software que permita cálculos psicrométricos relacionados con el confort, visualización de resultados claros y una interfaz gráfica intuitiva con carta psicrométrica.
- Validar el software mediante pruebas para garantizar la precisión de cálculos, usabilidad y cumplimiento de normativas HVAC.

4. Marco Referencial

4.1 Marco Conceptual

Sistemas de aire acondicionado: Un sistema de aire acondicionado, o HVAC&R, está compuesto por componentes y equipos dispuestos en secuencia para acondicionar el aire, transportarlo al espacio acondicionado y controlar los parámetros ambientales interiores de un espacio específico dentro de los límites requeridos. (Richter & Wettstein, HVAC Systems Design Handbook).

Aire Húmedo: El término aire húmedo se refiere a una mezcla de aire seco y vapor de agua en la cual el aire seco se trata como si fuera un componente puro.

Calor Sensible: Calor sensible, es aquel que recibe un cuerpo sin cambiar su estado físico mientras sube su temperatura. En general, se ha observado experimentalmente, que la cantidad

necesaria de calor para calentar o enfriar un cuerpo es directamente proporcional a la masa del cuerpo y el número de grados en que cambia su temperatura. El calor que se transfiere a un sistema cerrado produce un cambio en la temperatura del sistema; este calor se denomina calor sensible" (Çengel y Boles, 2011, p. 15).

Calor Latente: El calor que se transfiere durante un cambio de fase o de estado a presión constante se denomina calor latente." (Çengel y Boles, 2011, p. 16).

Propiedades Psicométricas: Las propiedades psicométricas son características termodinámicas que describen el estado de una mezcla de aire y agua. Incluyen la temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo, humedad relativa, humedad absoluta, punto de rocío, volumen específico, entalpía y razón de humedad.

Presión: La presión es la fuerza por unidad de área ejercida sobre una superficie." (Serway y Jewett, 2005, p. 407)

Presión Volumétrica: La presión volumétrica (pv) de una sustancia es igual a la fuerza total ejercida por dicha sustancia sobre las paredes del recipiente que la contiene, dividida entre el volumen total que ocupa." (Çengel y Boles, 2012, p. 5).

Presión Atmosférica: La presión atmosférica es la fuerza por unidad de área ejercida por el peso del aire sobre cualquier superficie situada dentro de la atmósfera." (Jewett y Serway, 2014, p. 427).

Presión A nivel Del mar: La presión a nivel del mar es la presión atmosférica medida al nivel medio de las aguas del mar, y equivale aproximadamente a 101,325 kPa." (Young y Freedman, 2009, p. 554).

Volumen: El volumen es la cantidad de espacio que ocupa un cuerpo o sustancia." (Giancoli, 2006, p. 5).

Volumen Específico: "El volumen específico (v) es el volumen ocupado por unidad de masa de una sustancia." (Çengel y Boles, 2012, p. 9).

Masa: "La masa es la cantidad de materia que contiene un cuerpo." (Serway y Jewett, 2005, p. 5).

Energía: "La energía es la capacidad de un sistema para realizar trabajo." (Alonso y Finn, 1995, p. 15).

Intercambio de energía: "El intercambio de energía consiste en la transferencia de energía entre dos sistemas debido a una diferencia en sus estados termodinámicos." (Çengel y Boles, 2012, p. 19).

"El intercambio de energía se produce cuando una porción de materia (sistema termodinámico) gana o pierde energía mediante el calor o el trabajo que cruza su frontera." (Moran et al., 2004, p. 5).

Entalpía: "La entalpía es una propiedad termodinámica que representa la cantidad total de energía en un sistema compuesta de su energía interna y el producto de la presión por el volumen." (Çengel y Boles, 2015, p. 109).

Entropía: "La entropía es una propiedad termodinámica que mide el grado de desorden molecular de un sistema." (Çengel y Boles, 2015, p. 256).

Bulbo Húmedo: "La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura que el cuerpo humano percibe cuando la piel se encuentra húmeda y expuesta a un flujo de aire en movimiento. A diferencia de la temperatura de bulbo seco, depende de la humedad relativa del aire, siendo

menor cuanto menor es dicha humedad, debido a la evaporación del agua en la piel." (ASHRAE, 2005, p. 9.1).

Bulbo Seco: La temperatura de bulbo seco se refiere a la temperatura del aire medida con un termómetro estándar, el cual no tiene efecto alguno del contenido de humedad en el aire (ASHRAE, 2021). Esta temperatura representa la energía cinética promedio de las moléculas de aire seco.

Temperatura de Rocío: La temperatura de rocío es la temperatura a la cual el vapor de agua presente en el aire comienza a condensarse cuando se enfría a presión constante (Çengel & Boles, 2015). Es el punto en el que el aire se satura y la humedad relativa alcanza el 100%.

Humedad: La humedad se refiere a la cantidad de vapor de agua presente en el aire. Existen diferentes maneras de cuantificar la humedad, como la humedad relativa, la humedad específica y la humedad absoluta (Moran et al., 2018).

Humedad Relativa: La humedad relativa es la relación entre la cantidad de vapor de agua presente en el aire y la máxima cantidad de vapor de agua que el aire podría contener a esa temperatura, expresada como un porcentaje (Çengel & Cimbala, 2018).

Humedad Específica: La humedad específica, también conocida como relación de humedad, es la masa de vapor de agua por unidad de masa de aire seco. Es una medida de la cantidad de humedad presente en el aire independiente de la temperatura y la presión (ASHRAE, 2021).

Transformaciones Psicrométricas: Por transformaciones psicrométricas nos referimos a los cambios de las condiciones del aire húmedo. Dichas condiciones permiten ajustar la temperatura

y la humedad del aire para proporcionar un servicio de climatización y/o de calidad del aire interior (Ventilación) (psicometría aplicada a la Climatización)

Factor de Calor sensible: El factor de calor sensible (FCS) es la relación entre la tasa de transferencia de calor sensible (que cambia la temperatura) y la tasa total de transferencia de calor en un proceso de acondicionamiento de aire (Çengel & Boles, 2015). Representa la fracción de la carga térmica total que se transfiere por medio de calor sensible

Carta Psicrométrica: La carta psicrométrica es un diagrama que representa gráficamente las propiedades termodinámicas del aire húmedo, como temperatura, humedad relativa, humedad absoluta, entalpía y volumen específico (ASHRAE, 2021). Permite visualizar y analizar los cambios en estas propiedades durante los procesos de acondicionamiento de aire.

Front-end: En el desarrollo de software, el front-end se refiere a la parte de la aplicación con la que interactúa el usuario, incluyendo la interfaz gráfica, elementos de diseño, interacciones y funcionalidades visibles (Sommerville, 2016). Es la capa que conecta al usuario con la lógica y los datos del sistema.

Back-end: El back-end, en el desarrollo de software, hace referencia a la parte de la aplicación que se encarga de la lógica del negocio, el procesamiento de datos, la conectividad con bases de datos y servidores, y todas las funcionalidades que ocurren detrás de escena, sin interacción directa con el usuario (Sommerville, 2016).

Sistemas de Climatización: Son sistemas empleados para controlar y mantener las condiciones ambientales deseadas en espacios interiores, como temperatura, humedad, pureza del aire y movimiento del aire. Existen diferentes tipos, como sistemas de volumen de aire variable (VAV), sistemas de volumen de aire constante (CAV), sistemas de expansión directa, entre otros.

Carga térmica: Es la cantidad de calor que debe ser removida o agregada a un espacio para mantener las condiciones de temperatura y humedad deseadas. Se calcula considerando factores como ganancias de calor por radiación solar, personas, equipos, infiltraciones de aire exterior, entre otros.

4.2 Marco Teórico

La Psicrometría es la rama de la termodinámica que estudia las propiedades de las mezclas de aire y vapor de agua. Utiliza la carta psicrométrica, un diagrama que representa gráficamente las propiedades psicrométricas del aire húmedo y permite analizar los procesos de acondicionamiento de aire. (Moran & Shapiro, 2014). El cálculo de las propiedades psicrométricas se basa en principios termodinámicos, como la primera ley de la termodinámica (conservación de la energía), la segunda ley de la termodinámica (entropía) y las ecuaciones de estado para gases ideales y mezclas de gases.

Estados Termodinámicos

Un estado termodinámico se define como la condición de un sistema en un momento específico, determinada por un conjunto de propiedades macroscópicas como la presión (P), la temperatura (T), el volumen (V) y la energía interna (U) (Çengel & Boles, 2015). Estas propiedades describen completamente el sistema y permiten analizar sus cambios cuando interactúa con su entorno. En la termodinámica clásica, el estado de un sistema se representa mediante variables de estado, las cuales dependen únicamente del estado actual del sistema y no del proceso seguido para alcanzarlo (Moran & Shapiro, 2018). Para describir un estado termodinámico, generalmente

se emplean diagramas de estado, como el diagrama P-V y el diagrama T-s (temperatura vs. entropía).

Un sistema se encuentra en equilibrio termodinámico cuando sus propiedades permanecen constantes en el tiempo y no hay gradientes de temperatura, presión o composición química dentro del sistema (Van Wylen & Sonntag, 2003).

Confort del Usuario

El confort del usuario en entornos climatizados se define como el estado de bienestar térmico en el que una persona no siente ni frío ni calor y está satisfecha con su entorno térmico. La sensación de confort está influenciada por factores como la temperatura del aire, la humedad relativa, la velocidad del aire y la actividad metabólica del individuo. Según la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers), el confort térmico se evalúa mediante el Índice de Voto Medio Previsto (PMV, por sus siglas en inglés) y el Índice de Porcentaje de Personas Insatisfechas (PPD), los cuales se utilizan para predecir la satisfacción térmica de un grupo de personas en un espacio cerrado (ASHRAE, 2017).

Otros estudios, como el de Fanger (1970), establecen que la percepción del confort térmico depende de la interacción entre parámetros ambientales (temperatura, humedad, velocidad del aire y temperatura radiante) y factores personales (vestimenta y actividad metabólica) (Fanger, P. O., 1970).

Balance de Masa y Energía

El **balance de masa y energía** es un principio fundamental de la termodinámica y la mecánica de fluidos que establece que la cantidad total de masa y energía en un sistema debe permanecer constante, salvo que haya flujos de entrada o salida.

El **balance de masa** se basa en la **ecuación de continuidad**, que establece que la masa que entra en un sistema debe ser igual a la que sale, más cualquier acumulación dentro del sistema (**Çengel & Boles, 2015**):

$$\sum \dot{m}_{\text{entrada}} = \sum \dot{m}_{\text{salida}} + \frac{dm}{dt}$$

Por otro lado, el **balance de energía** considera la conservación de la energía en sistemas termodinámicos, incluyendo términos de calor, trabajo y energía interna. Se expresa generalmente con la **Primera Ley de la Termodinámica** para sistemas abiertos (**Moran & Shapiro, 2018**):

$$\sum \dot{Q} - \sum \dot{W} + \sum \dot{m} h_{\text{entrada}} = \sum \dot{m} h_{\text{salida}} + \frac{dE}{dt}$$

Estos balances son esenciales en aplicaciones de climatización, donde permiten calcular la transferencia de calor y humedad en espacios cerrados, optimizando el desempeño de los sistemas HVAC (**ASHRAE, 2021**).

Ecuaciones de estado para gases ideales y mezclas de gases: Las ecuaciones de estado para gases ideales y mezclas de gases describen la relación entre la presión, el volumen, la temperatura y la cantidad de sustancia de un gas o una mezcla de gases. Estas ecuaciones son fundamentales para comprender el comportamiento de los gases en diferentes condiciones

termodinámicas y son ampliamente utilizadas en el diseño y análisis de sistemas de ingeniería, como los sistemas de climatización, procesos químicos y motores de combustión.

Ecuación de Clausius-Clapeyron: La ecuación de Clausius-Clapeyron es una ecuación fundamental en termodinámica que relaciona la presión de vapor saturado de un líquido o sólido con su temperatura. Esta ecuación se deriva a partir de la segunda ley de la termodinámica y es ampliamente utilizada en psicrometría para determinar la presión de vapor del agua en el aire húmedo.

La ecuación de Clausius-Clapeyron se expresa como:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{L}{T\Delta v} = \frac{S}{\Delta V}$$

Donde:

$\frac{dp}{dT}$: Cambio de presión de vapor con respecto a la temperatura.

L : Calor latente de vaporización o sublimación (en J/kg).

T : Temperatura absoluta (en K).

v_g : Volumen específico del vapor (en m^3/kg).

v_l : Volumen específico del líquido (en m^3/kg).

Esta ecuación indica que la tasa de cambio de la presión de vapor con respecto a la temperatura es directamente proporcional al calor latente de vaporización o sublimación e inversamente proporcional a la temperatura y al cambio de volumen específico entre las fases líquida y gaseosa.

En el campo de la psicrometría, la ecuación de Clausius-Clapeyron se utiliza para calcular la presión de vapor del agua en el aire húmedo a partir de la temperatura de bulbo húmedo o de la temperatura de punto de rocío. Esta presión de vapor es un parámetro clave para determinar otras propiedades psicrométricas, como la humedad relativa, la humedad absoluta y la entalpía del aire húmedo.

ASHRAE. (2017). Chapter 1: Psychrometrics. ASHRAE Handbook - Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Ley de Boyle-Mariotte:

$$PV=nRT$$

Donde:

- P es la presión del gas (en Pa o atm).
- V es el volumen del gas (en m^3 o L).
- n es la cantidad de sustancia (en moles).
- R es la constante de los gases ideales (8.314J/mol*K o 0.08206L*atm/mol*K)
- T es la temperatura absoluta (en Kelvin).

Ley de Charles:

$$\frac{V}{T} = constante$$

Esta ecuación establece que, a presión constante, el volumen de un gas ideal es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

Ley de Gay-Lussac:

$$\frac{P}{T} = \textit{constante}$$

Esta ecuación establece que, a volumen constante, la presión de un gas ideal es directamente proporcional a su temperatura absoluta.

Ley de Avogadro:

$$\frac{V}{n} = \textit{constante}$$

Esta ecuación establece que, a temperatura y presión constantes, el volumen de un gas ideal es directamente proporcional a la cantidad de sustancia presente.

Ecuación de Dalton: Describe la presión total como la suma de las presiones parciales de los componentes de la mezcla

$$P_{total} = P1 + P2 + \dots + Pn$$

Ley de Amagat:

El volumen total de una mezcla de gases es igual a la suma de los volúmenes parciales de los gases individuales en la mezcla.

$$V_{mixture} = VA + VB + VC + \dots$$

Ecuaciones de balance de masa y energía: Utilizadas para analizar procesos de acondicionamiento de aire, como calentamiento, enfriamiento, humidificación y deshumidificación.

Ecuaciones de Balance de Masa:

Para el análisis de los sistemas compuestos por mezclas de aire seco y de vapor de agua, en los que también puede estar presente una fase condensada de agua, se hará uso de los principios de conservación de la masa y de la energía.

Los sistemas en los que se lleva a cabo los procesos psicrométricos se analizan por lo general cuando el equipo se encuentra en estado estacionario y sobre un volumen de control

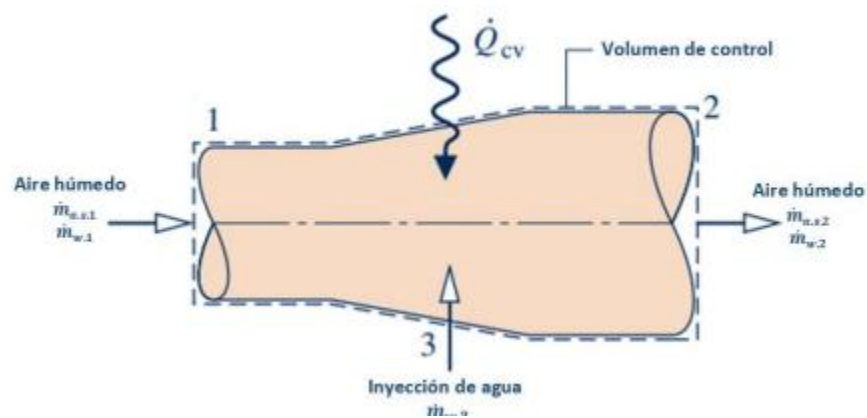


Figura 1 Flujo estacionario

Considerando que el equipo opera en régimen estacionario, las cantidades de aire seco y de vapor de agua contenidas dentro del volumen de control se mantienen constantes en el tiempo. En estas condiciones no hay acumulación de masa y, por lo tanto, el balance de masa para cada componente exige que la suma de los caudales másicos de entrada sea igual a la suma de los caudales másicos de salida.

Para el aire seco se cumple:

$$m_{da1} = m_{da2}$$

mientras que, para el vapor de agua, el balance viene dado por:

$$m_{w1} + m_{w3} = m_{w2}$$

donde el subíndice 3 representa el caudal másico de agua (líquida o vapor) que se añade o se extrae del volumen de control.

Los caudales másicos de vapor de agua pueden expresarse en función de la razón de humedad, usando la relación general:

$$m_{w1} + m_{w3} = m_{w2}$$

Sustituyendo en el balance de masa del agua, se obtiene:

$$m_{w3} = m_{da}(w2 - w1)$$

La diferencia de razones de humedad $w2 - w1$ permite identificar el tipo de proceso:

- si $w2 < w1$ se produce eliminación de agua (deshumidificación),
- si $w2 > w1$ se produce adición de agua (humidificación), que es el caso considerado en este ejemplo.

1. Balance de masa de aire seco:

$$m_{da} = m_{da1} + m_{da2}$$

Donde:

- m_{da} = flujo másico de aire seco (kg/s)
- m_{da_1}, m_{da_2} = flujos másicos de aire seco en las corrientes 1 y 2

2. Balance de masa de vapor de agua:

$$m_v = m_{v_1} + m_{v_2}$$

Donde:

- m_v = flujo másico de vapor de agua (kg/s)
- m_{v_1}, m_{v_2} = flujos másicos de vapor de agua en las corrientes 1 y 2

Ecuaciones de Balance de Energía:

Entre el volumen de control establecido y el entorno se puede tener un intercambio de energía en forma de calor (Q), dependiendo de su uso su valor puede ser negativo, positivo o nulo.

Despreciando los efectos debidos a la energía cinética y potencial y suponiendo que el trabajo en el volumen de control es nulo, el balance de energía que queda es el siguiente:

1. Balance de energía para un proceso de flujo estacionario:

$$Q - W = m_{da} * (h_2 - h_1) + m_v * (h_{g_2} - h_{g_1})$$

Donde:

- m_{da} = flujo másico de aire seco (kg/s)
- m_v = flujo másico de vapor de agua (kg/s)
- Q = transferencia de calor (kJ/kg de aire seco)
- W = trabajo (kJ/kg de aire seco)
- h_1, h_2 = entalpías específicas del aire húmedo en las condiciones 1 y 2 (kJ/kg de aire seco)
- h_{g1}, h_{g2} = entalpías específicas del vapor de agua en las condiciones 1 y 2 (kJ/kg de vapor)

2. Ecuación para el calor sensible:

$$Q_s = m_{da} * c_{p_a} * (T_2 - T_1)$$

Donde:

- m_{da} = flujo másico de aire seco (kg/s)
- Q_s = calor sensible (kJ/kg de aire seco)
- c_{p_a} = calor específico del aire seco (kJ/kg·K)
- T_1, T_2 = temperaturas del aire seco en las condiciones 1 y 2 (°C o K)

3. Ecuación para el calor latente:

$$Q_l = m_v * (h_{g_2} - h_{g_1})$$

Donde:

- m_v = flujo másico de vapor de agua (kg/s)
- h_{g_1}, h_{g_2} = entalpías específicas del vapor de agua en las condiciones 1 y 2 (kJ/kg de vapor)
- Q_l = calor latente (kJ/kg de aire seco)

4.3 Marco de Antecedentes

El desarrollo de herramientas de software para el cálculo de propiedades psicrométricas ha permitido optimizar el diseño y análisis de sistemas de climatización en la industria de la climatización y refrigeración. Diversos estudios han creado aplicaciones que facilitan estos cálculos, contribuyendo a disminuir la formación técnica necesaria, reducir los tiempos de análisis y aumentar la exactitud en la determinación de las propiedades psicrométricas, en comparación con los métodos gráficos o manuales tradicionales. En este apartado se presentarán algunas investigaciones y desarrollos de software enfocados en el cálculo de propiedades psicrométricas

En el trabajo titulado "Simulación de los Procesos Psicrométricos" por Gustavo Cardoso, Milton Puzhi y Saúl Zhinín, (Cardoso, Puzhi, & Zhinín, 2016) aborda el desarrollo de un modelo computacional para simular procesos de humidificación, deshumidificación y secado en la industria de climatización. Utilizando el lenguaje Java, se crea un software que permite calcular de manera precisa las propiedades psicrométricas del aire y realizar simulaciones de procesos de mezclas de aire, a diferentes temperaturas y alturas sobre el nivel del mar. Este modelo reduce la complejidad de los cálculos manuales y gráficos, que suelen ser tediosos y propensos a errores. Además, la herramienta desarrollada es validada en las condiciones ambientales de Ecuador y muestra una buena correlación con resultados obtenidos manualmente, ofreciendo así una alternativa versátil y confiable tanto para uso industrial como didáctico.

En el artículo "Desarrollo y aplicación de software docente en prácticas de psicrometría" desarrollado por Emilio Sarabia, Víctor Soto y José Pinazo, (Soto, Sarabia, & Pinazo, 2018)

describe el diseño y uso de un software educativo que facilita el aprendizaje de procesos psicrométricos en asignaturas relacionadas con la climatización. La herramienta permite simular y calcular procesos como el calentamiento, enfriamiento y mezclas de corrientes de aire, sin la necesidad de realizar cálculos manuales complejos. Desarrollado en C++ y con un enfoque docente, el software ha sido implementado en distintas instituciones educativas y ofrece una interfaz sencilla y resultados gráficos en diagramas psicrométricos. Su aplicación no solo mejora la comprensión teórica de los estudiantes, sino que también optimiza las sesiones prácticas al permitir visualizar y analizar los cambios en las propiedades del aire en tiempo real, complementando así la formación teórica y las prácticas de laboratorio.

Con respecto a los diferentes softwares desarrollados para el cálculo de las propiedades psicrométricas se han encontrado aplicativos gratis y de pago los cuales van desde los 70 dólares. A continuación, se explicará algunos de estos softwares, sus características y desventajas con respecto a sus procesos e interfaz.

4.3.1 Revisión de Softwares Existentes

A continuación, se realizará una descripción de los softwares existentes con la finalidad de conocer la características y funcionalidades existentes en el mercado actual

➤ Ingeniería Elemental-Carta Psicrométrica Online

La página web ofrece una descripción concisa sobre los conceptos fundamentales de la psicrometría y el uso de la carta psicrométrica, proporcionando una introducción clara a este tema. Además, la plataforma cuenta con una herramienta que facilita el cálculo de diversos parámetros clave en el análisis psicrométrico. Entre estos se incluyen la presión total del aire, la presión de saturación, la presión parcial del vapor de agua, la humedad específica, la entalpía, y

el volumen específico. Estas variables son esenciales para comprender y evaluar las condiciones atmosféricas y su impacto en procesos de climatización, ventilación y refrigeración.

Puntos para tener en cuenta

- Este aplicativo da la opción de calcular los datos anteriores mencionados teniendo valores fijos como lo son la temperatura de bulbo seco y la altitud, y un valor variable el cual se puede seleccionar (Temperatura de bulbo húmedo, Humedad relativa o La Temperatura Punto de rocío)

Para validar la precisión del software "Carta Psicrométrica Online" desarrollado por Ingeniería Elemental, se realizó un análisis comparativo entre los resultados (ver imagen 1) arrojados por el aplicativo y cálculos manuales efectuados utilizando fórmulas psicrométricas estandarizadas y una hoja de cálculo en Excel.

El procedimiento consistió en calcular un total de **30 casos diferentes**, variando parámetros como temperatura de bulbo seco, altitud, humedad relativa, temperatura de bulbo húmedo y punto de rocío, dentro de rangos típicos de operación para sistemas de climatización (entre 0°C y 40°C, y altitudes de 0 a 2600 m s. n. m.). Posteriormente, se determinó el **error porcentual** para cada propiedad psicrométrica obtenida.

El error porcentual (EEE) se calculó según la fórmula:

Ecuación 1 Error porcentual precisión de resultados

$$E = \left| \frac{\text{Valor}_{\text{software}} - \text{Valor}_{\text{manual}}}{\text{Valor}_{\text{manual}}} \right| \times 100$$

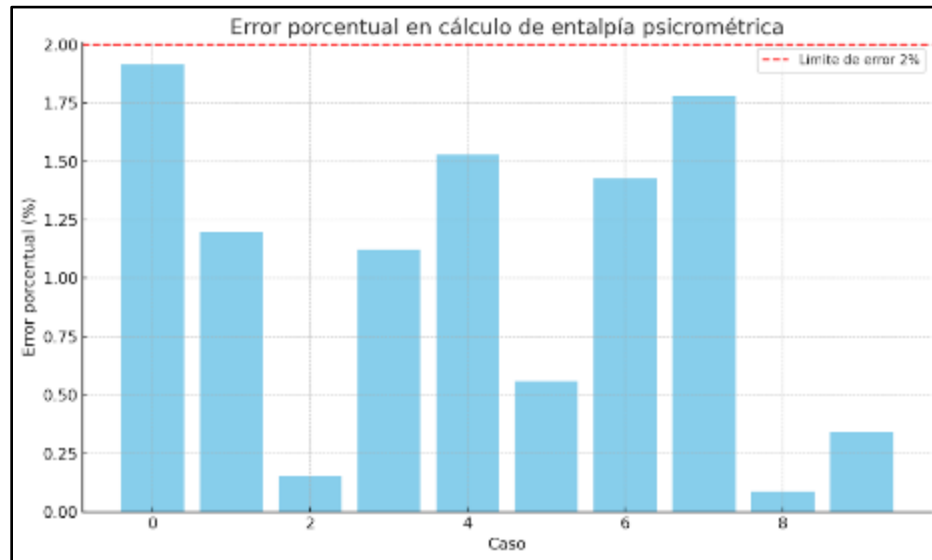


Figura 2 Error porcentual de precisión del software "carta psicrométrica online"

Carta Psicrométrica Online
 Esta Carta Psicrométrica Online es de uso libre y gratuito. Esperamos la encuentre útil.

Temperatura húmeda-bulbo, °C	Altura, m
20	1000
Velocidad, m/s	Mostrador de humedad, g/kg
0	10
☒ Temperatura Bulbo-humedad, °C	Mostrador de humedad sobre el agua, g/kg
15	10
☐ Humedad Relativa, %	Presión de vapor de agua, g/kg
15	10
☐ Temperatura Punto de Rocío, °C	Entalpía, kJ/kg
15	10
Presión, kPa	Volumen específico, m³/kg
101.325	10

Figura 3 Interfaz software "Carta Psicrométrica online". Tomado de <https://www.ingenieriaelemental.com/posts/es/carta-psicrometrica-online>

Carencias

- Los resultados no son seleccionables
- No posee una carta Psicrométrica Dinámica
- No posee cálculos de energía y confort

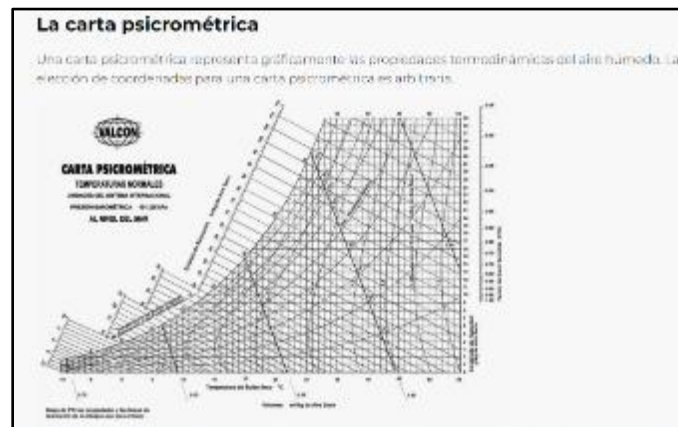


Figura 4 Carta psicrométrica software “Carta Psicrométrica online”. Tomado de: <https://www.ingenieriaelemental.com/posts/es/carta-psicrometrica-online>

➤ Hvac-eng

Puntos para tener en cuenta

- Este aplicativo permite mostrar, así como ocultar todas las métricas guía de la carta psicrométrica
- Tiene una gran cantidad de unidades a seleccionar
- La carta psicrométrica es bastante interactiva, permite mover el punto de selección proporcionando así los datos según la ubicación puesta por el usuario

- Permite seleccionar dos modelos de interpretación de la carta psicrométrica
- Permite añadir distintos puntos y guarda los datos de bulbo seco y humedad relativa

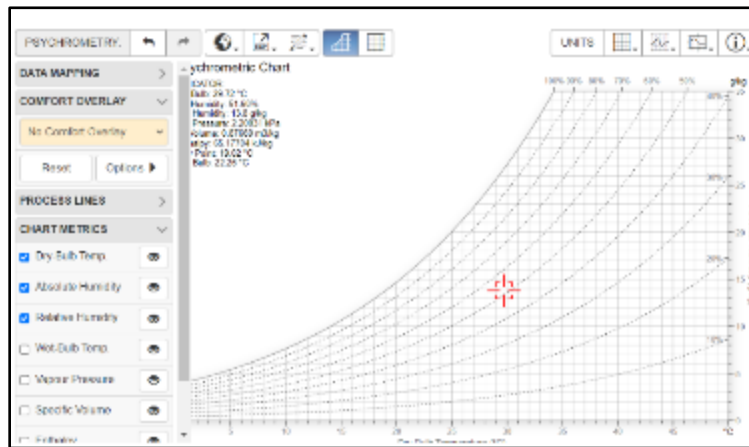


Figura 5 Interfaz software “Hvac-eng”. Tomado de: <https://hvac-eng.com/es/gr%C3%A1fico-psicrom%C3%A9trico-interactivo/>

Carencias

- Los resultados no son seleccionables
- No posee una Entrada de datos manual para los usuarios

➤ Herramientas de Ingeniería

Puntos para tener en cuenta

- El software es muy Dinámico
- Muestra las líneas de entalpía constante y Humedad relativa constante
- Posee dos parámetros conocidos variables (Humedad relativa y Bulbo seco)
- Permite mostrar un punto actual fijo y uno movable variando los datos continuamente hasta que el usuario decide volver a calcular

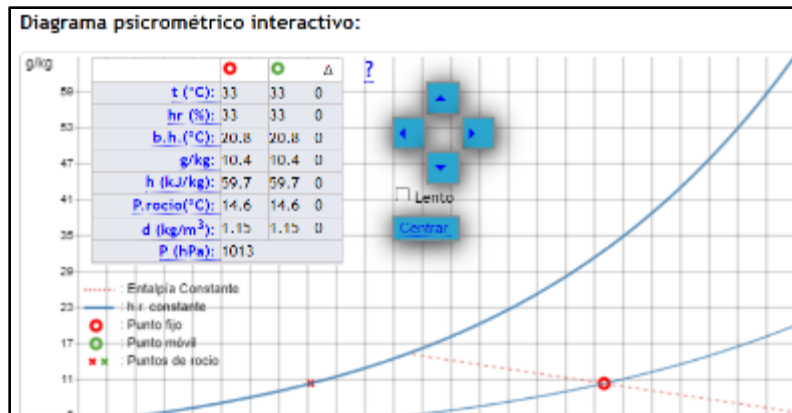


Figura 6 Interfaz software “Herramientas de Ingeniería”. Tomado de: Diagrama psicrométrico online y cálculo de las propiedades del aire húmedo (herramientasingeneria.com)

Carencias

- Solo posee dos parámetros de entrada
- Solo posee un sistema de unidades
- Es una página web con anuncios emergentes

Introducir temperatura y altitud:
 Temperatura: °C
 Altitud: m

 Introducir el parámetro conocido:
☐ Temperatura Bulbo Húmedo
☒ Humedad Relativa
 Valor:

Figura 7 Parámetros de entrada software “Herramientas de Ingeniería”. Tomado de: Diagrama psicrométrico online y cálculo de las propiedades del aire húmedo (herramientasingeneria.com)

➤ **PsycPro**

- La versión 1.1 del software, que es la más comúnmente disponible, está desactualizada y resulta inutilizable.

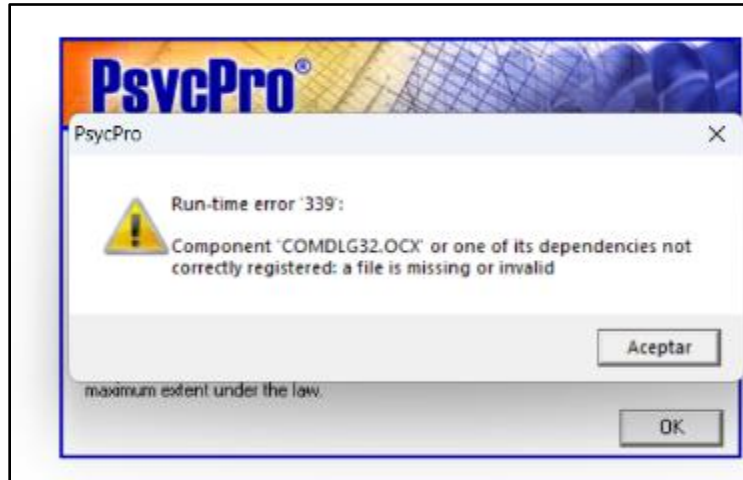


Figura 8 Interfaz software “PsycPro”. Tomado de: Aplicación PsycPro versión 1.1

➤ **Versión 1.2.7**

Esta versión del software presenta cartas psicrométricas preestablecidas por el organizador, en las cuales el usuario puede desplazar el cursor hacia un punto específico para visualizar, en un panel lateral, la temperatura y demás propiedades, facilitando así la lectura de la información.

Sin embargo, no realiza cálculos automáticos, ya que se limita a que el usuario ubique manualmente el punto de interés para obtener los valores correspondientes.

Además, permite definir si la carta se genera a partir de la base de datos de ASHRAE y de datos climáticos, aunque su interfaz está únicamente en inglés. No obstante, las cartas creadas pueden

adaptarse a diferentes idiomas mediante un listado disponible. El programa ofrece varias cartas psicrométricas ya configuradas para la selección del usuario, aunque estas opciones son limitadas y no cubren todas las situaciones específicas que puedan presentarse en la práctica.

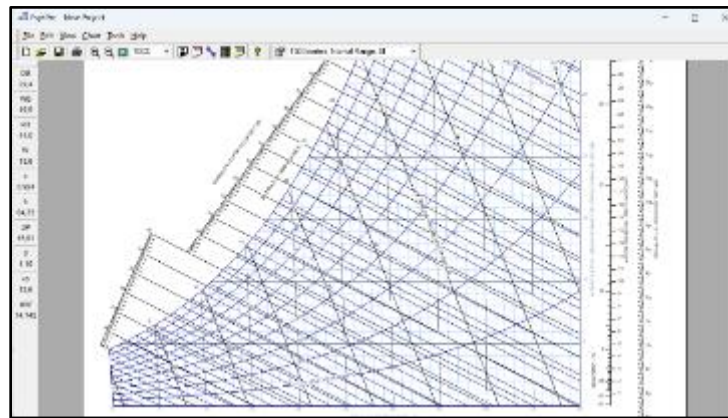


Figura 9 Interfaz software “PsycPro”. Tomado de: Aplicación PsycPro versión 1.2.7 (carta psicrométrica)

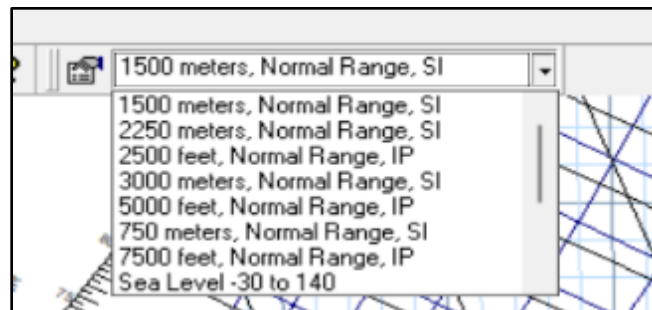


Figura 10 Selección de cartas psicrométricas software “PsycPro”. Tomado de: Aplicación PsycPro versión 1.2.7

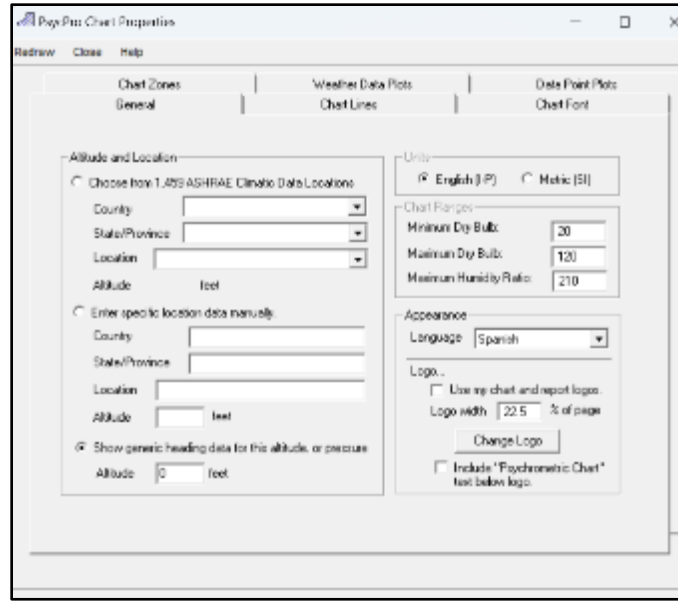


Figura 11 Opciones interfaz software “PsychPro”. Tomado de: Aplicación PsychPro versión

1.2.7

- Todos los datos solo están disponibles en el sistema inglés, el apartado de unidades del sistema internacional no Funciona, por lo tanto, está limitado a solo un sistema.

➤ Daikin Psychrometrics Tool

Este software tiene una mayor capacidad al momento de calcular y graficar los puntos de estado, así como varios procesos, la interpretación de las unidades en el sistema inglés e internacional. Sin embargo, posee limitantes a la hora de generar las cartas psicrométricas al tener un rango específico

Puntos para tener en cuenta

- Permite Modificar la generación del diagrama psicrométrico exclusivamente en un rango de -500 a 2000 metros.

- Permite acomodar los colores de la carta psicrométrica según el requerimiento del usuario. Posee un manual de usuario en inglés.
- El software permite ingresar, editar, remover puntos de estado digitados por el usuario (recomienda un máximo de 15 puntos para facilitar la lectura del diagrama.)
- Muestra de la interfaz

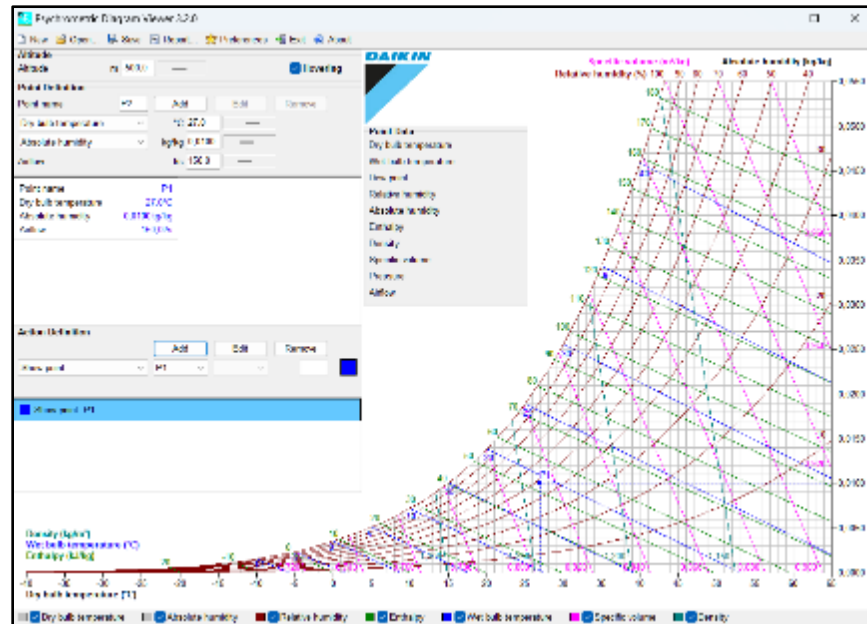


Figura 12 Interfaz software “Darklin Psychrometrics”. Tomado de: Aplicación Darklin Psychrometrics

Point Data (Mouse)	
Dry bulb temperature	38,5°C
Wet bulb temperature	30,3°C
Dew point	27,9°C
Relative humidity	55,4%
Absolute humidity	0,0226kg/kg
Enthalpy	96,8kJ/kg
Density	1,186kg/m³
Specific volume	0,862m³/kg
Pressure	107477,5Pa
Airflow	

Figura 13 Datos obtenibles software “Darklin Psycrometrics”. Tomado de: Aplicación Darklin Psycrometrics

Carencias

- Limitantes en la generación de carta psicrométrica (rango)

➤ HVAC Psychrometrics Calculator

Aplicativo para cálculo de propiedades tales como, Temperaturas, Saturación, velocidad de presión, presión barométrica

Puntos para tener en cuenta

Permite calcular propiedades psicrométricas a partir del desplazamiento de una barra seleccionable para establecer el valor de las temperaturas y presión

Carencias

- No posee carta psicrométrica.
- Tiene cálculos limitados.
- Solo maneja un sistema de unidades

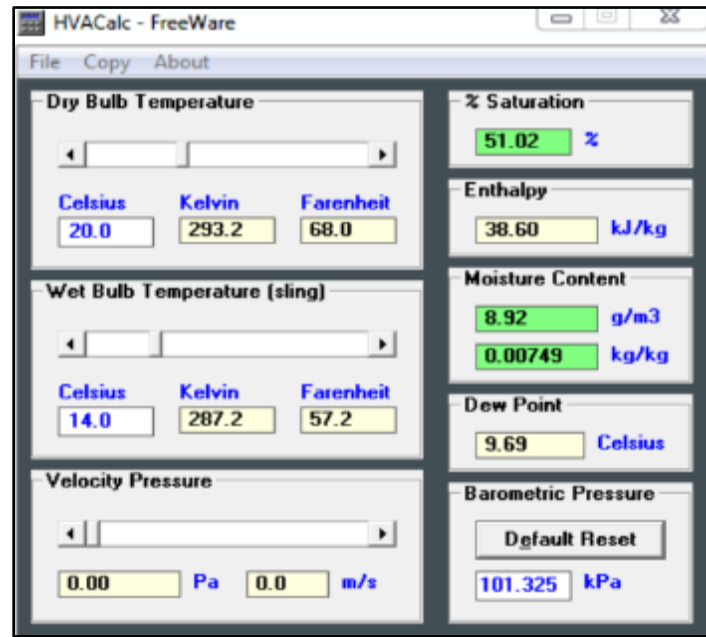


Figura 14 Interfaz software “HVAC Psychrometric Calculator”. Tomado de: Aplicación HVAC Psychrometric Calculator

5. Modelo de desarrollo del software

5.1 Definición de Requisitos

En esta sección se presenta el análisis de los requisitos necesarios para el desarrollo del software, con base en la investigación previa y en los resultados obtenidos a partir de encuestas aplicadas a diversas empresas.

Análisis Comparativo de Softwares Psicrométricos

Después de realizar la revisión de los softwares psicrométricos existentes, es necesario presentar un análisis comparativo que permita visualizar de manera estructurada las principales

características, ventajas y limitaciones de cada uno de ellos. Para este propósito, a continuación, se muestra una tabla que sintetiza la información recopilada, facilitando la identificación de tendencias comunes, áreas de oportunidad y aspectos relevantes que deben ser considerados en el desarrollo del nuevo aplicativo.

Esta tabla busca no solo resumir la información previamente expuesta, sino también ofrecer una base objetiva que respalde la toma de decisiones respecto a las funcionalidades, el tipo de licencia, y las características técnicas que serán priorizadas en el diseño del software propuesto

Tabla 1. Comparación Softwares Gratuitos

Nombre del Software	Ventajas	Desventajas
CoolProp	• Permite calcular propiedades termodinámicas y realizar búsquedas personalizadas, haciendo uso de las ecuaciones de estado, transporte y mezcla a través de ecuaciones las de Helmholtz.	• Es una librería que requiere conocimientos básicos de programación para su uso en distintos entornos.
PsycPro	• Proporciona una fácil Lectura de las propiedades ingresadas y calculadas por el usuario al posicionar el cursor en el punto deseado	• La interfaz no es intuitiva. • Los caculos de los puntos de estado no funcionan, no procesa estos cálculos ni permite añadirlos.

	• Permite añadir notas y unir puntos de estado. • Permite insertar cartas psicrométricas desde ASHRAE Climatic Data Locations • El software permite un mayor rango de personalización en las líneas de estado de la carta psicrométrica dando la opción de seleccionar el color de estas dando la oportunidad al usuario de identificarlas fácilmente.	• El software tiene limitaciones al manejar sus cálculos exclusivamente en el sistema inglés. no posee sistema internacional de unidades
Daikin Psychrometrics Tool	• Posee un manual de usuario en inglés. • El software admite editar, remover y modificar puntos de estado ingresados por el usuario sin la necesidad de realizar todos los cálculos nuevamente (Máximo 15.)	• El software posee Limitantes en la generación de carta psicrométrica (No es posible la generación del diagrama psicrométrico fuera de en un rango de -500 a 2000 metros.)
HVAC Psychrometrics Chart	• Aplicación móvil que permite generar cartas psicrométricas de forma interactiva y realizar cálculos asociados al aire	• No contiene generación de cartas psicrométricas. • No admite la evaluación de puntos de Estado.

acondicionado y refrigeración

CARRIER Psychrometrics	• El software posee la opción de ver las propiedades en la parte izquierda al posicionar el ratón en el punto deseado de la carta psicrométrica. • Permite añadir los puntos de estado	• El aplicativo posee un tiempo de respuesta superior a 1 minuto. • No permite editar la carta psicrométrica
Elite Software PsyChart	• Permite los cálculos psicrométricos en un entorno limitado pero eficiente. • El software admite la adición de puntos de estados	• El software está limitado a una elevación disponible entre 9000 y 11000 pies. • La temperatura de bulbo seco se encuentra limitada entre los 35 y 100 grados Fahrenheit • El software limita la cantidad y procesos a solo 13 por carta psicrométrica. • La aplicación no es intuitiva.
PsychroChart/ PsychroSim	• Admite Identificar las propiedades del aire • Permite dibujar procesos	• Es una versión Limitada que solo permite dibujar 1 proceso
HVAC Psychrometrics	• Permite calcular propiedades psicrométricas a partir del	• No posee carta psicrométrica. • Tiene cálculos limitados.

Calculator	desplazamiento de una barra seleccionable para establecer el valor de las temperaturas y presión.	• Solo maneja un sistema de unidades
Greenheck Psychrometrics Calculator	• Admite graficar puntos de estado y procesos en una carta psicrométrica preestablecida	• No permite la generación de cartas psicrométricas adecuadas a lugares específicos. • El tiempo de respuesta del software es superior a 1 min
Ingeniería elemental / Carta Psicrométrica Online	• Permite calcular propiedades psicrométricas a partir de dos valores fijos digitados por el usuario (T bulbo seco) y un valor seleccionable (T Bulbo Húmedo, Humedad relativa, Temperatura de Rocío)	• No Posee una carta psicrométrica avanzada (Es solo una imagen). • Los cálculos son limitados a los mostrados por el conversor de unidades

Tabla 2. Comparación Softwares de pago

Nombre del Software	Precio (dólares)	Ventajas	Desventajas
---------------------	------------------	----------	-------------

ASHRAE Psychrometrics Analysis Program	Desde \$520	• Muestra un diagrama psicrométrico en el cual al posicionar el cursor se muestran las propiedades psicrométricas al usuario. • Posee una serie de cartas psicrométricas preestablecidas según la ubicación. • Permite generar y graficar puntos de estado	• Posee la generación de cartas psicrométricas, pero está limitada a un conjunto de ubicaciones. • Solo maneja un sistema de unidades
Trane trace	\$74	• Permite al usuario posicionar el cursor mostrando los valores de las propiedades psicrométricas.	• Es la misma versión de carrier Psychrometrics, limitada, con menores características
PsychroGen	\$87	• Realiza el cálculo de propiedades Psicrométricas con un alto nivel de precisión comparado a mano y con softwares como lo es EES	Pese a ser un software de pago su única característica relevante es el cálculo de las propiedades psicrométricas

Elite Software
PsyChart

\$195

- Muestra un diagrama psicrométrico completo en pantalla y genera impresiones en color del diagrama ajustadas a la elevación digitada por el usuario.
 - Crea procesos comunes de HVAC con la función *Air Handler Model*.
 - El rango de elevación con respecto al nivel del mar del software es bastante amplio siendo este entre -1000 y +24,000 pies.
 - Usa ecuaciones psicrométricas ASHRAE y define puntos de estado a partir de dos parámetros.
 - Ofrece 7 procesos diferentes de calefacción y refrigeración con múltiples opciones.
 - Posee cálculos del confort térmico como: enfriamiento y
- Aunque el aplicativo promete varias características como las ventajas ya mencionadas, este No es intuitivo.
 - No posee cartas psicrométricas para ciudades o condiciones específicas

deshumidificación, calefacción

sensible, mezcla de corrientes

de aire, humidificación

Análisis Encuestas Empresas

Para lograr un mejor análisis de los requerimientos que pueda llegar a tener el software se realizó una serie de búsquedas de empresas relacionadas a las áreas afines del proyecto, esto con la finalidad de conocer que opinan estas al momento de adquirir y usar un software en sus labores diarias.

- Pregunta # 1: ¿Cuál es el tamaño de su empresa?

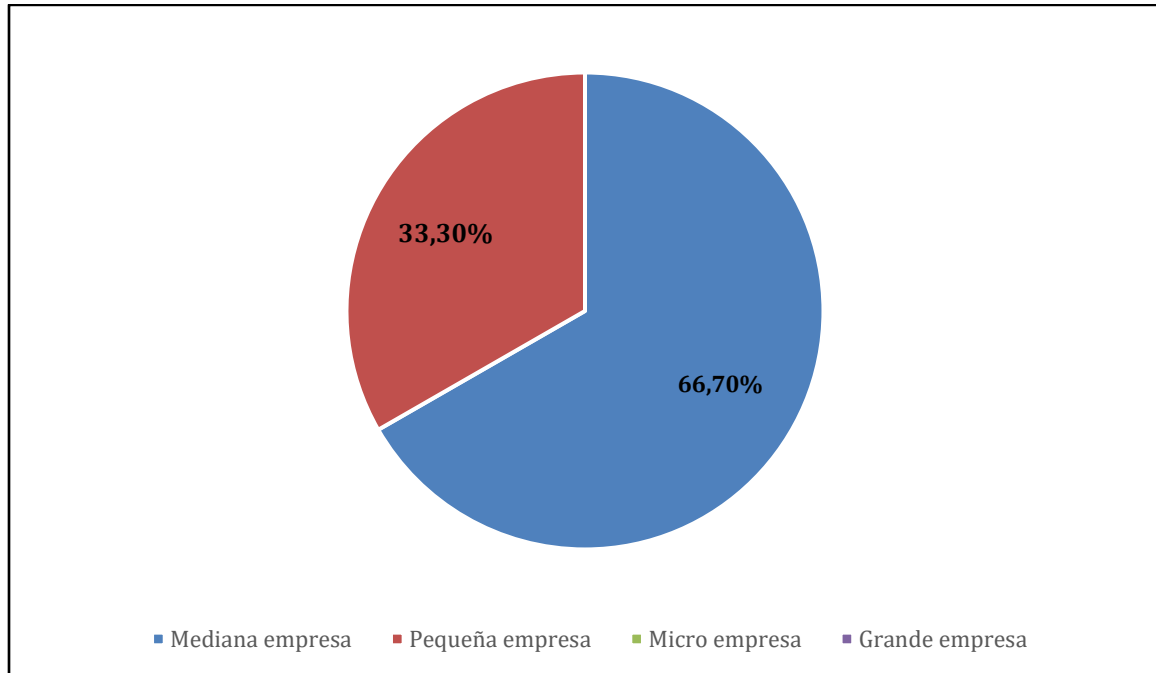


Figura 15 Pregunta # 1, encuesta realizada a empresas

La gráfica 1 muestra el tamaño de las empresas encuestadas dentro de la industria HVAC. Se observa que la mayoría (66.7%) son medianas, mientras que el 33.3% son empresas pequeñas. No se registraron respuestas exclusivas para microempresas o grandes empresas.

- Pregunta # 2: ¿En qué sector opera su empresa?

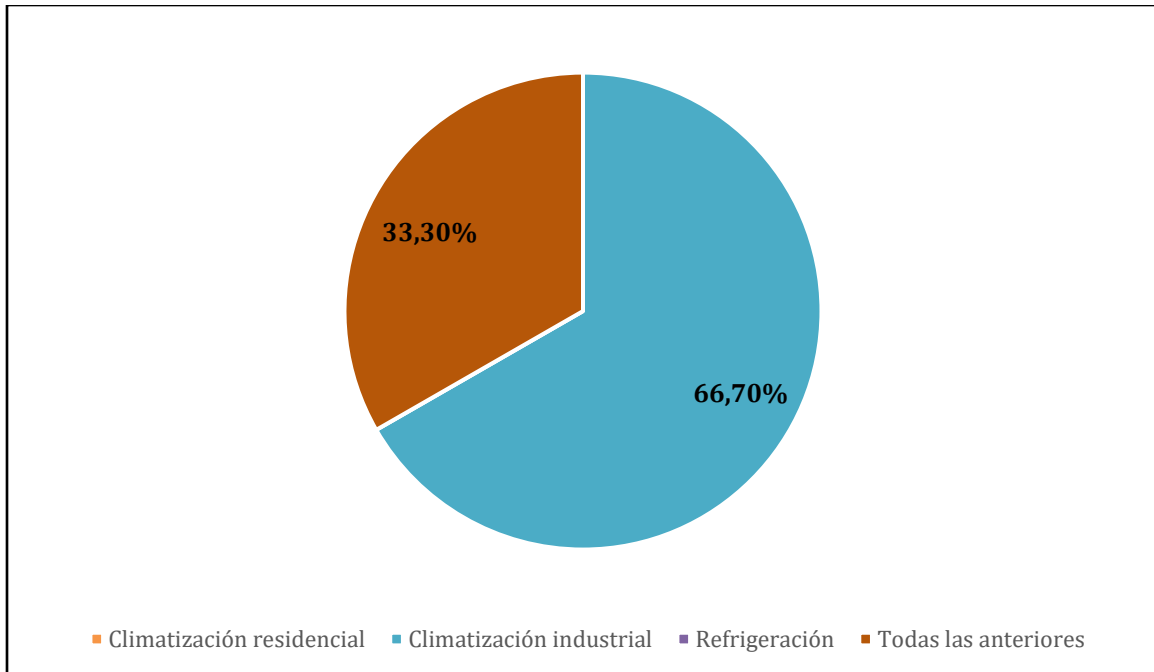


Figura 16 Pregunta # 2, encuesta realizada a empresas

La gráfica 2 muestra la distribución de los sectores en los que operan las empresas encuestadas dentro de la industria HVAC. Se observa que la mayoría (66.7%) se dedican a la climatización industrial, mientras que el 33.3% trabaja en las tres áreas (climatización residencial, industrial y refrigeración). No se registraron respuestas exclusivas para climatización residencial o refrigeración, lo que sugiere que las empresas encuestadas tienen un enfoque más amplio o especializado en el sector industrial.

- Pregunta # 3 ¿Su equipo cuenta con ingenieros especializados en sistemas HVAC?

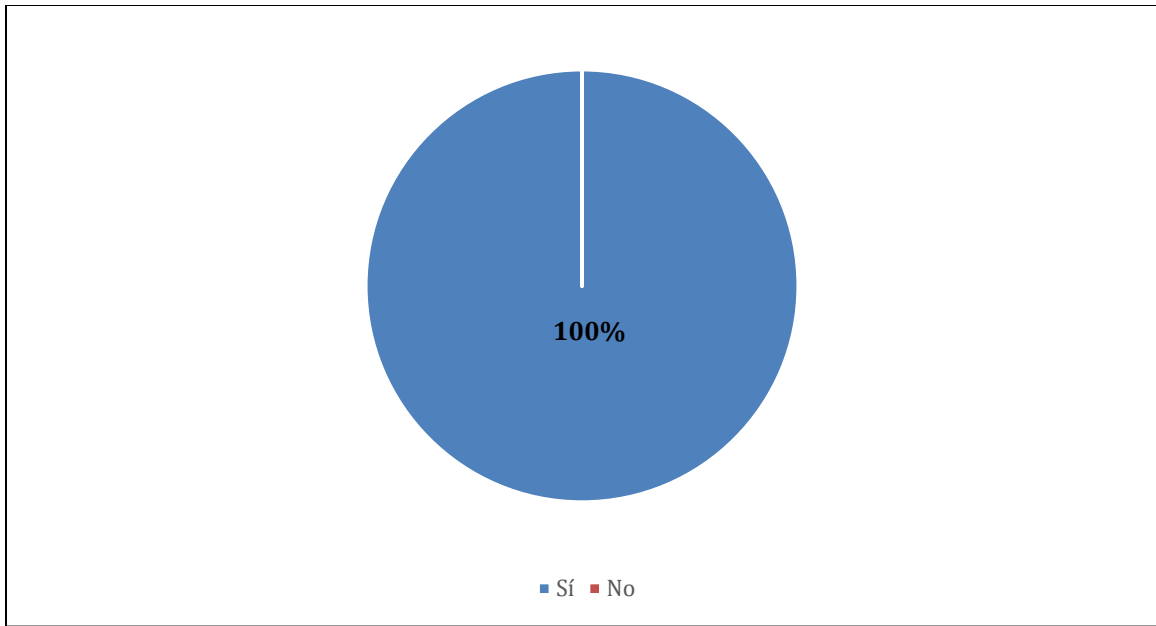


Figura 17 Pregunta # 7, encuesta realizada a empresas

La gráfica 3 indica que el 100% de las empresas encuestadas cuentan con ingenieros especializados en sistemas HVAC.

- Pregunta # 4 ¿Su equipo cuenta con técnicos especializados en cálculos psicrométricos?

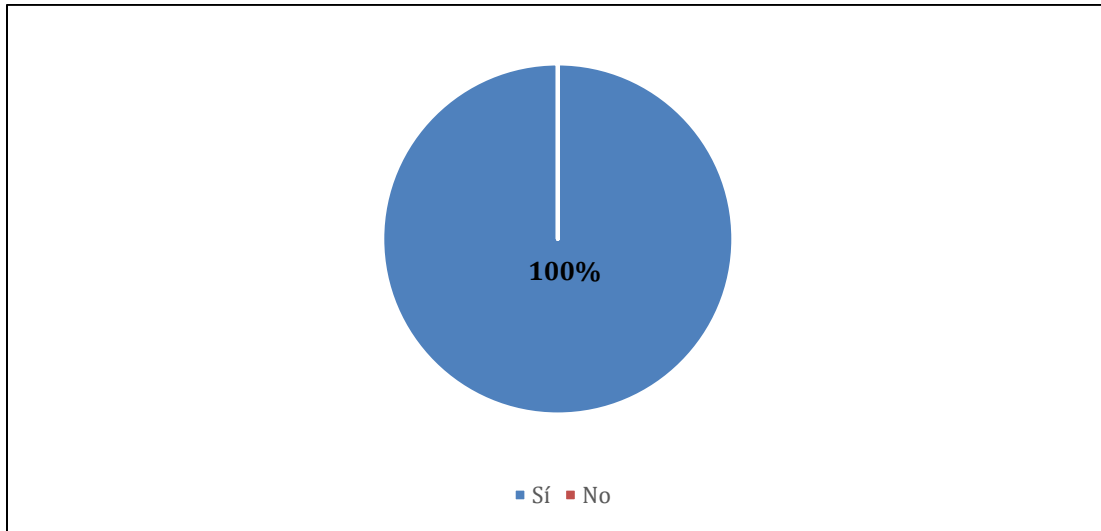


Figura 18 Pregunta # 7, encuesta realizada a empresas

La gráfica 4 indica que el 100% de las empresas encuestadas cuentan con técnicos especializados en cálculos psicrométricos dando a entender que tienen el conocimiento para utilizar el software y entender a profundidad.

- Pregunta # 5. ¿Qué funcionalidades considera esenciales en un software de cálculos psicrométricos?

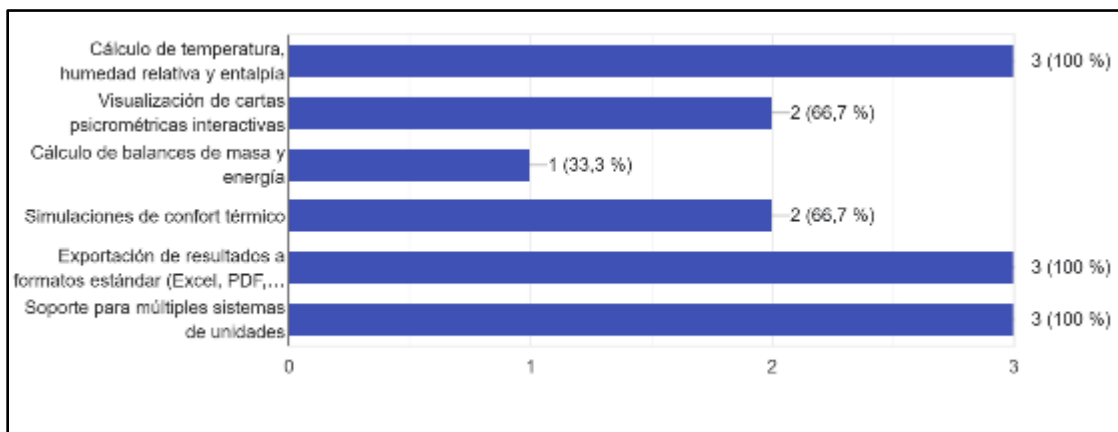


Figura 19 Pregunta # 7, encuesta realizada a empresas

El grafico 5 de barras muestra las funcionalidades que los usuarios consideran esenciales en un software de cálculos psicrométricos, con la posibilidad de seleccionar más de una opción. Los resultados reflejan que tres de las funcionalidades son consideradas fundamentales por el 100 % de los encuestados:

- Cálculo de temperatura, humedad relativa y entalpía, lo que sugiere que estas propiedades son básicas e imprescindibles en cualquier herramienta psicrométrica.
- Exportación de resultados a formatos estándar (Excel, PDF, etc.), lo que indica la necesidad de contar con opciones para almacenar y compartir datos de manera eficiente.
- Soporte para múltiples sistemas de unidades, lo cual es clave para garantizar la versatilidad del software y su aplicación en diferentes regiones o contextos industriales.

Otras funcionalidades también fueron bien valoradas:

- Visualización de cartas psicrométricas interactivas y simulaciones de confort térmico fueron seleccionadas por 66.7 % de los encuestados, lo que evidencia la importancia de herramientas gráficas y de simulación en la toma de decisiones.
- Cálculo de balances de masa y energía fue la opción con menor selección, con solo un 33.3 %, lo que podría indicar que esta funcionalidad es relevante solo para usuarios con necesidades más avanzadas.

Teniendo en cuenta lo anterior el software debe priorizar cálculos básicos de propiedades psicrométricas, ser compatible con múltiples sistemas de unidades y permitir la exportación de datos. Además, la inclusión de herramientas gráficas y simulaciones mejoraría la experiencia del usuario y su aplicabilidad en el sector HVAC.

- Pregunta # 6 ¿Qué nivel de personalización considera importante?



Figura 20 Pregunta # 7, encuesta realizada a empresas

La gráfica 6 muestra la importancia que los usuarios otorgan a la personalización dentro del software de cálculo psicrométrico.

- 100 % de los encuestados considera esencial contar con opciones para ajustar condiciones locales, lo que indica la necesidad de que el software permita adaptar parámetros como temperatura, humedad y otras variables a ubicaciones específicas.
- 66.7 % de los encuestados destaca la relevancia de la personalización de propiedades termodinámicas, como la presión atmosférica y la altitud, lo que sugiere que el software debe incluir configuraciones que permitan cálculos precisos según la ubicación geográfica.
- 66.7 % también valora la posibilidad de edición manual de puntos en los diagramas, lo que permitiría a los usuarios ajustar y visualizar información específica según sus necesidades.

Esto indica como los usuarios esperan una mayor flexibilidad y alcance en las características que pueda incluir el software

- Pregunta # 7 ¿Qué nivel de accesibilidad debe tener el software?

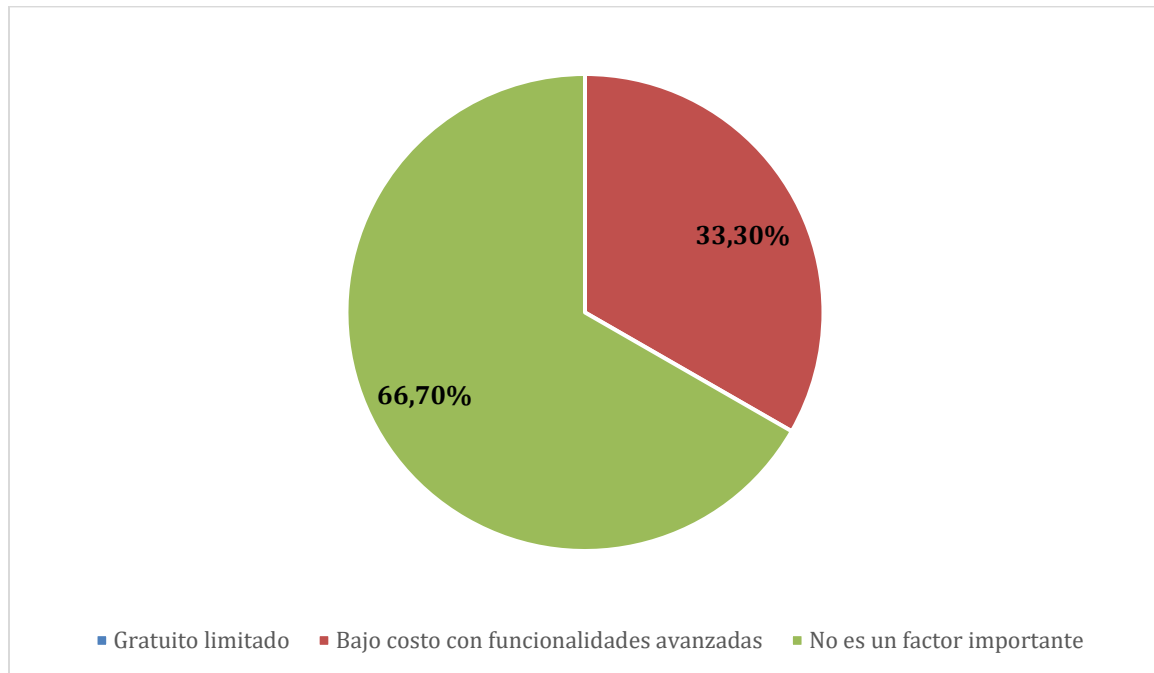


Figura 21 Pregunta # 7, encuesta realizada a empresas

La gráfica 7 revela que el 66.7 % de los encuestados considera que la accesibilidad del software no es un factor determinante, mientras que el 33.3 % prefiere que sea de bajo costo con funcionalidades avanzadas. Estos resultados sugieren que, si bien un modelo de software gratuito podría ser atractivo, los usuarios estarían dispuestos a pagar un costo accesible si esto les garantiza herramientas y funciones más avanzadas.

- Pregunta # 8 ¿Qué tan importante es la facilidad de uso para su equipo?

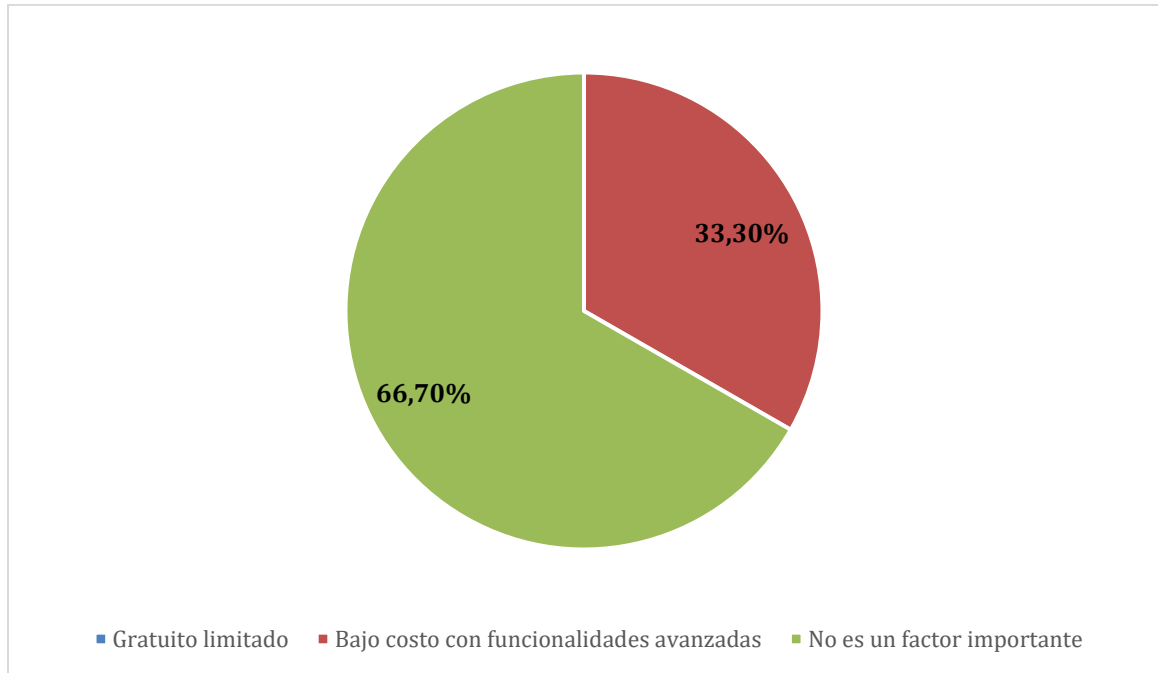


Figura 22 Pregunta # 8 ¿Qué tan importante es la facilidad de uso para su equipo?,

En la **Pregunta 8** de la encuesta aplicada a empresas del sector HVAC alineadas con ASHRAE, los resultados muestran que **el 66,70 %** de los participantes consideró que *no es un factor importante* (frente a otros criterios) y **el 33,30 %** priorizó opciones de *bajo costo con funcionalidades avanzadas*; ninguna empresa eligió la alternativa de *gratuito limitado*. Esto sugiere que, para la mayoría, la decisión sobre el software no está determinada principalmente por la facilidad de uso, sino por otros atributos como la precisión técnica, la cobertura funcional y el cumplimiento normativo; aun así, un tercio del mercado valora fuertemente soluciones costo-eficientes pero robustas, lo que respalda el desarrollo de una herramienta accesible y potente antes que una gratuita con capacidades restringidas.

- Pregunta # 9-10 ¿preferiría un software con una interfaz en idioma español?

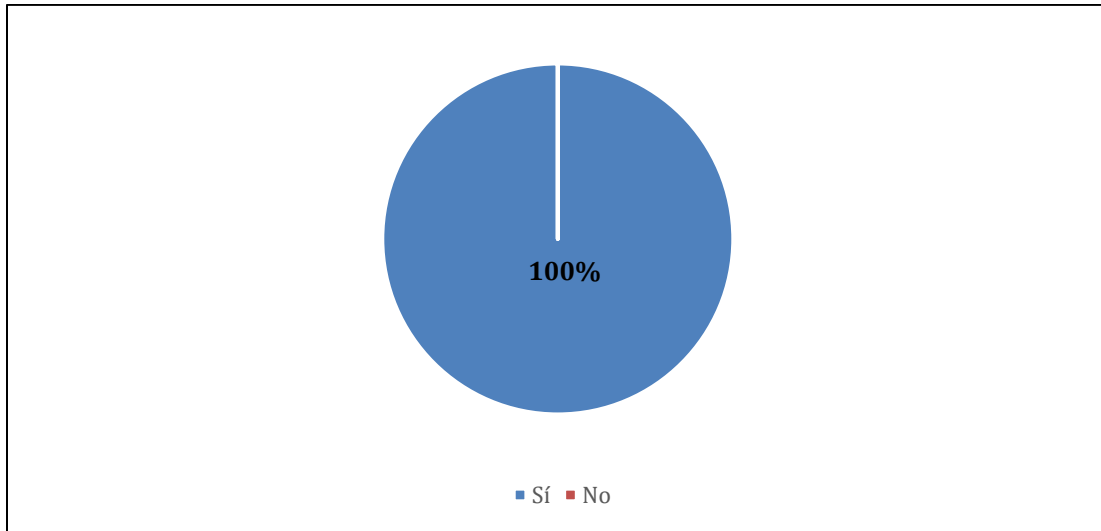


Figura 23 Pregunta # 10, encuesta realizada a empresas

la respuesta fue unánime: **el 100 % de las empresas encuestadas indicó “Sí”** y no se registraron respuestas negativas. Este resultado evidencia una exigencia clara de localización al español en el mercado objetivo y respalda que el desarrollo del aplicativo priorice una interfaz íntegramente en español, incluyendo menús, mensajes de error, ayuda contextual y documentación técnica. Atender este requisito favorece la adopción del software, reduce la carga de capacitación y minimiza errores operativos, manteniendo la terminología propia del sector HVAC y las directrices ASHRAE.

El gráfico 10 muestra la preferencia del idioma de la interfaz para los usuarios

- Pregunta # 11 ¿Qué medios de capacitación prefiere para aprender a usar el software?

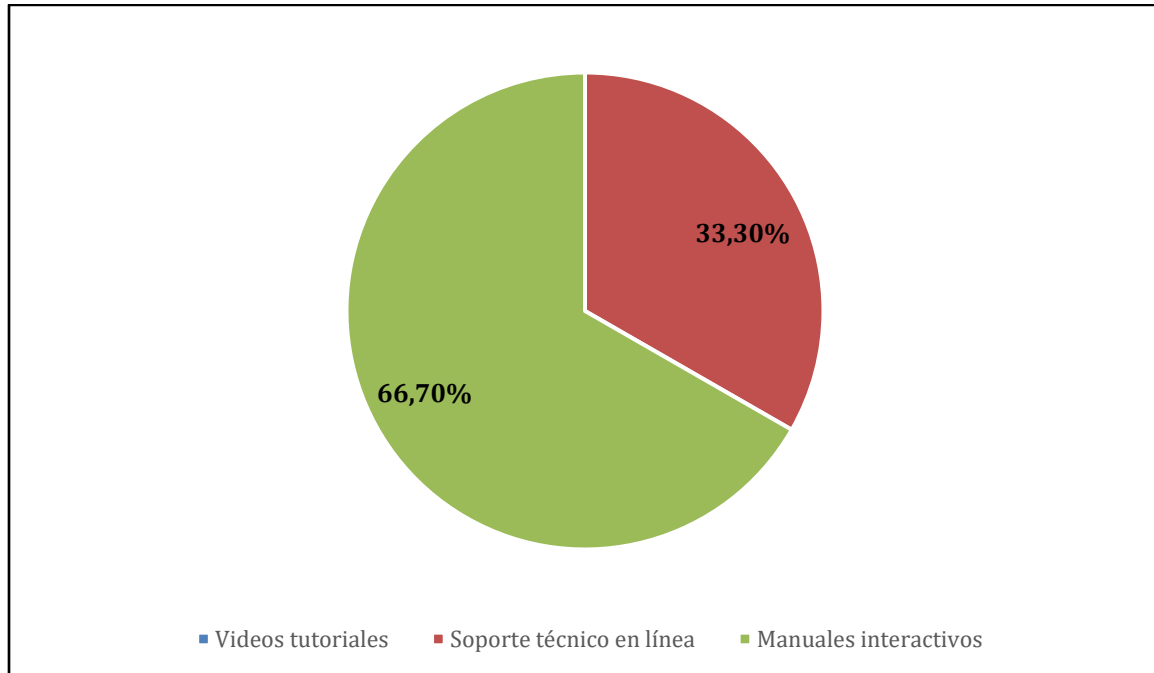


Figura 24 Pregunta # 11, encuesta realizada a empresas

Los resultados de la gráfica 11 muestran que el 66.7 % de los encuestados prefiere manuales interactivos como método de capacitación para aprender a utilizar el software, mientras que el 33.3 % opta por videos tutoriales. Esto indica una clara preferencia por materiales de autoaprendizaje estructurados y visuales. Dado que los manuales interactivos fueron la opción más seleccionada, se opta por desarrollar una documentación con ejemplos prácticos, ejercicios y elementos visuales que faciliten la comprensión. Además, los videos tutoriales pueden complementar este material, proporcionando explicaciones y demostraciones paso a paso del uso del software.

- Pregunta # 12 ¿Considera útil un módulo que permita realizar simulaciones específicas como mezcla de aires o humidificación/deshumidificación?

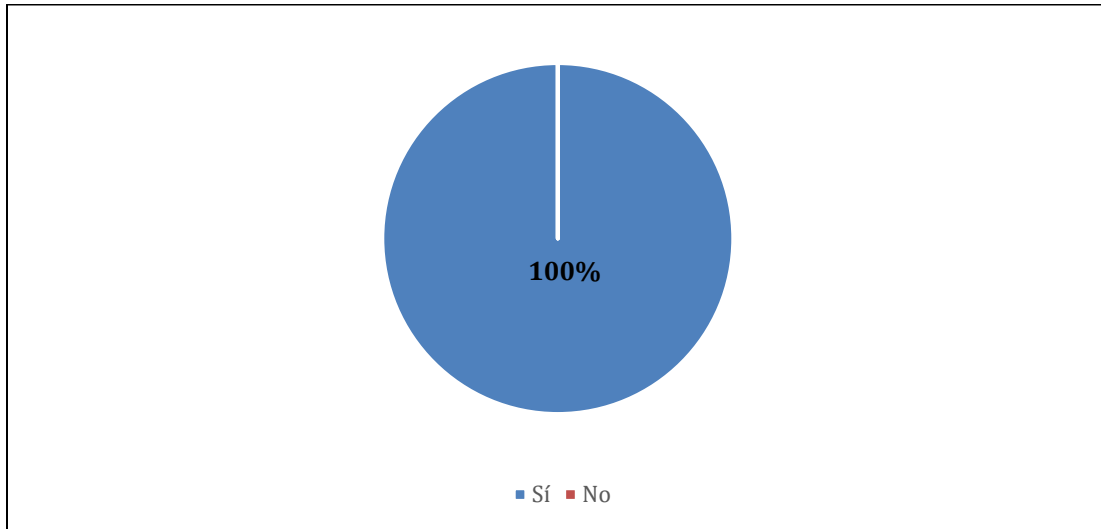


Figura 25 Pregunta # 12, encuesta realizada a empresas

En la gráfica 12 el 100 % de los encuestados considera útil un módulo de simulaciones para procesos como mezcla de aires y humidificación/deshumidificación. Esto sugiere que incluir estas funciones en el software aportaría un valor significativo a los usuarios, facilitando análisis más completos en sistemas HVAC.

- Pregunta # 13 ¿Considera útil un apartado donde la aplicación recomiende equipos según las condiciones ingresadas por el usuario?

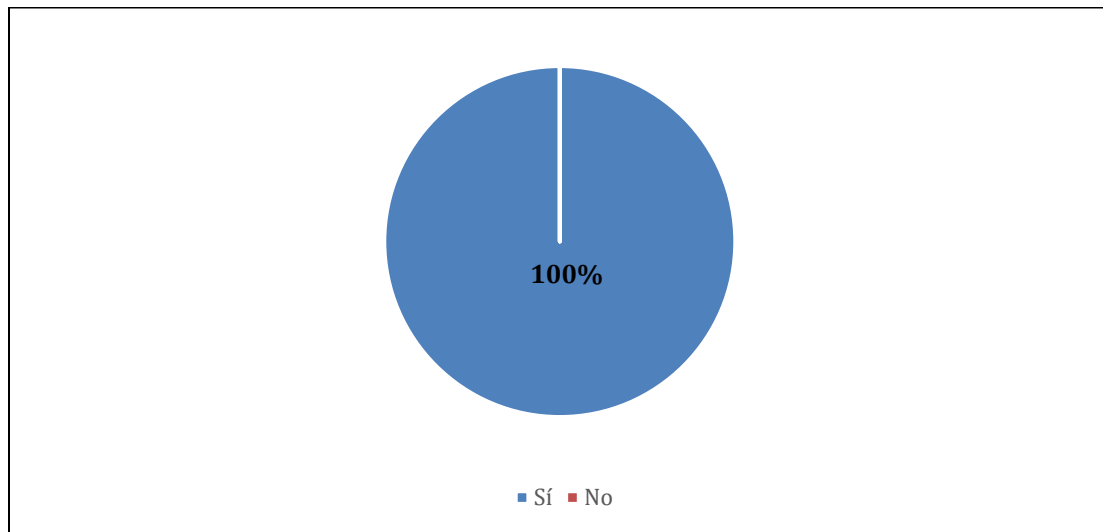


Figura 26 Pregunta # 13, encuesta realizada a empresas

En la gráfica 13 el 100 % de los encuestados considera útil que la aplicación recomiende equipos según las condiciones ingresadas. Esto indica que incluir un módulo de recomendación de equipos HVAC basado en parámetros psicrométricos mejoraría la funcionalidad del software, facilitando la toma de decisiones para los usuarios.

- Pregunta # 14 ¿Qué tan relevante es que el software pueda calcular a diferentes presiones atmosféricas, como en ciudades de gran altitud?

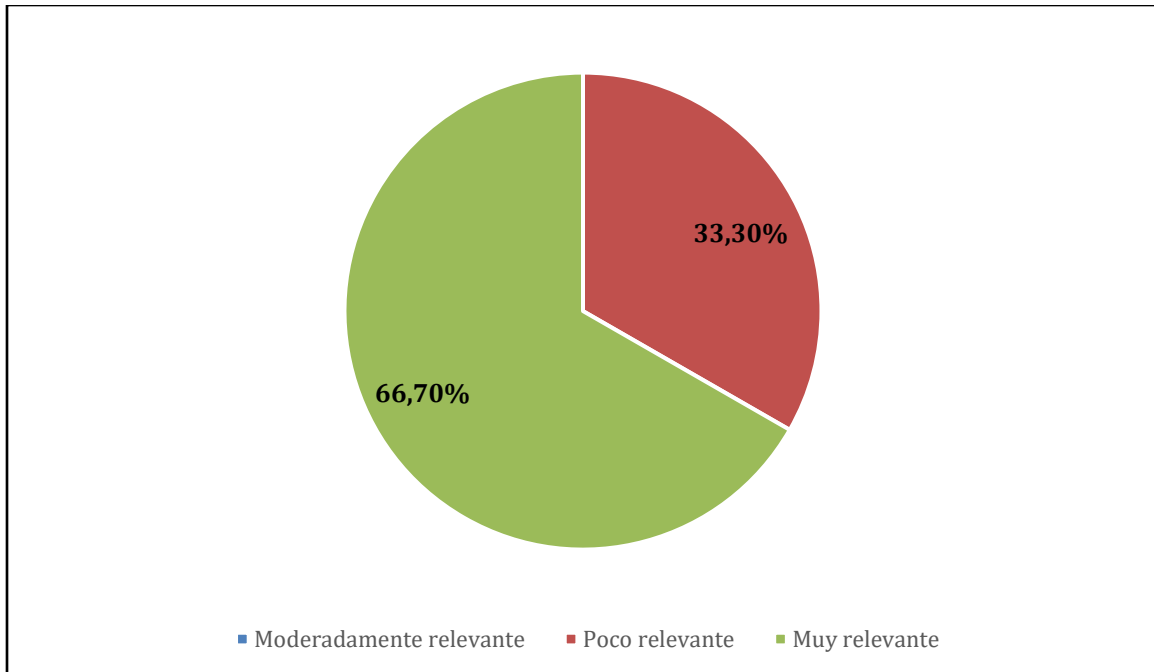


Figura 27 Pregunta # 14, encuesta realizada a empresas

El 66,7 % de los encuestados considera muy relevante que el software calcule a diferentes presiones atmosféricas según la ubicación, mientras que el 33,3 % lo ve como moderadamente relevante. Esto afirma la necesidad de incluir esta funcionalidad para mejorar la precisión en lugares/ciudades de gran altitud, adaptando así los cálculos a condiciones reales.

- Pregunta # 15 ¿Qué tan relevante es que el software pueda realizar cartas psicrométricas a diferentes presiones atmosféricas?

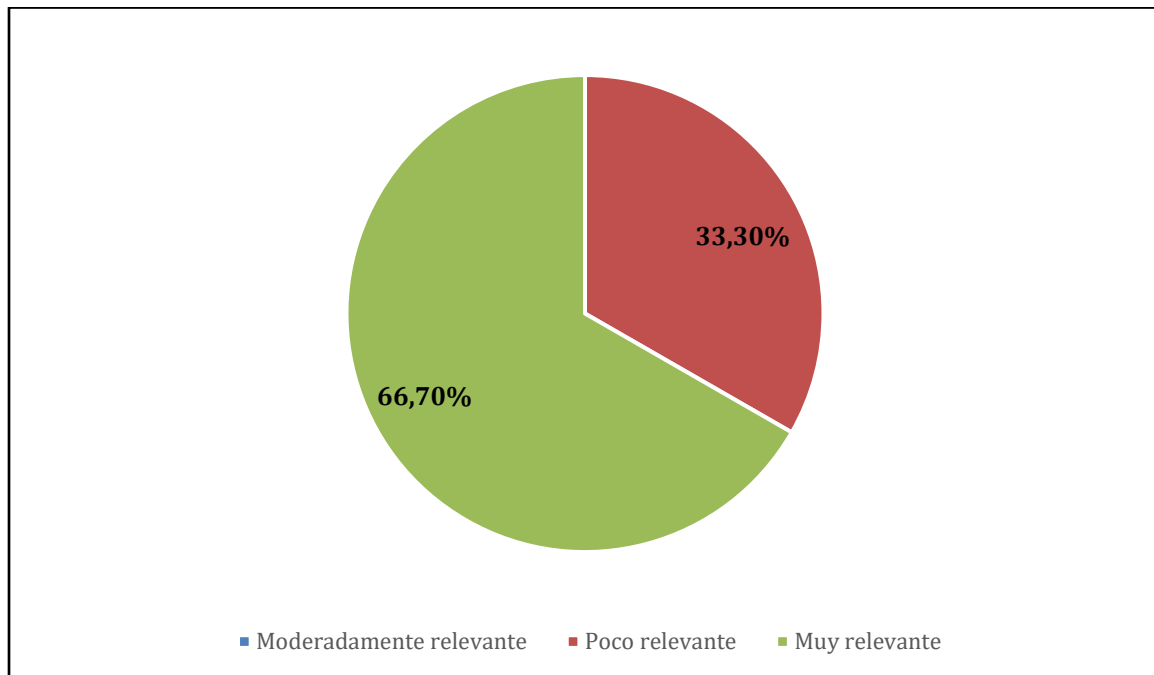


Figura 28 Pregunta # 15, encuesta realizada a empresas

En el grafico 15 se muestra como el 66,7 % de los encuestados considera muy relevante que el software genere cartas psicrométricas a diferentes presiones atmosféricas, y el 33,3 % lo ve como moderadamente relevante. Esto confirma que la capacidad de ajustar la presión atmosférica es una funcionalidad clave para el software, ya que afecta la precisión de los cálculos en distintas altitudes y condiciones operativas.

- Pregunta # 16 ¿Su equipo prefiere que el software esté disponible en que dispositivos?

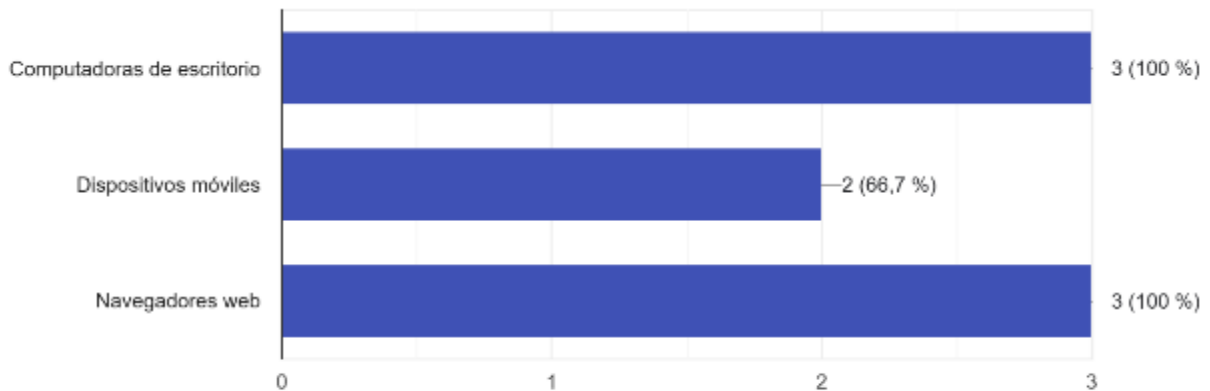


Figura 29 Pregunta # 16, encuesta realizada a empresas

El gráfico 16 muestra que los encuestados prefieren que el software esté disponible en computadoras de escritorio y navegadores web (100 %), y en menor medida en dispositivos móviles (66,7 %). Esto indica que la solución debe priorizarse para PC y web, asegurando compatibilidad y rendimiento en estos entornos, sin descartar una versión móvil para mayor accesibilidad.

- Pregunta #17 ¿Qué software utiliza actualmente para cálculos psicrométricos (si aplica)?

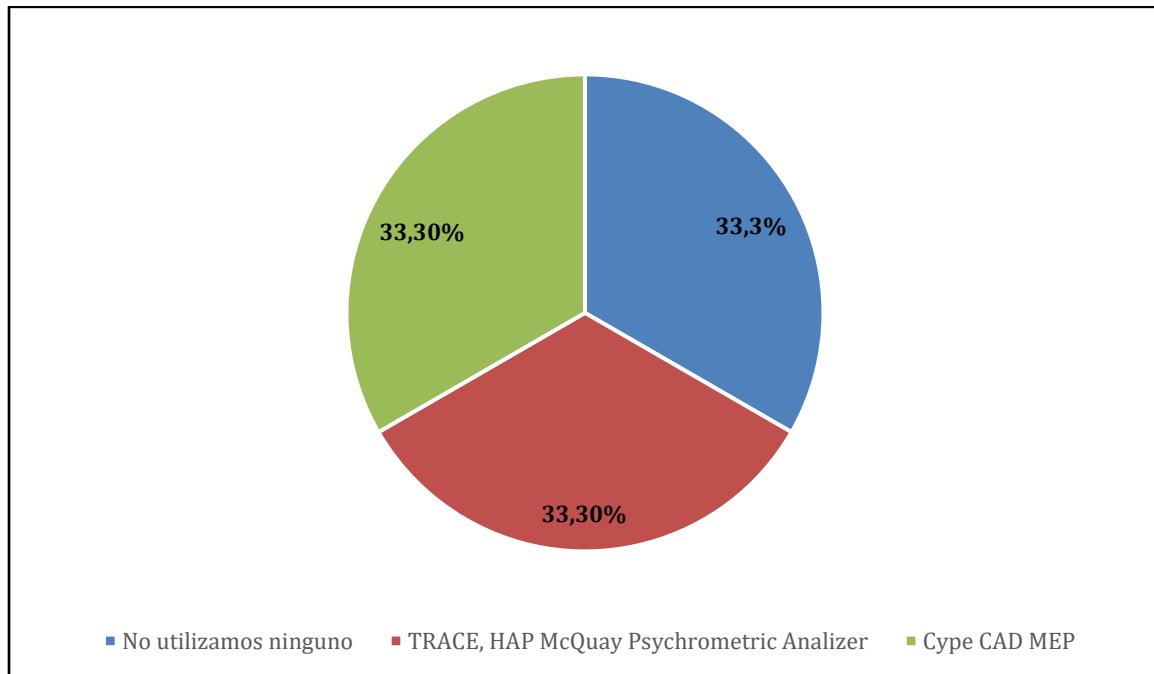


Figura 30 Pregunta # 17, encuesta realizada a empresas

El gráfico 17 muestra que los softwares utilizados para cálculos psicrométricos están divididos equitativamente entre tres opciones: herramientas comerciales como TRACE, HAP y McQuay Psychrometric Analyzer; Cype CAD MEP; y la ausencia de software especializado. Esto refuerza la necesidad de un software accesible y funcional para técnicos y empresas medianas y pequeñas del sector HVAC en Colombia.

Dado que una tercera parte de los encuestados no usa ningún software, se presenta la importancia de desarrollar una solución intuitiva y accesible. Además, la diversidad de herramientas comerciales sugiere que no existe una solución única que cubra todas las necesidades, lo que

abre la oportunidad para un software con características específicas que optimicen el proceso de cálculo psicrométrico.

En términos de implementación, esto sugiere que el software debe ser adaptable a distintas necesidades del usuario, ofreciendo una interfaz amigable y funcionalidades clave de los programas más utilizados, sin limitaciones de accesibilidad como las que presentan las opciones actuales.

- Pregunta # 18 ¿Estaría dispuesto a participar en pruebas de usuarios para el desarrollo de este software?

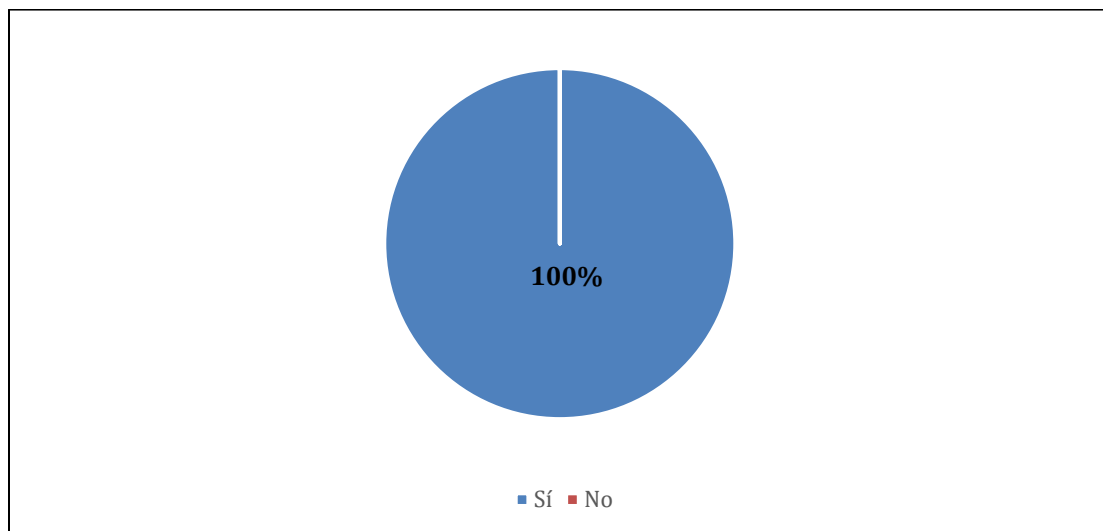


Figura 31 Pregunta # 18, encuesta realizada a empresas

El grafico 18 demuestra cómo el 100 % de los encuestados está dispuesto a participar en pruebas de usuario, lo que facilita la validación y mejora del software. Esto permite ajustar

funcionalidades según necesidades reales y optimizar su usabilidad, asegurando una mejor adopción en el sector HVAC.

5.1.2 Requerimientos Funcionales no funcionales

A partir de la comparación de los softwares existentes, el análisis de las respuestas obtenidas en las encuestas y la evaluación crítica de esta información, se elaboró un listado detallado de los requerimientos funcionales y no funcionales que el software debe cumplir. Este listado sirvió como punto de partida fundamental para la posterior fase de diseño del sistema, asegurando que la solución propuesta responda de manera efectiva a las necesidades identificadas.

Tabla 3 Requerimientos

Tipo	Código	Requerimiento	Descripción
Funcional	RF-01	Cálculos psicrométricos básicos	El sistema debe calcular propiedades como temperatura de rocío, humedad relativa, entalpía, volumen específico, etc.
Funcional	RF-02	Configuración de unidades	El sistema debe permitir la entrada y salida de datos en sistema internacional (SI) o imperiales.
Funcional	RF-03	Entrada de condiciones ambientales	El usuario debe poder ingresar temperatura, presión atmosférica y humedad relativa o bulbo húmedo.
Funcional	RF-04	Generar carta	El sistema debe generar una carta basada en los

		psicrométrica personalizada	datos ingresados, considerando la presión atmosférica o altitud.
Funcional	RF-05	Trazado de punto en la carta	El sistema debe ubicar los puntos de estado y trazar las líneas de procesos en la carta psicrométrica.
Funcional	RF-06	Tooltip de propiedades	Al pasar el cursor sobre un punto de la carta, deben mostrarse las propiedades psicrométricas en tiempo real.
Funcional	RF-07	Simulación de procesos psicrométricos	El sistema debe permitir simular los siguientes procesos psicrométricos: enfriamiento, deshumidificación, calefacción y humidificación.
Funcional	RF-08	Exportación de resultados	El sistema debe exportar los resultados a PDF o Excel, incluyendo datos, cálculos y la imagen de la carta psicrométrica.
Funcional	RF-10	Validación de datos	El sistema debe advertir si los datos ingresados son incoherentes o fuera de rango físico.
No funcional	RF-09	Gestión de proyectos	El sistema debe permitir guardar y cargar proyectos de trabajo en archivos locales.
No funcional	RNF- 01	Usabilidad	El sistema debe tener una interfaz amigable, intuitiva y de fácil navegación para técnicos e ingenieros.
No	RNF-	Rendimiento	El software debe mostrar resultados de manera

funcional	02		rápida (en menos de 3 segundos tras el ingreso de datos).
No funcional	RNF-03	Portabilidad	El sistema debe ser ejecutable en sistemas Windows.
No funcional	RNF-04	Estética visual	El software debe incluir opciones de modo oscuro y claro para mejorar la experiencia del usuario.
No funcional	RNF-05	Soporte multilingüe	El sistema debe permitir cambiar entre idioma español e inglés.
No funcional	RNF-06	Mantenimiento	El software debe incluir un manual que le explique el funcionamiento al usuario.

5.2: Selección de Ambiente de Desarrollo

La selección del ambiente de desarrollo es un aspecto clave en el diseño y desarrollo del aplicativo de software para el cálculo de propiedades psicrométricas. Inicialmente, se consideró el uso de Google Collab y Anaconda como entornos de desarrollo debido a su facilidad para ejecutar código en Python y su integración con herramientas de análisis de datos. Sin embargo, tras una evaluación más detallada, se decidió utilizar Visual Studio Code como entorno principal, ya que ofrece una mayor flexibilidad y compatibilidad con diferentes tecnologías para el desarrollo de aplicaciones de escritorio.

5.2.1 Lenguaje de Programación seleccionado

El lenguaje principal seleccionado para el desarrollo del software es Python, debido a su facilidad de uso, amplia comunidad de desarrolladores y la gran cantidad de bibliotecas

disponibles para el procesamiento de datos, interfaces gráficas y desarrollo web. Python permite una implementación flexible en distintos entornos, lo que facilita la adaptabilidad del software a aplicaciones de escritorio, web y móvil.

5.2.2 Frameworks y Bibliotecas Utilizadas

Dado que el desarrollo del software está pensado para aplicaciones de escritorio, se han seleccionado las tecnologías adecuadas para el entorno:

Aplicación de Escritorio

Para la versión de escritorio del software, se consideró el uso de **PyQt** o **Tkinter** como herramientas principales para el desarrollo de la interfaz gráfica. Ambas opciones ofrecen ventajas importantes que las hacen adecuadas según el nivel de complejidad, recursos disponibles y objetivos del proyecto.

Criterio	PyQt6	Tkinter
Aspecto visual	Interfaces modernas, profesionales y estéticamente más atractivas.	Interfaz básica y menos personalizable visualmente.
Componentes (widgets)	Amplia variedad de widgets avanzados (tablas, calendarios, árboles, etc.)	Widgets estándar básicos (botones, entradas, etiquetas, menús).
Diseño de interfaz	Compatible con Qt Designer (editor visual de interfaces).	Diseño manual en código; no hay editor visual oficial.
Licencia	GPL o comercial (restricciones en distribución sin código abierto).	Totalmente libre con licencia de Python (más permisiva).

Curva de aprendizaje	Media a alta: requiere dominar conceptos más avanzados como señales y slots.	Baja: más fácil para principiantes o desarrollos académicos rápidos.
Documentación y comunidad	Documentación oficial extensa y comunidad activa.	Poseé una Amplia comunidad, y aunque su documentación sea básica el acceso a la información por medios visuales es muy amplia.
Integración con otros módulos	Excelente integración con módulos de C++ y herramientas avanzadas.	Buena integración con bibliotecas comunes de Python (Matplotlib, etc.).
Compatibilidad multiplataforma	Excelente (Windows, macOS, Linux) con diseño consistente.	Es también multiplataforma, pero puede lucir diferente según el sistema.
Tamaño del ejecutable	Los ejecutables son más pesados.	Los ejecutables son más livianos.
Instalación	Requiere instalación por pip (a partir de la consola) y manejo de dependencias adicionales.	Viene preinstalado con Python.
Soporte de desarrollo moderno	Incluye soporte para temas oscuros, iconos SVG, DPI alto, etc.	Más limitado en funciones modernas sin trabajo adicional.

Tras analizar las características, ventajas y limitaciones de las bibliotecas disponibles para el desarrollo de interfaces gráficas en Python, se concluye que **Tkinter** es la opción más adecuada para este proyecto. Su facilidad de uso, integración nativa con Python, portabilidad entre

sistemas operativos y curva de aprendizaje reducida permiten centrar los esfuerzos del desarrollo en la lógica funcional y técnica del software, sin complicaciones asociadas a dependencias externas o restricciones de licencia. Además, **Tkinter** cumple con los requerimientos gráficos necesarios para el desarrollo del software, permitiendo la creación de formularios, botones, menús y gráficos integrados de manera eficiente. Por estas razones, se opta por utilizar **Tkinter** como la base para la interfaz gráfica de la versión de escritorio del software psicrométrico.

5.3 Diseño del Sistema

Diagrama de flujo

Adicionalmente, se diseñó un diagrama de flujo de secuencia para modelar el comportamiento del sistema frente a los principales procesos de interacción usuario-aplicativo. Este diagrama permite visualizar la secuencia de mensajes entre los distintos objetos durante la ejecución de funciones como el ingreso de datos, los cálculos psicrométricos y la generación de resultados. Su incorporación facilita la comprensión de la lógica operativa del sistema, la validación de los requisitos funcionales y la identificación temprana de posibles errores al momento del desarrollo del software.

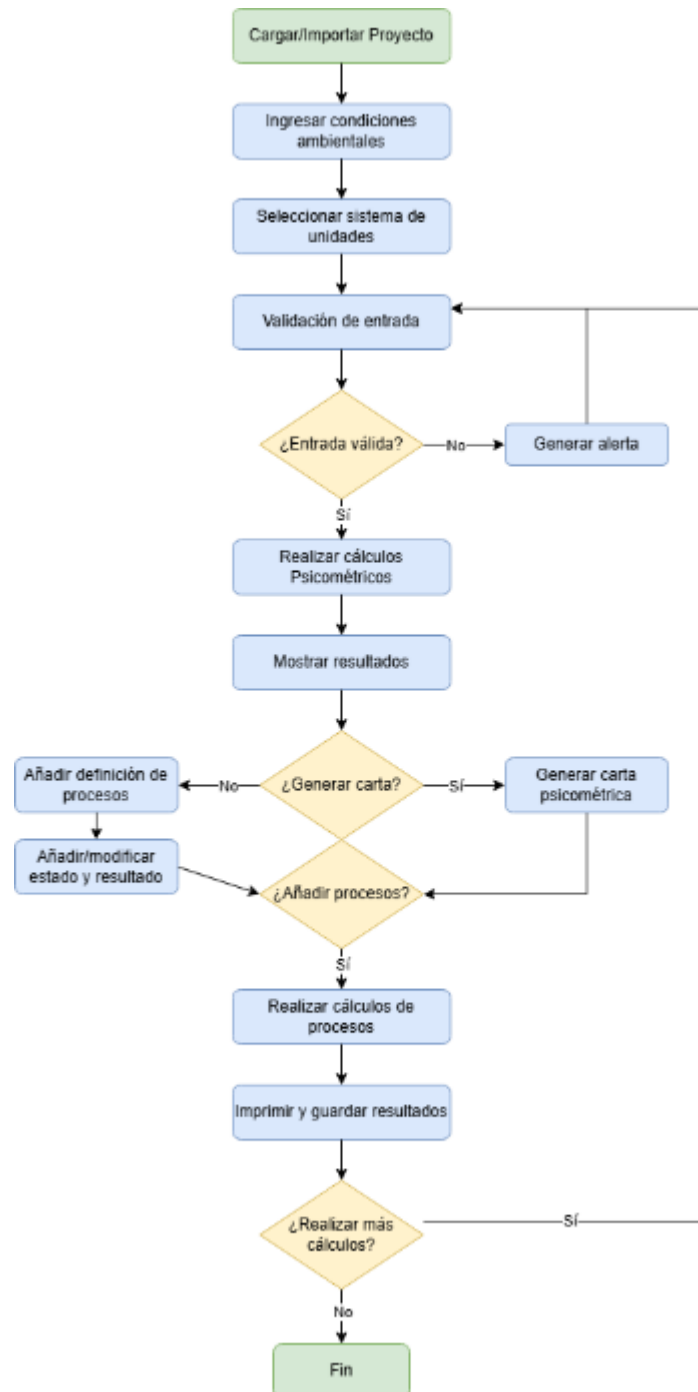


Figura 32 Diagrama de Flujo inicial

Diagrama de clase

El siguiente diagrama define las principales entidades involucradas, sus atributos, métodos y las relaciones entre ellas, asegurando un diseño orientado a objetos coherente y extensible. La utilización de este recurso facilita la transición a la implementación del sistema, garantiza el modularidad del código y proporciona una guía visual que respalda la mantenibilidad y escalabilidad futura del aplicativo.

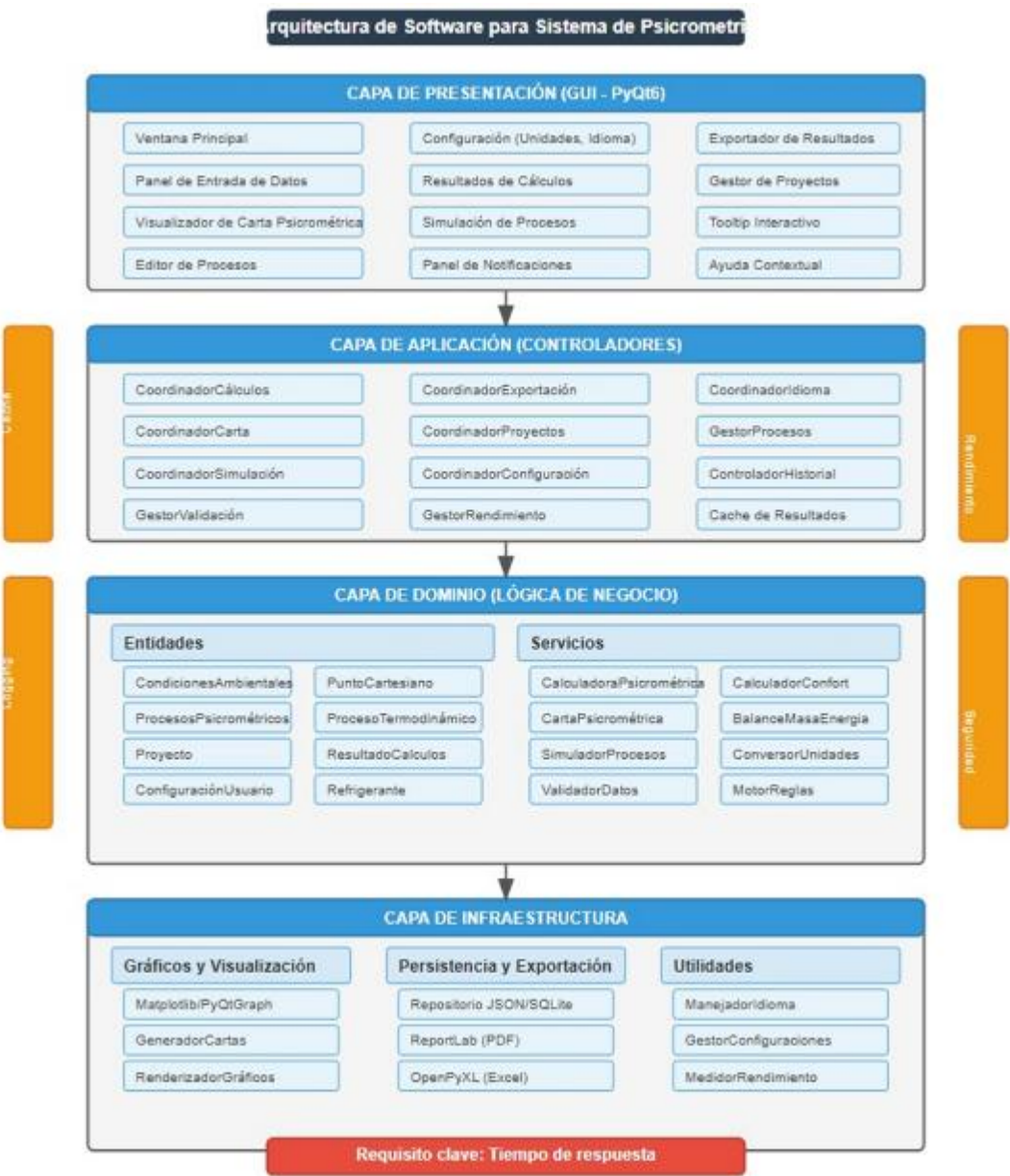


Figura 33 Diagrama de Clase Inicial

Arquitectura del Software para el Sistema Psicrométrico

Con el objetivo de garantizar la escalabilidad, mantenibilidad y claridad en el diseño del sistema propuesto, se adoptó una **arquitectura en capas** para el desarrollo del software psicrométrico.

Esta arquitectura está inspirada en el patrón clásico de diseño multicapa, el cual facilita la separación de responsabilidades, reduce el acoplamiento entre componentes y mejora la capacidad de evolución y prueba del sistema.

1. Capa de Presentación (GUI - PyQt6)

Esta capa corresponde a la **interfaz gráfica de usuario (GUI)**, desarrollada utilizando el framework **PyQt6**. Su función principal es permitir la interacción entre el usuario y el sistema, proporcionando un entorno intuitivo, organizado y visualmente claro para la introducción de datos, visualización de resultados y simulación de procesos psicrométricos.

Componentes destacados:

- Ventana Principal
- Panel de Entrada de Datos
- Visualizador de Carta Psicrométrica
- Editor de Procesos
- Resultados de Cálculos
- Simulación de Procesos
- Configuración (unidades, idioma)
- Exportador de Resultados (PDF, Excel)

- Panel de Notificaciones y Ayuda Contextual

Estos elementos están orientados a mejorar la experiencia de usuario, permitiendo una navegación clara y flexible, y garantizando compatibilidad con distintos flujos de trabajo.

2. Capa de Aplicación (Controladores)

La capa de aplicación actúa como un **punto entre la interfaz gráfica y la lógica de negocio**.

Su función es coordinar las operaciones solicitadas por el usuario, gestionando el flujo de datos, validaciones y llamadas a servicios del dominio. Los controladores están organizados por funcionalidad específica.

Ejemplos de controladores:

- Coordinador Cálculos
- Coordinador Simulación
- Gestor Procesos
- Controlador Historial
- Gestor Validación
- Coordinador Exportación
- Gestor Rendimiento

Esta capa encapsula la lógica de interacción, asegurando que la GUI permanezca independiente de las reglas del negocio y de los mecanismos de almacenamiento.

3. Capa de Dominio (Lógica de Negocio)

Corresponde al núcleo funcional del sistema, donde se implementan las reglas de negocio y los algoritmos psicrométricos. Incluye tanto las entidades que representan los objetos principales del dominio como los servicios que ejecutan los cálculos y simulaciones.

Entidades relevantes:

- Condiciones Ambientales
- Procesos Psicrométricos
- Resultado Cálculos
- Proyecto, Configuración Usuario, Refrigerante

Servicios implementados:

- Calculadora Psicrométrica: cálculo de propiedades termodinámicas del aire húmedo.
- Carta Psicrométrica: generación y visualización de gráficos.
- Simulador Procesos: modelado de procesos como humidificación, enfriamiento o mezcla.
- Calculador Confort: análisis de condiciones de confort.
- Balance Masa y Energía, Conversor Unidades, Validador Datos, entre otros.

Esta capa es completamente independiente del sistema de presentación y almacenamiento, lo cual facilita su prueba unitaria y su reutilización.

4. Capa de Infraestructura

Esta capa proporciona los mecanismos técnicos de soporte para la persistencia, visualización y configuración del sistema. Sirve de soporte transversal al resto de capas, gestionando la entrada/salida de datos y los recursos externos.

Subsistemas clave:

- Gráficos y Visualización: uso de bibliotecas como Matplotlib y PyQtGraph para renderizado de cartas y gráficos dinámicos.
- Persistencia y Exportación: permite almacenar proyectos en formatos JSON/SQLite y exportar resultados a PDF o Excel usando ReportLab y OpenPyXL.
- Utilidades: componentes auxiliares como gestor de idioma, configuraciones y medidor de rendimiento.

Consideraciones Transversales

El diagrama también resalta varios requisitos no funcionales:

- Tiempo de respuesta (prioridad clave): se busca garantizar que el sistema opere de forma eficiente incluso en equipos de recursos limitados.
- Usabilidad, Seguridad y Rendimiento: considerados en las decisiones de diseño, especialmente en los procesos de simulación e interacción en tiempo real.

5.4 Desarrollo del Software- Definición de propiedades y selección de método de análisis

En esta sección se describe detalladamente la implementación del software, desde la estructura de los módulos hasta los algoritmos, ecuaciones, y aspectos clave para el cálculo de las propiedades psicrométricas, generación de gráficos, evaluación de confort térmico y balance de

masa y energía. Para iniciar con el apartado del desarrollo de la aplicación tenemos que recordar algunos conceptos empezando desde la definición de cada una de las propiedades psicrométricas, el uso, así como la selección y justificación del método seleccionado para hallar cada una de estas e implementarlas en el software.

Propiedades psicrométricas:

Las propiedades psicrométricas son las variables termodinámicas que describen el comportamiento del aire húmedo, es decir, una mezcla de aire seco y vapor de agua. Estas propiedades permiten analizar procesos en los que interviene la transferencia de calor y masa entre el aire y el agua, lo que resulta esencial para el diseño, operación y control de sistemas HVAC (Heating, Ventilación and Air Conditioning). Entre las cuales tenemos

Propiedades termodinámicas: derivadas directamente del equilibrio termodinámico de la mezcla aire-vapor.

Propiedades psicrométricas derivadas: obtenidas a partir de relaciones entre las propiedades termodinámicas básicas.

5.4.1 Definición Propiedades psicrométricas y sus ecuaciones

A continuación, se presentará cada una de las propiedades psicrométricas junto con la definición de esta, así como el método seleccionado para hallar estas.

Temperatura de bulbo Seco

La temperatura de bulbo seco se mide utilizando un termómetro común, expuesto directamente al aire en un lugar ventilado y alejado de fuentes de calor radiante o humedad artificial, de modo que el sensor registre únicamente la temperatura del aire ambiente. Esta medición representa el valor térmico más básico del aire y es fundamental en psicrometría, ya que sirve como referencia para calcular otras propiedades del aire húmedo, como la humedad relativa, la entalpía, la temperatura de punto de rocío y la temperatura de bulbo húmedo. En conjunto con otras variables, la temperatura de bulbo seco permite ubicar el estado del aire en el diagrama psicrométrico y analizar procesos como enfriamiento, calefacción, humidificación y deshumidificación en sistemas de climatización y ventilación.

La temperatura de bulbo seco (TBS) se mide directamente utilizando un termómetro convencional, ya sea de mercurio, digital o de resistencia, expuesto al aire ambiente en condiciones de ventilación natural, alejado de fuentes de calor radiante o humedad. El sensor debe colocarse en un entorno donde el aire pueda circular libremente sobre él, sin contacto con humedad ni radiación solar directa, con el fin de registrar únicamente la temperatura térmica del aire (ASHRAE, 2017).

Temperatura de bulbo Húmedo

La temperatura de bulbo húmedo (Tbh) es la temperatura más baja que puede alcanzar una muestra de aire por enfriamiento evaporativo adiabático, es decir, por la evaporación del agua sin ganancia o pérdida de calor sensible con el entorno. Esta se mide envolviendo un termómetro con una mecha húmeda y exponiéndolo a un flujo de aire. El proceso de evaporación enfría el bulbo debido a la transferencia de energía en forma de calor latente.

Según ASHRAE 2017, "la temperatura de bulbo húmedo es una indicación de la capacidad del aire para absorber humedad mediante evaporación, y es clave en cálculos psicrométricos como la determinación de la humedad relativa, la entalpía y el punto de rocío".

Con el propósito de determinar el método más adecuado para calcular la temperatura de bulbo húmedo, se llevó a cabo un estudio comparativo entre las distintas metodologías disponibles.

Método de Stull (2011) – Aproximación directa empírica

Stull propuso una fórmula empírica válida para condiciones comunes (HR entre 5% y 99%, Tbs entre 0 y 50 °C), con un error menor al 0.3 °C:

$$T_{\{wb\}} \approx T_{bs} \cdot \arctan \left[0.151977 \cdot \sqrt{\{HR + 8.313659\}} \right] + \arctan(T_{bs} + HR) \\ - \arctan(HR - 1.676331) + 0.00391838 \cdot HR^{\left\{\frac{3}{2}\right\}} \\ \cdot \arctan(0.023101 \cdot HR) - 4.686035$$

En donde:

- **Tbs:** Temperatura de bulbo seco
- **HR:** Humedad relativa

Uso

- Es útil para software que requiera rapidez de cálculo sin iteración, pero tiene limitaciones fuera del rango normal. (HR entre 5% y 99%, Tbs entre 0 y 50 °C),

Método iterativo basado en la entalpía (ASHRAE)

El método presentado directamente desde el ASHRAE Handbook - Fundamentals (2017) es un establece un método preciso para el cálculo de la temperatura de bulbo húmedo a partir de la temperatura de bulbo seco, la presión atmosférica y la relación de humedad. Este método se basa en las siguientes tres ecuaciones:

1. Ecuación (21): Humedad de saturación (W_s) – ASHRAE Handbook 2021

$$W_s = 0.621945 \cdot \frac{\{P_{ws}\}}{\{P - P_{ws}\}}$$

- **Ws:** relación de humedad en saturación a la temperatura de bulbo húmedo (sin unidades)
- **Pws:** presión de saturación del agua a la temperatura de bulbo húmedo
- **P:** presión total del sistema

2.Ecuación (33): Relación de humedad (aire por encima de 0°C / 32 °F)

$$W = \frac{(1093 - 0.556 \cdot t^*) W_s - 0.24 \cdot (t - t^*)}{\{1093 + 0.444 \cdot t - t^*\}}$$

- **t:** temperatura de bulbo seco (°F)
- **t^*:** temperatura de bulbo húmedo (°F)
- **W:** relación de humedad (relación vapor/aire seco)
- **Ws:** relación de humedad a saturación (calculada con la ecuación 21)

3. Ecuación (35) Aire por debajo de congelacion ($t < 32^\circ \text{ F}$)

$$W = \frac{(1220 - 0.04 t^*) W_s - 0.24 (t - t^*)}{\{1220 + 0.444 t - 0.48 t^*\}}$$

Esta ecuación se aplica únicamente cuando ($t^* < 32^\circ \text{ F}$) considerando ajustes por el calor latente y específico del hielo.

Procedimiento de cálculo

1. Se parte de la temperatura de bulbo seco t , presión P y humedad relativa ϕ
2. Se calcula la presión parcial de vapor:

$$P_v = \phi * P_{\{vs\}}(t)$$

3. Se obtiene la relación de humedad de aire:

$$W = 0.621945 * \frac{\{P_v\}}{\{P - P_v\}}$$

4. Se itera sobre t^* (temperatura de bulbo húmedo) y se recalcula W_s y W hasta que W calculado con la ecuación (33) se aproxime el valor real obtenido en el paso 3

Este método es preciso, pero requiere iteración numérica, por lo que es más complejo de implementar manualmente, pero ideal para software.

Método psicrométrico clásico (con ecuación de transferencia de calor latente)

Basado en balances de energía entre calor sensible perdido por el aire y calor latente absorbido por la evaporación del agua en el bulbo húmedo:

$$T_{\{bs\}} - T_{\{wb\}} = \left(\frac{\{h_{\{fg\}}\}}{c_p} \right) \cdot \left(\frac{P_{\{vs\}}(T_{\{wb\}}) - P_v}{P - P_{\{vs\}}(T_{\{wb\}})} \right)$$

Variables:

- $P_{\{vs\}}(T_{\{wb\}})$: presión de saturación del agua a la temperatura de bulbo húmedo (se puede calcular con Antoine o Clausius-Clapeyron).
- P_v : presión parcial del vapor de agua.
- $h_{\{fg\}}$: calor latente de vaporización del agua.
- c_p : calor específico del aire a presión constante

Este método es más exacto teóricamente, pero también requiere resolución iterativa y precisión en los valores de presión, por lo cual es ideal en entornos computacionales.

Comparación de Métodos

Los métodos presentados se desarrollaron bajo el ambiente de Python para realizar una comparación de cada uno de estos y encontrar cual tiene una mayor precisión

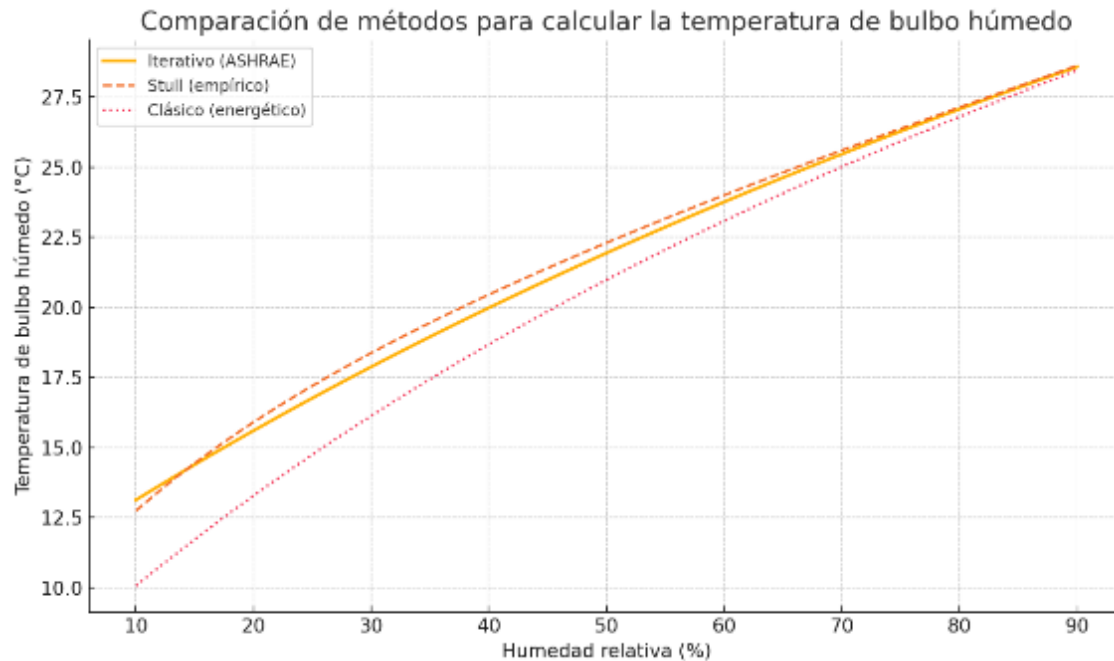


Figura 34 Grafica Comparativa de métodos Tbh

De la gráfica anterior se concluyó que el método presentado por ASHRAE es el que tiene una mayor precisión siendo el ideal para aplicar en el desarrollo del software propuesto en este documento.

Método	Precisión	Iteración	Software	Aplicación Manual
Iterativo con entalpía	Muy Alta	Si	Si (ideal)	No
Stull (empírico)	Moderada-Alta	No	Si (rápido)	Excelente
Psicrométrico clásico	Muy alta	Si	Si	No

Humedad Relativa

La humedad relativa (ϕ o HR) es el porcentaje de vapor de agua presente en el aire con respecto a la cantidad máxima que podría contener ese mismo aire a la misma temperatura, es decir, en condiciones de saturación.

Matemáticamente, se define como:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} * 100$$

Donde:

- P_v : Presión parcial de vapor de agua en el aire [Pa]
- P_{vs} : Presión de saturación del vapor de agua a la temperatura del aire [Pa]

Métodos para calcularla

1. A partir de la presión parcial y presión de saturación

Es el método más directo y preciso cuando se conoce la presión de vapor y la temperatura del aire:

$$\phi = \frac{P_v}{P_{vs}} * 100$$

Este enfoque se utiliza ampliamente en software de simulación psicrométrica cuando se conoce la presión de vapor, lo cual puede calcularse desde la relación de humedad W mediante:

$$P_w = \frac{W \cdot P}{0.621945 + W}$$

2. Desde temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo (psicrómetro)

Es el método clásico basado en la lectura simultanea de un termómetro de bulbo seco y uno húmedo. ASHRAE describe la siguiente ecuación aproximada, basada en un balance energético

$$\phi = \left\{ \frac{P_{\{ws\}}(T_{\{wb\}})^* - A \cdot P \cdot (T_{\{db\}} - T_{\{wb\}})}{P_{\{ws\}}(T_{\{db\}})} \right\} * 100$$

Variables:

- $T_{\{db\}}$: temperatura de bulbo seco [°C]
- $T_{\{wb\}}$: temperatura de bulbo húmedo [°C]
- P : presión atmosférica [Pa]
- A : constante psicrométrica (aproximadamente $0.00066 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
- $P_{\{ws\}}(T)$: presión de saturación del agua a la temperatura correspondiente
- ϕ : humedad relativa [%]

3. A partir de la presión parcial y presión de saturación

Cuando se conoce la relación de humedad W , se puede calcular la presión parcial de vapor:

$$P_v = \frac{W \cdot P}{0.621945 + W}$$

Luego se aplica la formula directa de humedad relativa:

$$\phi = \frac{P_v}{P_w(T)} * 100$$

Este es el método recomendado por ASHRAE en sus procedimientos psicrométricos tabulados y modelos computacionales

Humedad absoluta o específica

La humedad específica (también conocida como humedad absoluta en algunos contextos) es una propiedad termodinámica del aire húmedo que se define como la masa de vapor de agua contenida en una unidad de masa de aire seco. Se expresa comúnmente en kilogramos de vapor de agua por kilogramo de aire seco (kg / kg_{as}).

Según Çengel y Boles (2015), la humedad específica se puede derivar del **principio de Dalton de presiones parciales** aplicado a mezclas de gases ideales. El aire húmedo se considera una mezcla de dos gases ideales: aire seco y vapor de agua. La derivación parte del cociente de densidades parciales (o presiones parciales) de los componentes de la mezcla:

$$W = \frac{m_v}{m_a} = \frac{P_v \cdot M_v}{P_a \cdot M_a}$$

Usando el principio de dalton $P = P_v + P_a$ se obtiene la forma más usada:

$$W = 0.621945 * \frac{P_v \cdot M_v}{P_a \cdot M_a}$$

Donde:

- P_v : Presión parcial del vapor de agua [Pa]
- P : Presión total del sistema
- $M_v M_a$: masas molares del vapor de agua y del aire seco

- El factor de 0.621945 proviene de M_v/M_a

Ecuación de humedad específica

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \left\{ \frac{P_v V / R_v T}{P_a V / R_a T} \right\} = \left\{ \frac{P_v / R_v}{R_v / R_a} \right\} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

Matemáticamente, se expresa como:

$$\omega = \frac{m_v}{m_{as}} = 0.622 \frac{P_v}{P_a}$$

donde:

- Ω : es la humedad específica,
- m_v : es la masa del vapor de agua,
- m_{as} : es la masa de aire seco,
- P_v : es la presión parcial del vapor de agua,
- P_a : es la presión parcial del aire seco
- 0.622 es la constante que representa la razón entre las masas molares del vapor de agua y del aire seco.

Dado que la presión total del aire (P) es la suma de $P = P_v + P_a$ la fórmula puede reescribirse como:

$$\omega = 0.622 = \frac{P_v}{P - P_v}$$

Parámetros Básicos Según ASHRAE

La relación de humedad W (o relación de mezcla) de una muestra de aire húmedo se define como la relación entre la masa de vapor de agua y la masa de aire seco en la muestra:

$$W = \frac{M_w}{M_{da}}$$

W es igual a la relación de la fracción molar x_w / x_{da} multiplicada por la relación de las masas moleculares ($18,015268 / 28,966 = 0,621945$):

$$W = 0.621945 \frac{x_w}{x_{da}}$$

La humedad específica γ es la relación entre la masa de vapor de agua y la masa total de la muestra de aire húmedo:

$$\gamma = \frac{M_w}{(M_w + M_{da})}$$

En términos de la relación de humedad:

$$\gamma = \frac{W}{(1 + W)}$$

La humedad absoluta (o densidad de vapor de agua) d_v es la relación entre la masa de vapor de agua y el volumen total de la muestra:

$$dv = \frac{Mw}{V}$$

La densidad ρ de una mezcla de aire húmedo es la relación entre la masa y el volumen totales:

$$\rho = \frac{(Mda + Mw)}{V} = \left(\frac{1}{v}\right)(1 + W)$$

donde v es el volumen específico del aire húmedo, ft^3/lbda , según se define en la ecuación (24).

Entalpía del aire húmedo

Según Çengel y Boles (2015), la entalpía de una mezcla gaseosa se puede obtener sumando las contribuciones individuales de sus componentes:

- El aire seco se comporta como un gas ideal, con entalpía proporcional a la temperatura:

$$h_a = C_{pa} * T$$

- El vapor de agua, además de energía sensible, contiene energía asociada al cambio de fase (energía latente de vaporización):

$$h_v = h_{fg} + C_{pv} * T$$

Donde:

- T : temperatura del aire ($^{\circ}\text{C}$)
- C_{pa} : Calor específico del aire seco = $1.006 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} * K$

- C_{pv} : Calor específico del vapor de agua = $1.866 \frac{kJ}{kg} * K$
- h_{fg} : Calor latente de vaporización = $2501 \frac{kJ}{kg}$

Ecuación utilizada por ASHRAE

La fórmula adoptada por ASHRAE es prácticamente idéntica, con pequeños ajustes empíricos según el rango de temperatura, manteniendo:

$$h = 1.006 * T + W * (2501 + 1.89 * T)$$

Esta fórmula permite calcular la entalpía del aire húmedo en kJ/kg de aire seco para temperaturas en °C y humedad específica.

Aplicaciones de la entalpía en sistemas HVAC

- Determinación de cargas térmicas de calefacción o enfriamiento:

$$Q = \dot{m}a(h_2 - h_1)$$

- Cálculo de la eficiencia de intercambiadores de calor y torres de enfriamiento
- Simulación de procesos de humidificación o deshumidificación adiabática e isotérmica

La entalpía del aire húmedo es una de las propiedades más importantes en el análisis y diseño de sistemas HVAC. Su cálculo requiere únicamente la temperatura y la humedad específica, y

permite obtener de forma directa la energía total transportada por el flujo de aire. Su implementación en el software desarrollado será esencial para calcular cargas térmicas y visualizar transformaciones psicrométricas. Esta propiedad es fundamental para determinar cargas térmicas, diseñar equipos de climatización y realizar balances energéticos en sistemas psicrométricos.

Volumen específico del aire húmedo

El volumen específico es una propiedad termodinámica intensiva que se define como el volumen ocupado por una unidad de masa de una sustancia. Es la inversa de la densidad y se expresa matemáticamente como el cociente entre el volumen y la masa total de la sustancia.

Se expresa como:

$$v = \frac{V_{Total}}{m_{aire\ seco}} \left[\frac{m^3}{kg\ aire\ seco} \right]$$

Fundamento/ origen de la ecuación

Mezcla de dos gases ideales

A partir del concepto de mezclas de dos gases ideales tenemos que para el cálculo de propiedades psicrométricas con el aire húmedo está compuesto a partir de:

- **Aire seco:** gas base, comportamiento ideal
- **Vapor de agua:** gas adicional, también ideal en condiciones atmosféricas

Según la ley de los gases ideales se tiene que:

$$PV = nRT \rightarrow v \frac{RT}{P}$$

Donde:

- v : Volumen específico
- R : Constante específica del gas
- T : temperatura absoluta (K)
- P : presión total (pa)

Paso a paso de la Derivación desde gases ideales

1. Para el aire seco

$$v_a = \frac{R_a * T}{P}$$

Donde:

- $R_a = 287.055 \frac{J}{kg} * K$

2. Considerar/Agregar el vapor de agua

$$v_v = \frac{R_v * T}{P} \text{ con } R_v = 461.5 \frac{J}{kg} * K$$

3. Cálculo del volumen total por kg de aire seco

$$v = v_a + W * v_v = \frac{R_a \cdot T}{P} + W * \frac{R_v \cdot T}{P} + W = \frac{T}{P} (R_a + W \cdot R_v)$$

Donde:

- v: volumen total por unidad de masa de aire seco
- W: relación de humedad específica ($\frac{mv}{ma}$)
- T: temperatura absoluta [K]
- P: presión total del sistema [Pa]
- Ra: constante del gas para aire seco = $287.055 \frac{J}{kg} * K$
- Rv: constante del gas para vapor de agua = $461.5 \frac{J}{kg} * K$

4. Factor de conversión final

Factorizamos la ecuación y reemplazamos

$$v = \frac{R_a \cdot T}{P} * \left(1 + \frac{R_v}{R_a} * W \right)$$

Teniendo en cuenta que

$$\frac{R_v}{R_a} = \frac{461.5}{287.055} = 1.6078$$

Obtenemos la formula final después de factorizar y reemplazar los valores:

$$v = \frac{R_a \cdot T}{P} * (1 + 1.6078 * W)$$

Donde:

- v: volumen específico total del aire húmedo (por unidad de masa de aire seco)
- Ra: constante del gas para aire seco ($\approx 287.055 \text{ J}/\frac{\text{J}}{\text{kg}} * K$)
- T: temperatura absoluta [K]
- P: presión total [Pa]
- W: relación de humedad específica (masa de vapor por masa de aire seco)
- 1.6078: cociente aproximado $\frac{R_v}{R_a}$

Esta misma ecuación es presentada directamente por el ASHRAE Handbook derivada del mismo principio de mezcla de gases ideales. Por lo tanto, se tuvo en cuenta para el uso en el software al momento de conocer el volumen específico

Presión de saturación

La presión de saturación (P_{sat}) es la presión que ejerce el vapor de agua cuando el aire está completamente saturado a una temperatura dada. Es decir, es la presión máxima que puede tener el vapor de agua antes de que comience a condensarse a esa temperatura

Se utiliza para determinar si el vapor de agua en el aire está en condiciones de saturación, lo cual es esencial para calcular la humedad relativa y la temperatura de punto de rocío. Para determinar la presión de saturación del vapor de agua existen varios métodos, por lo tanto, se hizo un

análisis de los siguientes para verificar la confiabilidad de los resultados, así como evaluar en qué condiciones son ideales usarlos

1. Antonie

Descripción: Una de las ecuaciones más utilizadas por su simplicidad

$$\text{Log}_{10}(p) = A - \frac{B}{C + T}$$

Donde:

- A=8.07131
- B=1730.63
- C=233.426
- T: Temperatura en °C
- P: Presión

2. Tetens

$$P = 0.61078 \exp \left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right)$$

3. Goff gratch

$$\begin{aligned}
& \log_{10}(P_{sat}) * \\
& = -7.90298 * \left(\frac{373.16}{T_K} - 1 \right) + 5.02808 \cdot \log_{10} * \left(\frac{373.16}{T_K} \right) - 1.3816 \\
& \cdot 10^{\{-7\}} * \left(10^{11.344 \cdot 1 - \left(\frac{T_K}{373.16} \right)} - 1 \right) + 8.1328 \cdot 10^{\{-3\}} \\
& * \left(10^{\{-3.49149 \cdot \left(\frac{373.16}{T_K} - 1 \right)\}} - 1 \right) + \log_{10}(1013.246)
\end{aligned}$$

Esta fórmula es utilizada frecuentemente para calcular la presión de saturación del agua sobre una superficie plana de agua pura, recomendada por **WMO** (Organización Meteorológica Mundial) y **ASHRAE** en ciertos rangos de temperatura.

4. Magnus tetens Modificada

$$P_{sat} = 6.1094 * \exp \left(\frac{17.625 * T}{T + 243.04} \right)$$

5. Formulación de ASHRAE

Esta ecuación es una expresión polinómica empírica desarrollada por ASHRAE para calcular la presión de saturación del agua (Psat) como función de la **temperatura absoluta** T (en Kelvin).

- Es ampliamente utilizada en cálculos psicrométricos en sistemas HVAC, termodinámica y procesos industriales, ya que ofrece alta precisión en rangos amplios de temperatura.

- Los coeficientes C1, C2, ..., C9 son determinados experimentalmente y varían dependiendo del rango de temperatura (por ejemplo, si es agua líquida o hielo).

$$\ln(P_{\{sat\}}) = \frac{C_1}{T} + C_2 + C_3T + C_4T^2 + C_5T^3 + \ln(T) \cdot (C_6 + C_7T + C_8T^2 + C_9T^3)$$

Del análisis comparativo generado en Python con cada una de las ecuaciones se generó los siguientes resultados los cuales fueron organizados en data frame generado directamente en Python, de igual manera se generó un gráfico con la finalidad de revisar si se encontraba una variación con cada uno de los métodos.

Temp (°C)	Antoine	Tetens	Goff-Gratch	Magnus	ASHRAE
0	0.6056	0.6108	0.6103	0.6109	0.61121
5	0.8663	0.8723	0.8713	0.8716	0.87249
10	1.2211	1.2279	1.2264	1.2260	1.22800
15	1.6976	1.7053	1.7033	1.7020	1.70545
20	2.3296	2.3382	2.3358	2.3334	2.33880
25	3.1579	3.1677	3.1652	3.1617	3.16922
30	4.2317	4.2429	4.2406	4.2367	4.24603
35	5.6090	5.6225	5.6205	5.6176	5.62782
40	7.3584	7.3754	7.3738	7.3747	7.38346

45	9.5598	9.5822	9.5805	9.5904	9.59322
50	12.3056	12.3364	12.3334	12.3606	12.34986

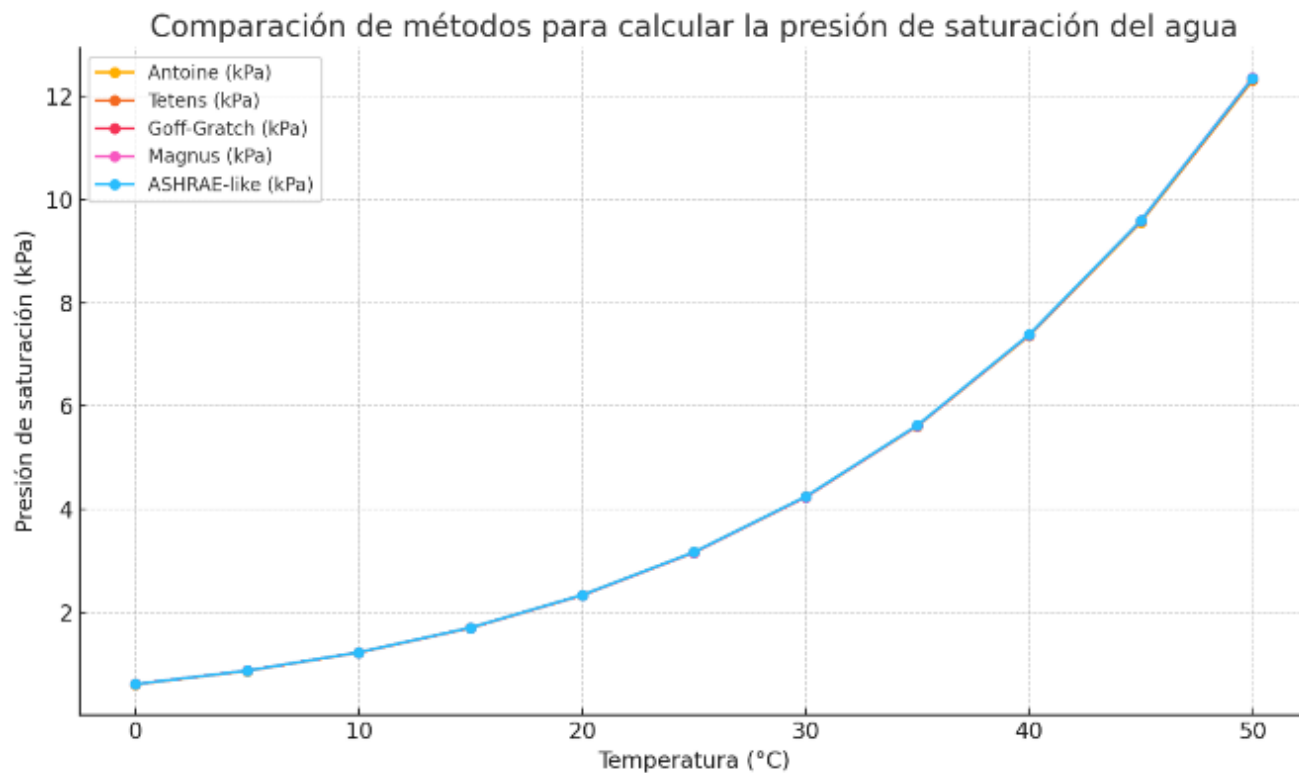


Figura 35 Comparación de métodos cálculo de Presión de saturación

Como resultado de estos análisis, se concluyó que todos los métodos evaluados presentan un comportamiento consistente, manteniéndose dentro de un rango de variación inferior a 0.065 °C. Esto demuestra que, en aplicaciones modernas, cualquiera de estos métodos puede considerarse adecuado para cálculos psicrométricos generales. No obstante, se optó por adoptar el método

propuesto por ASHRAE, con el objetivo de garantizar una mayor precisión y alinearse con los lineamientos técnicos reconocidos por la industria de la climatización.

Presión parcial de vapor de agua

La presión de vapor parcial del agua (P_v) en una mezcla de aire húmedo es la presión ejercida únicamente por el vapor de agua contenido en la mezcla, como si este ocupara solo el volumen del sistema, esta es fundamental en psicrometría debido a que Define el estado de saturación del aire y permite calcular las propiedades como lo son la humedad específica, la temperatura de rocío y la humedad relativa.

Según la ley de dalton para mezclas de gases ideales:

$$P = P_a + P_v$$

Donde:

- P : Presión total del aire húmedo
- P_a : Presión parcial del aire seco
- P_v : Presión parcial del vapor de agua

Cada componente ejerce una presión de forma independiente, y el vapor de agua se comporta como un gas ideal. Para calcular P_v (Presión parcial del vapor de agua) se tomó en cuenta 3 métodos comunes para calcular y determinar está teniendo en cuenta las distintas variables que presenta cada uno de los métodos.

1. Desde la humedad específica (W)

Formula general:

$$P_v = \frac{W * P}{0.621945 + W}$$

Donde:

- **W: Humedad** especifica [kg vapor/ kg aire seco]
- **P: Presión total del sistema (Pa o psi)**

Esta fórmula es la más precisa, directa y usada en cálculos psicrométricos. Esta se encuentra directamente en el ASHRAE Handbook y en los libros de Çengel como derivada de la relación de masas molares del aire seco y el vapor de agua. (Colocar demostración de la derivación)

Temperatura de punto rocío

La temperatura de punto de rocío (T_{dp}) es la temperatura a la cual una muestra de aire húmedo, enfriada a presión constante, se satura y comienza a condensar vapor de agua. Es un indicador directo de la cantidad de humedad presente en el aire, y se emplea frecuentemente en climatización, meteorología e ingeniería.

Según **Çengel y Boles (2015)**, el punto de rocío es el estado en el que el vapor de agua contenido en el aire alcanza la saturación al ser enfriado, sin que cambie la presión ni la cantidad de vapor.

"Cuando el aire húmedo se enfría a temperatura constante, el punto de rocío es alcanzado cuando la presión parcial del vapor de agua iguala la presión de saturación a esa temperatura."

— Çengel & Boles (2015), *Thermodynamics: An Engineering Approach*, Cap. 14

Esto implica:

$$P_v = P_{vs}(T) = P_v = P_{vs}(T_{dp})$$

Método de cálculo propuesto por ASHRAE

Ecuación 36 según el handbook- Definición fundamental del punto de rocío

$$P_{vs}(td) = \frac{P_v}{0.621945 + W}$$

Esta ecuación define la temperatura de punto de rocío como la temperatura a la cual la presión de saturación es igual a la presión parcial del vapor

- Requiere calculo iterativo de la temperatura de rocío con tal de cumplir la igualdad

Ecuación (37): Para puntos de rocío entre 32 °F y 200 °F

$$t_d = C_{\{14\}} + C_{\{15\}}\alpha + C_{\{16\}}^2\alpha + C_{\{17\}}^3\alpha + C_{\{18\}}^{\{0.1984\}}(P_w)$$

% Ecuación (38): Para puntos de rocío por debajo de 32 °F

$$t_d = 90.12 + 26.142 \alpha + 0.8927 \alpha^2$$

Donde:

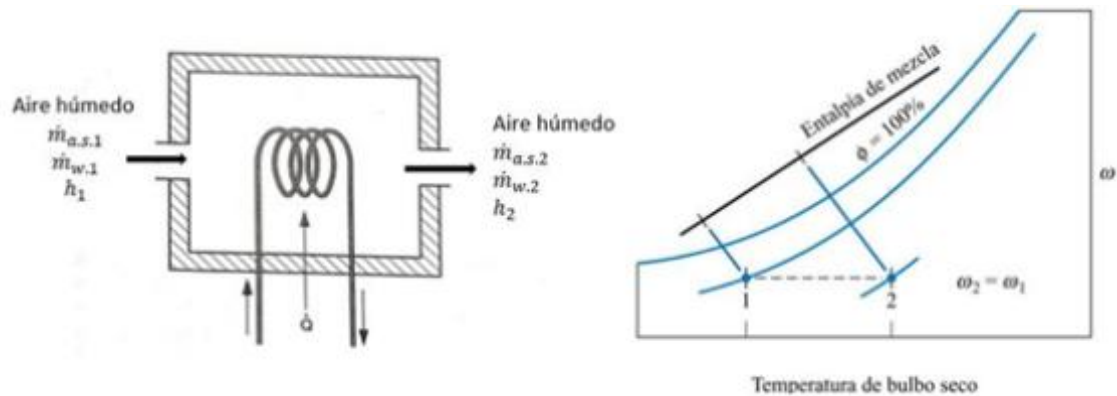
- t_d : temperatura de punto de rocío, en °F
- $\alpha = \ln P_w$
- P_w : presión parcial del vapor de agua, en psia
- $C_{14} = 100.45$
- $C_{15} = 33.193$
- $C_{16} = 2.319$
- $C_{17} = 0.17074$
- $C_{18} = 1.2063$

5.4.2 Definición Procesos psicrométricos y sus ecuaciones

Procesos simples

Calentamiento Sensible

El calentamiento sensible de aire húmedo es una operación que permite aumentar la temperatura de un volumen de aire húmedo al aportarle energía en forma de calor como se puede ver en la figura. Esta energía se refleja en un aumento de la temperatura y por lo tanto un cambio de calor sensible.



Este proceso se lleva a cabo mediante una fuente de calor seco que solo produzca cambio en el calor sensible, como hornos, serpentines, calentadores eléctricos.

En este proceso la humedad específica permanece constante, es decir, que ni se elimina ni se añade vapor. En cambio, en la humedad relativa sí que se produce una disminución, figura, debido a que la capacidad que presenta el aire de retener humedad aumenta con la temperatura.

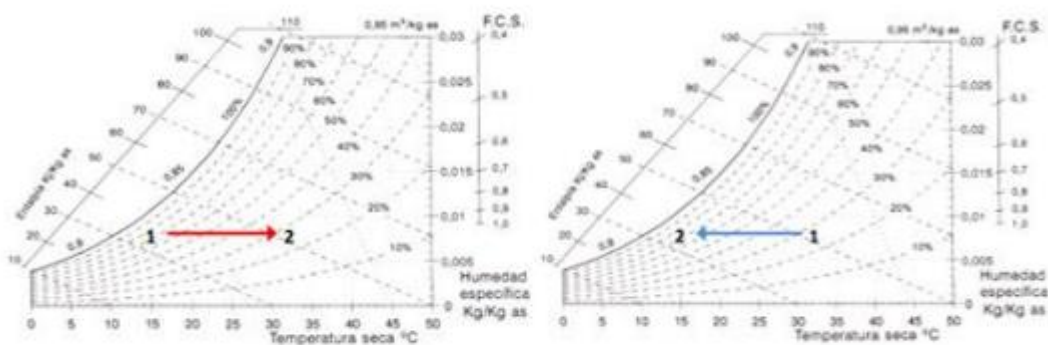


Figura 28. Procesos de calentamiento y enfriamiento sensible.

En la carta psicrométrica se representa como una línea horizontal, paralela a las líneas de humedad específica constante, debido a que solo se tiene calor sensible y no produce ningún cambio en la humedad, es decir en la cantidad de agua. Aplicando un balance de masa al sistema de los dos componentes se obtiene:

$$\text{Balance al aire seco} \rightarrow \dot{m}_{a.s.1} = \dot{m}_{a.s.2} = \dot{m}_{a.s.}$$

$$\text{Balance al vapor de agua} \rightarrow \dot{m}_{w.1} = \dot{m}_{w.2}$$

Demostración en la carta: Aumento de la temperatura de bulbo seco (TBS) del aire sin cambio apreciable

en la humedad absoluta ($W_2 = W_1$). En la carta: línea horizontal hacia la derecha.

- **Curva en la carta:** Línea horizontal hacia la derecha.
- **Condiciones:** Aumenta la **temperatura de bulbo seco**, la humedad relativa **disminuye**, pero la cantidad de vapor de agua no cambia.
- **Ejemplo:** Aire que pasa por un serpentín de calefacción.

Usos y equipos típicos:

- Calefactores eléctricos; serpentines de agua caliente o vapor.
- Post-calentamiento en UTA tras deshumidificación.
- Ganancias sensibles internas o solares (confort en invierno).

Ecuaciones – Unidades SI:

$$Q_s = \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T^2 - T^1)$$

$$[kW \text{ z si } m_{da} \text{ en } \frac{kg}{s}, c_p \text{ en } kJ/(kg \cdot K), T \text{ en } K \text{ o } ^\circ C]$$

Balance: $W_2 = W_1$ (no hay adición/condensación de humedad).

$$\Delta h \approx c_p \cdot (T^2 - T^1)$$

Donde:

- Q : Energía transferida [kW o kJ/s]
- m_a : Flujo másico de aire seco [kg/s]
- C_{pa} : calor específico del aire (1.005 kJ/kg.K)

Objetivo: Aumentar el confort en ambientes fríos o acondicionar el aire para evitar condensación en procesos industriales.

Notas / Consideraciones de aplicación

La humedad relativa ϕ disminuye al elevar T; verificar límites de confort (ASHRAE 55).

Enfriamiento sensible (W constante)

El proceso de enfriamiento sensible es muy similar, la única diferencia es que se disminuye la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa aumenta. Se utiliza un serpentín por donde circula un fluido refrigerante, con la precaución de que la temperatura de la superficie exterior del serpentín tiene que ser superior a la temperatura de rocío del aire para que no se produzca condensación de humedad y no aparezca el calor latente.

Demostración en la carta:

Disminución de TBS sin cambio de W (no hay condensación); en la carta: línea horizontal hacia la izquierda. Requiere que la superficie de enfriamiento esté por encima de $T_{\text{rocío}}$ del aire.

- **Curva en la carta:** Línea horizontal hacia la izquierda.
- **Condiciones:** Se mantiene constante la **humedad específica** (kg de vapor de agua/kg de aire seco).
- **Ejemplo:** Aire que pasa por un serpentín frío sin llegar al punto de rocío.

Calculo:

Para Enfriamiento (sensible)

- Condiciones: w (humedad específica) constante
- Datos requeridos: T_{bs1} y 2

Usos y equipos típicos:

- Serpentin frío operando por encima de T_{dp} del aire (solo sensible).
- Free-cooling/economizer con aire exterior más frío.
- Intercambiadores de calor sensibles.

El calor transferido en este proceso se obtiene tras realizar un balance de energía al sistema que es igual para ambos procesos, mediante la siguiente ecuación:

Ecuaciones – Unidades SI:

$$Q_s = \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T_2 - T_1), \text{ con } T_2 < T_1.$$

$$W_2 = W_1 \text{ (no hay condensado).}$$

$$\Delta h \approx c_p \cdot (T_2 - T_1) \text{ (solo sensible).}$$

Donde:

- Q : Energía transferida [kW o kJ/s]
- $\dot{m}_a$: Flujo másico de aire seco [kg/s]
- C_p : calor específico del aire (1.005 kJ/kg.K)

Objetivo: Mejorar confort térmico o preparación del aire para procesos posteriores como la deshumidificación.

Humidificación (aprox. isotérmica)

Definición: La humidificación isotérmica es un proceso en el que se incrementa el contenido de humedad del aire mediante la adición de vapor, sin que se produzca un cambio en su temperatura de bulbo seco. En la carta psicrométrica, este proceso se representa mediante una línea vertical ascendente, lo que indica un aumento en la humedad específica a temperatura constante. Este tipo de humidificación suele lograrse mediante la inyección controlada de vapor en sistemas donde se requiere mantener condiciones térmicas estables. El cálculo se realiza manteniendo constante la temperatura y determinando el nuevo valor de humedad específica, cumpliendo la

Condición T_{bs} constante, $w_2 > w_1$

demostración en la carta: Aumento de W añadiendo vapor/agua; idealmente $TBS \approx$ constante (proceso vertical ascendente en carta). En la práctica, el vapor caliente eleva algo T .

Usos y equipos típicos:

- Humidificadores de vapor (electrodos, resistencias, caldera).
- Humidificadores ultrasónicos o de evaporación con control de temperatura.
- Climatización de invierno para confort o procesos (museos, laboratorios).

Ecuaciones – Unidades SI:

$$\Delta W = (m_{\text{vapor}} / m_{\text{da}}).$$

$$Q_{\text{hum}} \approx m_{\text{da}} \cdot (W_2 - W_1) \cdot h_{fg}(T).$$

$$\text{Balance de entalpía total: } \Delta h = h_2 - h_1 \approx (W_2 - W_1) \cdot h_{fg} \text{ (si } T \text{ constante)}.$$

Donde:

- Q : Energía transferida [kW o kJ/s]
- m_a : Flujo másico de aire seco [kg/s]
- C_{pa} : calor específico del aire (1.005 kJ/kg.K)

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Mantener ϕ dentro de 40–60% para confort (ASHRAE 55).

Deshumidificación (ideal isotérmica)

Definición:

Se define como la Eliminación de parte del vapor de agua contenido en el aire, generalmente acompañado de enfriamiento.

Uso en la carta Psicrométrica: Reducción de W manteniendo TBS $\approx$ constante (vertical descendente en carta). Es ideal teórico: en la práctica requiere enfriamiento con condensación o desecante + reheat.

Usos y equipos típicos:

- Concepto base para separar la carga latente en cálculos.
- Implementaciones reales: coil con condensación + recalentamiento, o desecante químico.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_{da} \cdot (W_1 - W_2).$$

$$Q_{lat} \approx \dot{m}_{da} \cdot (W_1 - W_2) \cdot h_{fg}(T).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Normalmente se calcula dentro de procesos combinados (enfriamiento con deshumidificación o desecante).

Procesos combinados

Enfriamiento con deshumidificación (coil húmedo)

Definición: El enfriamiento y la deshumidificación simultáneos constituyen un proceso psicrométrico en el cual la temperatura del aire disminuye y al mismo tiempo, parte del vapor de agua que contiene se condensa. Este proceso se representa en la carta psicrométrica mediante una línea diagonal que desciende hacia la izquierda, finalizando en la curva de saturación.

Durante este recorrido, el aire pierde calor sensible y, al alcanzar su punto de rocío, comienza la eliminación de humedad en forma de agua condensada. Este fenómeno es común en sistemas de aire acondicionado, donde el aire es enfriado por debajo de su temperatura de rocío para reducir tanto su temperatura como su contenido de humedad, mejorando así el confort térmico en ambientes interiores.

Demostración en la carta:

El aire se enfría por debajo de su $T_{\text{rocío}}$ y condensa vapor: disminuyen TBS y W simultáneamente; trayectoria hacia curva de saturación en la carta.

Usos y equipos típicos:

- Serpentín DX o agua helada en verano para control de ϕ y T.
- Deshumidificadores por condensación.

Ecuaciones – Unidades SI: *Ecuaciones – Unidades SI:*

$$Q_t = \dot{m}_{da} \cdot (h_1 - h_2).$$

$$Q_s = \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2).$$

$$Q_{lat} = \dot{m}_{da} \cdot (W_1 - W_2) \cdot h_{fg}(T).$$

$$\dot{m}_{cond} = \dot{m}_{da} \cdot (W_1 - W_2).$$

$$SHR = \frac{\dot{Q}_s}{\dot{Q}_t}.$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- La salida puede ser saturada; frecuentemente se aplica reheat para ajustar ϕ de suministro.
- ADP (Apparatus Dew Point) y factor de bypass (BF) describen el desempeño del coil.

Calentamiento con humidificación

Definición: El calentamiento y la humidificación simultáneos conforman un proceso psicrométrico en el que el aire incrementa tanto su temperatura como su contenido de humedad. En la carta psicrométrica, este proceso se representa mediante una línea diagonal ascendente hacia la derecha, lo que indica un aumento conjunto de la energía térmica y de la humedad

específica. Este tipo de tratamiento del aire se presenta, por ejemplo, cuando se inyecta vapor de agua en una corriente de aire, lo que proporciona calor sensible y, al mismo tiempo, añade humedad en forma de vapor. Este proceso es utilizado en aplicaciones donde se requiere mantener condiciones de alta humedad y temperatura, como en ciertos procesos industriales, invernaderos o ambientes hospitalarios

Demostración en la carta: Incremento simultáneo de TBS y W (p. ej., inyección de vapor en UTA).

Usos y equipos típicos:

- Acondicionamiento en invierno (confort) y procesos sensibles a humedad.
- Humidificadores de vapor caliente con control de temperatura.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$Q_{tot} = \dot{m}_{da} \cdot [c_p \cdot (T_2 - T_1) + (W_2 - W_1) \cdot h_{fg}].$$

$$\dot{m}_{vapor} = \dot{m}_{da} \cdot (W_2 - W_1).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Controlar ϕ final (confort típico 40–60%).

Enfriamiento evaporativo directo (adiabático)

Definición: Se evapora agua en el aire: baja TBS y sube W; $h \approx$ constante; límite de enfriamiento $\approx T_{wb}$ inicial.

Usos y equipos típicos:

- Enfriadores evaporativos, panel húmedo, lavadores de aire en climas secos.
- Pre-enfriamiento de aire exterior sin compresión mecánica.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$h_2 \approx h_1 \text{ (proceso casi isoentálpico).}$$

$$c_p \cdot (T_1 - T_2) \approx (W_2 - W_1) \cdot h_{fg}.$$

$$\text{Eficacia: } \varepsilon = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_{wb,1}).$$

Notas / Consideraciones de aplicación

- Eficiencias típicas 70–90%; evita su uso si el ambiente está ya húmedo.

Enfriamiento evaporativo indirecto (IE)

Definición: Un intercambiador enfría el aire primario sin añadirle humedad, usando un flujo secundario que sí se humedece.

Usos y equipos típicos:

- sistemas de alta eficiencia en climas secos para Pre-enfriamiento de ventilación.

Ecuaciones – Unidades SI:

Aire primario: $Q_s = \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)$; $W \approx \text{constante}$.

Eficacia IE (aprox.): $\epsilon_{IE} = (T_1 - T_2)/(T_1 - T_{wb, sec})$

Notas / Consideraciones de aplicación:

Evaporativo indirecto-directo (IDE)

Definición: Secuencia: 1) IE para bajar T sin humedecer; 2) DE para bajar más T añadiendo humedad.

Usos y equipos típicos:

- Climas muy secos: lograr T_{supply} más baja que con DE solo.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$\text{Paso 1 (IE): } Q_{s1} = \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T_1 - T').$$

$$\text{Paso 2 (DE): } h_2 \approx h' \text{ y } c_p \cdot (T' - T_2) \approx (W_2 - W') \cdot h_{fg}.$$

Notas / Consideraciones de aplicación: ***Notas/ Consideraciones de aplicación:***

- Mayor complejidad; balance agua-energía favorable en climas áridos.

Calentamiento con deshumidificación (desecante adiabático)

Definición: Un rotor/lecho desecante retira vapor del aire liberando calor de sorción $\rightarrow$ baja W y sube T (aprox. adiabático). *Un rotor/lecho desecante retira vapor del aire liberando calor de sorción $\rightarrow$ baja W y sube T (aprox. adiabático).*

Usos y equipos típicos:

- Lograr humedades muy bajas (puntos de rocío bajos) en procesos críticos.
- Sistemas híbridos (desecante + enfriamiento) para control estricto de humedad.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$c_p \cdot (T_2 - T_1) \approx (W_1 - W_2) \cdot h_{fg} \text{ (ideal)}$$

$$m_{ads} = m_{da} \cdot (W_1 - W_2).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Requiere regeneración térmica del desecante (consumo energético en el lazo de regeneración)

Mezcla de corrientes de aire

La mezcla de corrientes de aire se define como el proceso mediante el cual se combinan dos flujos de aire con diferentes condiciones psicrométricas, como temperatura, humedad específica y entalpía. En la carta psicrométrica, este proceso se representa mediante un punto de mezcla que se encuentra ubicado sobre la línea recta que conecta los puntos correspondientes a cada una de las corrientes de aire, determinado por la proporción másica de cada flujo.

El resultado de esta mezcla es un equilibrio de propiedades psicrométricas, influenciado por los caudales de aire seco de cada corriente. Un ejemplo típico de este proceso es la combinación de aire exterior, usualmente frío y húmedo, con aire recirculado proveniente del interior, que tiende a ser más cálido y seco.

$$T_{\{mix\}} = \frac{m_1 \cdot T_1 + m_2 \cdot T_2}{m_1 + m_2}$$

$$w_{\{mix\}} = \frac{m_1 \cdot w_1 + m_2 \cdot w_2}{m_1 + m_2}$$

$$h_{\{mix\}} = \frac{m_1 \cdot h_1 + m_2 \cdot h_2}{m_1 + m_2}$$

Mezcla adiabática de corrientes de aire

Definición: Combina dos corrientes; el estado resultante cae en la recta que une ambos estados en la carta.

Usos y equipos típicos:

- Sección de mezcla en UTA (retorno + exterior).
- Bypass de serpentín para modular T y ϕ sin reheat.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$W_3 = (\dot{m}_1 \cdot W_1 + \dot{m}_2 \cdot W_2) / (\dot{m}_1 + \dot{m}_2).$$

$$h_3 = (\dot{m}_1 \cdot h_1 + \dot{m}_2 \cdot h_2) / (\dot{m}_1 + \dot{m}_2).$$

$$T_3 \text{ se obtiene de } (h_3, W_3).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

Asumir adiabático; verificar que no se alcance saturación accidental al mezclar. *Asumir adiabático; verificar que no se alcance saturación accidental al mezclar.*

Recalentamiento (reheat)

Definición: Elevar T tras un coil húmedo para ajustar ϕ/T de suministro sin añadir humedad.

Usos y equipos típicos:

Control de humedad de suministro tras deshumidificación en verano.

- Cumplimiento de setpoints de confort y control de condensación en difusores.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$Q_{reheat} = \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T_{supply} - T_{coil_out}).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- ASHRAE 90.1 limita reheat no recuperativo por eficiencia; preferir recuperación de calor.

Bypass de serpentín (coil bypass)

Definición: Frac. del aire evita el coil y se mezcla con el aire tratado para ajustar T y ϕ sin reheat

Usos y equipos típicos:

Control de SHR y humedad sin gasto adicional de reheat.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$h_{out} = BF \cdot h_{in} + (1 - BF) \cdot h_{ADP} \text{ (mezcla).}$$

BF = fracción de bypass; ADP

= Apparatus Dew Point (punto de la curva de saturación del coil).

Notas / Consideraciones de aplicación:

Requiere geometría/selección de coil adecuada; útil para modular ϕ de suministro.

Recuperación de calor sensible (HRV)

Definición: Intercambia calor sensible entre extracción y aire exterior sin transferir humedad.

Usos y equipos típicos:

- Cumplir ventilación con menor penalización energética (ASHRAE 62.1/90.1).

Ecuaciones – Unidades SI:

$$Q_{rec} = \varepsilon_s \cdot \dot{m}_{da} \cdot c_p \cdot (T_{exh} - T_{oa}).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Mejora eficiencia global; verificar heladas/purgas según clima.

Recuperación entálpica (ERV)

Definición: Transfiere sensible y latente (humedad) entre corrientes a través de medio permeable o rueda entálpica.

Usos y equipos típicos:

- Control de carga latente de ventilación; climas cálidos-húmedos o fríos-secos.

Ecuaciones – Unidades SI:

$$\Delta T_{rec} = \varepsilon_s \cdot (T_{exh} - T_{oa}); \Delta W_{rec} = \varepsilon_l \cdot (W_{exh} - W_{oa}).$$

$$Energía recuperada total \approx m_{da} \cdot (\Delta h) \text{ con eficiencias apropiadas.}$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Control de contaminación cruzada en aplicaciones sensibles (salud, laboratorios).

Saturación adiabática (modelo teórico)

Definición: Contacto prolongado aire-agua (washer ideal) hasta alcanzar T^* y W^* de saturación adiabática.

Usos y equipos típicos:

- Base teórica del enfriamiento evaporativo y del modelado de torres de enfriamiento

Ecuaciones – Unidades SI:

$$\text{Balance: } \dot{m}_{da} (h_1 - h_2) + \dot{m}_w (h_{w1} - h_{w2}) = 0.$$

$$\text{En el punto de equilibrio: } W_2 = W^* (a T^* \text{ en saturación}).$$

Notas / Consideraciones de aplicación:

- Si $T_{\text{agua}} \approx T_{\text{aire}}$, el proceso del aire es casi isoentálpico ($h \approx \text{const}$).

Observaciones finales y uso en diseño:

Los procesos anteriores se combinan para trazar ciclos de tratamiento de aire (verano/invierno) en carta psicrométrica y dimensionar equipos. Para desarrollo de software, se recomienda:

- Implementar funciones con entradas (T, ϕ, W, h, P) y salidas consistentes en los distintos sistemas de unidades SI/IP.
- Usar propiedades de aire húmedo de referencias fiables (p. ej., fórmulas de ASHRAE o librerías validadas).

- Verificar límites de validez de correlaciones y de gas ideal según el rango de operación.
- Incluir cálculos de mezclas, SHR, ADP y BF para coils húmedos, y eficiencias para HRV/ERV y evaporativos.

Normas: ASHRAE 55 (confort térmico), 62.1 (ventilación), 90.1 (eficiencia energética), ASHRAE Handbook – Fundamentals (cap. de Psychometrics) y Systems & Equipment (sección de equipos).

5. Proceso de condensación

La condensación es un proceso que ocurre cuando el aire se enfría por debajo de su temperatura de rocío, provocando que el vapor de agua contenido en él se condense y se transforme en agua líquida. En la carta psicrométrica, este proceso se representa mediante una trayectoria que se desplaza hacia la izquierda, siguiendo una línea de enfriamiento sensible hasta alcanzar la curva de saturación.

A partir de este punto, el trayecto continúa de forma vertical descendente, lo que indica una disminución de la humedad absoluta mientras la temperatura permanece constante. Este

comportamiento refleja la eliminación del contenido de humedad del aire en forma de condensado, proceso común en equipos de climatización como serpentines de enfriamiento.

Se puede calcular a partir de:

$$m_{aguacond} = * (w_1 - w_2)$$

$$Q = m_{aguacond} * (h_v)$$

5.4.3 Selección de método inicial y desarrollo en Python

En el software se implementan las **tres situaciones de cálculo recomendadas por ASHRAE** para aire húmedo, a fin de garantizar consistencia con sus ecuaciones y tablas:

Situación 1 (t, t*, p)

Se parte de la temperatura de bulbo seco t , la de bulbo húmedo t^* , y la presión p ; con la presión de saturación a t^* se determinan W , ϕ , v , h , p_n y t_e (pudiendo obtener t_e /dew point con las ecuaciones indicadas), siendo el enfoque idóneo cuando se dispone de psicrómetro.

SITUATION 1.

Given: Dry-bulb temperature t , Wet-bulb temperature t^* , Pressure p

To Obtain	Use	Comments
$p_{ws}(t^*)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t^*
W_s^*	Equation (21)	Using $p_{ws}(t^*)$
W	Equation (33) or (35)	
$p_{ws}(t)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t
W_s	Equation (21)	Using $p_{ws}(t)$
ϕ	Equation (23)	Using $p_{ws}(t)$
v	Equation (26)	
h	Equation (30)	
p_w	Equation (36)	
t_d	Table 3 with Equation (36), (37), or (38)	

Situación 2 (t , t_e , p)

Con t y la **temperatura de rocío** t_e se fija directamente $p_n = p_s(t_e)$ y, a partir de allí, se calculan

W , ϕ , v y h ; si se requiere t^* , este se obtiene por tanteo o método numérico.

SITUATION 2.

Given: Dry-bulb temperature t , Dew-point temperature t_d , Pressure p

To Obtain	Use	Comments
$p_w = p_{ws}(t_d)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t_d
W	Equation (20)	
$p_{ws}(t)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t
W_s	Equation (21)	Using $p_{ws}(t)$
ϕ	Equation (23)	Using $p_{ws}(t)$
v	Equation (26)	
h	Equation (30)	
t^*	Equation (21) and (33) or (35) with Table 3 or with Equation (5) or (6)	Requires trial-and-error or numerical solution method

Situación 3 (t , ϕ , p)

Con t y **humedad relativa** ϕ (muy común en instrumentación actual) se usa $p_s(t)$ para evaluar p_n

y derivar W , v , h y t_e ; la t^* nuevamente se resuelve iterativamente. Estas tres rutas cubren los

conjuntos de datos de entrada más frecuentes en campo y constituyen los **modos de entrada oficiales del aplicativo**, manteniendo trazabilidad con ASHRAE y control de rangos en SI e inglés.

SITUATION 3.

Given: Dry-bulb temperature t , Relative humidity ϕ , Pressure p

To Obtain	Use	Comments
$p_{ws}(t)$	Table 3 or Equation (5) or (6)	Sat. press. for temp. t
p_w	Equation (22)	
W	Equation (20)	
W_s	Equation (21)	Using $p_{ws}(t)$
v	Equation (26)	
h	Equation (30)	
t_d	Table 3 with Equation (36), (37), or (38)	
t^*	Equation (21) and (33) or (35) with Table 3 or with Equation (5) or (6)	Requires trial-and-error or numerical solution method

Al momento de desarrollar el software se optó por seleccionar inicialmente la situación número 3 en la cual el usuario ingresara la temperatura de bulbo seco, La humedad relativa en el ambiente y la presión con respecto al nivel del mar. Esta primera decisión se tomó debido a la facilidad de obtener los datos de la temperatura de bulbo seco, así como conocer la humedad relativa a partir de higrómetros. Al tener en cuenta este modelo se procedió a implementar la primera parte del software la cual consta de la solicitud de datos al usuario, así como la selección del sistema de unidades a manejar para la entrega de resultados. El posterior calculo se realizó con los métodos previamente seleccionados implementando cada uno de estos en el ambiente de desarrollo Python haciendo uso de Visual studio code

5.4 Desarrollo del aplicativo

Para el desarrollo del software en sí y de su interfaz gráfica se tuvo en cuenta los requerimientos proporcionados por el cliente dado a partir de un estudio de encuestas y de la revisión bibliográfica de los softwares existentes.

5.4.2 Requerimientos Funcionales no funcionales

A partir de la comparación de los softwares existentes, el análisis de las respuestas obtenidas en las encuestas y la evaluación crítica de esta información, se elaboró un listado detallado de los requerimientos funcionales y no funcionales que el software debe cumplir. Este listado sirvió como punto de partida fundamental para la posterior fase de diseño del sistema, asegurando que la solución propuesta responda de manera efectiva a las necesidades identificadas.

Tabla 3 Requerimientos

Tipo	Código	Requerimiento	Descripción
Funcional	RF-01	Cálculos psicrométricos básicos	El sistema debe calcular propiedades como temperatura de rocío, humedad relativa, entalpía, volumen específico, etc.
Funcional	RF-02	Configuración de unidades	El sistema debe permitir la entrada y salida de datos en sistema internacional (SI) o imperiales.
Funcional	RF-03	Entrada de condiciones ambientales	El usuario debe poder ingresar temperatura, presión atmosférica y humedad relativa o bulbo húmedo.
Funcional	RF-04	Generar carta	El sistema debe generar una carta basada

		psicrométrica personalizada	en los datos ingresados, considerando la presión atmosférica o altitud.
Funcional	RF-05	Trazado de punto en la carta	El sistema debe ubicar los puntos de estado y trazar las líneas de procesos en la carta psicrométrica.
Funcional	RF-06	Tooltip de propiedades	Al pasar el cursor sobre un punto de la carta, deben mostrarse las propiedades psicrométricas en tiempo real.
Funcional	RF-07	Simulación de procesos psicrométricos	El sistema debe permitir simular los siguientes procesos psicrométricos: enfriamiento, deshumidificación, calefacción y humidificación.
Funcional	RF-08	Exportación de resultados	El sistema debe exportar los resultados a PDF o Excel, incluyendo datos, cálculos y la imagen de la carta psicrométrica.
Funcional	RF-10	Validación de datos	El sistema debe advertir si los datos ingresados son incoherentes o fuera de rango físico.
No funcional	RF-09	Gestión de proyectos	El sistema debe permitir guardar y cargar proyectos de trabajo en archivos locales.
No funcional	RNF- 01	Usabilidad	El sistema debe tener una interfaz amigable, intuitiva y de fácil navegación para técnicos e ingenieros.

No funcional	RNF-02	Rendimiento	El software debe mostrar resultados de manera rápida (en menos de 3 segundos tras el ingreso de datos).
No funcional	RNF-03	Portabilidad	El sistema debe ser ejecutable en sistemas Windows.
No funcional	RNF-04	Estética visual	El software debe incluir opciones de modo oscuro y claro para mejorar la experiencia del usuario.
No funcional	RNF-05	Soporte multilingüe	El sistema debe permitir cambiar entre idioma español e inglés.
No funcional	RNF-06	Mantenimiento	El software debe incluir un manual que le explique el funcionamiento al usuario.

5.4.3 Bocetos iniciales

- **Al tener estos requerimientos en cuenta se hizo un primer boceto de la interfaz gráfica que podría tener este software, constando de varias fases o ventanas**
 - Esta primera imagen muestra la primera fase de la interfaz la cual consta de 4 botones iniciales dándole al usuario distintas opciones de uso siendo

A: Calcular punto de estado

B: Calcular un proceso en específico (enfriamiento, calentamiento, humificación...)

C: Mostrar la carta psicrométrica según la presión digitada por el usuario

H: Realizar cálculos de algún ciclo en específico

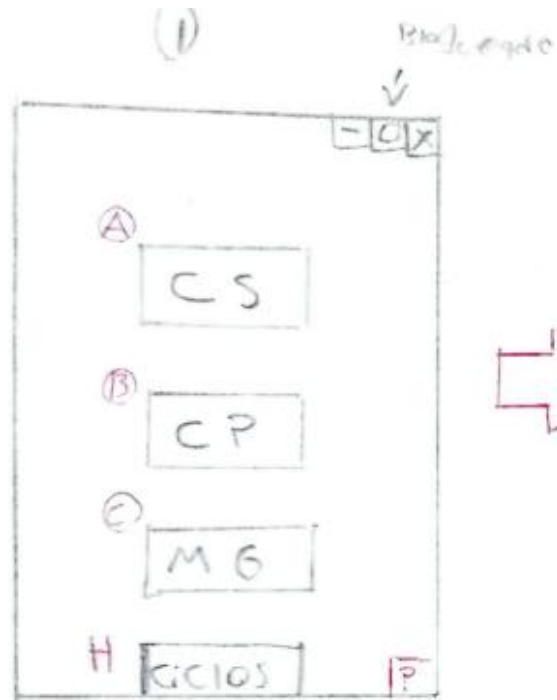


Figura 36 Inicio De la Interfaz



Figura 37 Inicio de la interfaz segundo boceto

- Al poner el punto A de calcular el estado procederá a pedirle información al usuario siendo un dato fijo a siempre pedir la presión atmosférica, seguido a eso el usuario tendrá la opción de seleccionar alguno de los 3 métodos propuestos para realizar los cálculos escogiendo las variables entre:
 1. Temperatura de bulbo seco, Humedad relativa y presión
 2. Temperatura de bulbo seco, Temperatura de Bulbo Húmedo y presión
 3. Temperatura de bulbo seco, Punto de rocío y presión

Temperatura de bulbo seco, Humedad relativa y presión

Presión atmosférica (Pa)

Temperatura

Humedad relativa

Sistema de unidades

Figura 38 Botón A (cálculo de estado)

Calcular punto de estado

Presión atmosférica Pa

Método de cálculo

- ☒ Tbs – Humedad relativa – Presión
- ☐ Tbs – Temperatura de bulbo húmedo – Presión
- ☐ Tbs – Punto de rocío – Presión

Datos de entrada

Temperatura de bulbo seco °C C

Humedad relativa % %

Sistema de unidades

- ☒ SI (kPa, °C, kg/kg)
- ☐ Inglés (psi, °F, gr/lb)

Calcular Limpia Mostrar en carta

Figura 39 Boceto Interfaz cálculo de estado

$$OC = \begin{cases} T_s \text{ y } HR - P & 1 \\ T_s - T_{pr}^{Dv} - P & 2 \\ T_s - T_{DH}^{TB} - P & 3 \end{cases}$$

Figura 40 Opciones De Calculo

Ayuda = ?
MG = Generar gráfico
CS = Calcular es todo

Figura 41 Definición de abreviaciones

CP = Calcular Proceso

Figura 42 Definición de abreviaciones

- Input: Son los datos de entrada por el usuario
- Output: Son los datos generados por el software

in = input Out = Output

Figura 43 Definición de abreviaciones

$$E = A + E$$

A	h	→	Output
	T _s	→	Output
	T ₀₄	→	Output
	V	→	Output
G	H	→	Output
	T _{pr}	→	Output

Figura 44 Botón E (Cálculos)

Calcular punto de estado

Presión atmosférica

101325

Método de cálculo

☒ Tbs – Humedad relativa – Presión
☐ Tbs – Temperatura de bulbo húmedo – Presión
☐ Tbs – Punto de rocío – Presión

Datos de entrada

Temperatura de bulbo seco

Humedad relativa

Sistema de unidades

Resultados del punto A

Propiedad	Símbolo	Valor	U.
Entalpía específica		63,4	kJ/kg
Temp. bulbo seco		24,0	°C
Temp. bulbo húmedo		18,0	°C
Volumen específico		0,86	m³/kg
Temp. punto de rocío.		0,010	kg/kg

Calcular

Limpiar

Nota: las unidades se actualizan según el sistema elegido.

Figura 45 Boceto Interfaz calculo y resultados

v

- Se muestran las unidades según el sistema escogido

G = Añadir otro estado
↳ se muestra en MG

Figura 46 Definición del punto E

- Al presionar el punto C de mostrar grafico se visualizará la carta psicrométrica con los valores de las propiedades, adicionalmente a esto se podrán evidenciar los estados previamente calculados, así como los valores actuales del punto según el posicionamiento del mouse
- Se permitirán añadir nuevos procesos ingresando datos
- Se permite unir los estados
- Se permitirá añadir puntos de estado con la selección del mouse

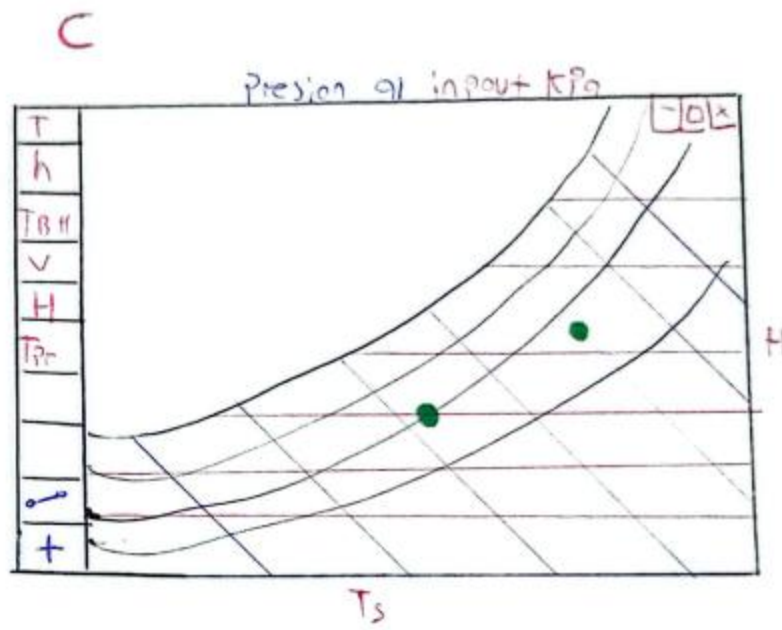


Figura 47 Punto C (Carta psicrométrica)

+ Añadir punto de estado

↗ Unir punto de estados

Figura 48 Botones carta psicrométrica

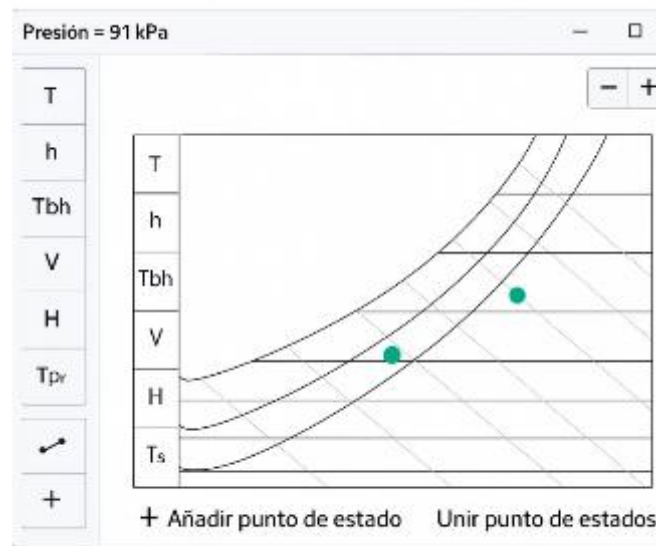


Figura 49 Boceto Interfaz carta psicrométrica inicial

- Al presionar el botón B el usuario podrá ver un apartado en donde le permitirá seleccionar el proceso que se va a calcular para cada uno de los puntos y realizara los debidos cálculos de propiedades y balances.

B- Calculo de propiedades

Proceso:		Añadir
1		
Proceso ₂₋₃		
1		
Proceso ₃₋₄		
1...		
1...		

Figura 50 Botón B- Calculo de procesos

Procesos:

- Humidificación
 - Deshumidificación
 - Calentamiento
 - Enfriamiento
 - Mezcla de Corrientes
 - Enfriamiento + deshumidificación
- Note: A red arrow points from 'Calentamiento' and 'Enfriamiento' to the word 'Sensible' written in red.*

— Según el proceso determina la propiedad de

Figura 51 Tipos de Procesos en la interfaz

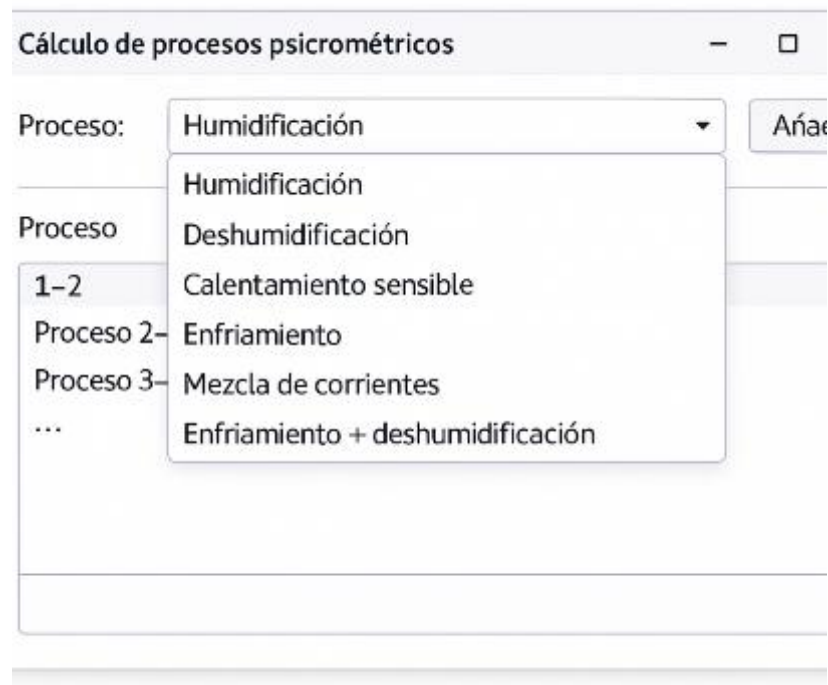


Figura 52 Boceto de interfaz selección de procesos

- Teniendo en cuenta el boceto inicial de la interfaz gráfica del software y los requerimientos del cliente se inició el proceso de elaboración del software para lo cual se tuvo en cuenta el ambiente de desarrollo Python, así como algunas librerías (ver sección de librerías seleccionadas) para el cálculo de las propiedades y el modelamiento de gráficas y propiedades psicrométricas
- Seguido a tener un preconcepto de las librerías que podrían llegar a requerirse en el diseño del software se procedió a realizar la parte de los cálculos con las ecuaciones

proporcionadas y seleccionadas anteriormente siendo en su mayoría los métodos más recientes propuestos por ASHRAE.

- Para esto se probaron con datos de entrada de una Temperatura (T) de 25°C y una humedad relativa (ϕ) del 40%. En donde se comprobaron y compararon los valores con otros softwares como lo son EES y valores previamente determinados por ASHRAE
- Para lograr esto en la interfaz de usuario se hizo una prueba con el método propuesto por ASHRAE en el cual se toman valores de entrada como lo son:
 1. La presión
 2. Temperatura de Bulbo Seco
 3. Humedad relativa
- Estos son solicitados al usuario como parámetros de entrada, así como el sistema de unidades en el cual quiere que le sean dados los resultados. (Los datos de entrada se tomaron con una temperatura de entrada en grados Celcius, la humedad relativa y la presión con respecto al nivel del mar en pascales)

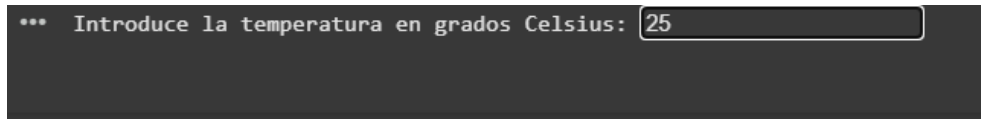


Figura 53 Solicitud de datos por la consola

- A continuación, se puede evidenciar los datos solicitados por la consola

```
Introduce la temperatura en grados Celsius: 25
Introduce la humedad relativa 0-100%: 40
Introduzca la presión a nivel del mar en pa: 100000
```

Figura 54 Solicitud de Parámetros

- Una vez ingresados los parámetros por el usuario, el software procede a realizar los cálculos y entregar los resultados de cada una de las propiedades al usuario, teniendo en cuenta los modelos utilizados.

```
In [1]: runfile('D:/Aplicacion/Interfaz/Version estable/Mejor version editable v6.3.py', wdir='D:/Aplicacion/Interfaz/Version estable')
Su Presión de saturación a 25.0 °C: 3169.9293676106945 pa
La temperatura a manejar según el sistema seleccionado es : 25.0 °C
La unidad de presión es dada según el sistema de unidades escogido y las unidades de presión de saturación escogidas
El calor específico del aire a 25.0 °C es 1006.2869258651305 J/(kg·K)
La entalpía específica es 45.46582334969985 Kj/kg
El calor específico del aire a 25.0 °C usado es 1006.2869258651305 J/(kg·K)
La entalpía específica Con un cp calculado a la temperatura dada es 45.46582334969985 Kj/kg
El volumen es 0.866679754423442 m^3/kg
El bulbo húmedo calculado es: 16.38 °C
```

Figura 55 Resultados de las Propiedades

Ya al lograr realizar los cálculos para cada una de estas propiedades se realizó el código para la generación de una carta psicrométrica inicial teniendo en cuenta como parámetro inicial la presión con respecto a nivel de la mar dada por el usuario. Para la generación del gráfico se tuvo en cuenta para esta primera versión las líneas de entalpía, bulbo húmedo, humedad específica y

humedad relativa Así los ejes X y Y respectivamente siendo la temperatura bulbo seco y humedad específica, tal como se presenta en las cartas estándar que se pueden encontrar.

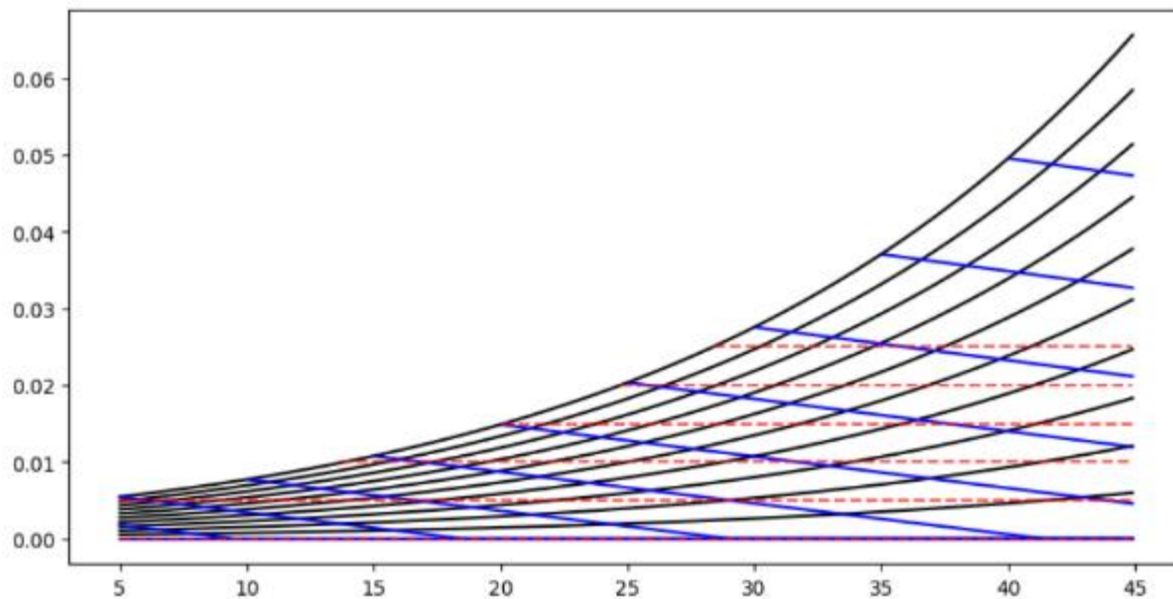


Figura 56 Primera versión Carta Psicrométrica

Después de realizar la primera versión de la carta psicrométrica se procedió a añadir un punto de referencia del estado según los parámetros proporcionados por el usuario y se corrigieron algunas etiquetas en la generación de la carta psicrométrica

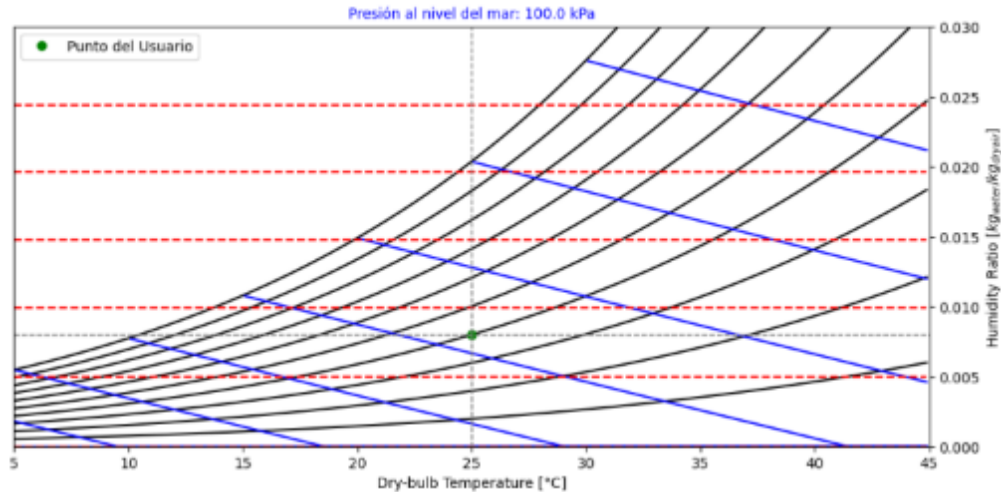


Figura 57 Carta psicrométrica con el punto de estado del usuario

Ya definido el punto de operación del usuario en la carta psicrométrica, se realizó una revisión de los distintos procesos de acondicionamiento de aire que podrían incorporarse en el software (calentamiento sensible, enfriamiento sensible, enfriamiento con deshumidificación, humidificación adiabática, humidificación con vapor, deshumidificación química, mezcla de corrientes y compresión del refrigerante). Para cada uno de ellos se analizaron las ecuaciones de balance de masa y energía, identificando las relaciones fundamentales entre el caudal másico de aire seco y de agua, la razón de humedad (ω), la temperatura de bulbo seco (T) y la entalpía específica del aire húmedo (h). A partir de esta revisión se estructuró un conjunto de expresiones generales para los balances de aire seco, vapor de agua y energía del sistema, así como las formulaciones particulares de cada proceso, las cuales sirvieron como base para programar las rutinas de cálculo internas del aplicativo y garantizar la coherencia termodinámica de los resultados.

Proceso	Ecuación
Balance masa aire seco	$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2}$
Balance masa vapor de agua	$\dot{m}_{v1} + \dot{m}_{agua} = \dot{m}_{v2} \quad \text{o} \quad \dot{m}_{a1} \cdot \omega_1 + \dot{m}_{agua} = \dot{m}_{a2} \cdot \omega_2$
Balance de energía	$\dot{m}_a \cdot h_1 + \dot{Q} + \dot{m}_{agua} \cdot h_{agua} = \dot{m}_a \cdot h_2$
Calentamiento sensible - masa	$\omega_1 = \omega_2 \Rightarrow \dot{m}_{agua} = 0$
Calentamiento sensible - energía	$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1)$
Enfriamiento sensible	$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) < 0$
Enfriamiento + deshumidificación - masa	$\dot{m}_a \cdot \omega_1 = \dot{m}_a \cdot \omega_2 + \dot{m}_{agua}$
Enfriamiento + deshumidificación - energía	$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) + \dot{m}_{agua} \cdot h_{agua}$
Humidificación adiabática - masa	$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)$
Humidificación adiabática - energía	$\dot{m}_a h_1 + \dot{m}_{agua} h_{agua} = \dot{m}_a h_2$
Humidificación con vapor - masa	$\dot{m}_{agua} = \dot{m}_a(\omega_2 - \omega_1)$
Humidificación con vapor - energía	$\dot{m}_2 h_2 + \dot{m}_{agua} h_{vapor} = \dot{m}_2 h_2$
Mezcla de corrientes - masa aire seco	$\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2} = \dot{m}_{a3}$
Mezcla de corrientes - humedad	$\dot{m}_{a1} \omega_1 + \dot{m}_{a2} \omega_2 = \dot{m}_{a3} \omega_3$
Mezcla de corrientes - energía	$\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2 = \dot{m}_{a3} h_3$
Mezcla - ω simplificada	$\omega_3 = \frac{\dot{m}_{a1} \omega_1 + \dot{m}_{a2} \omega_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}}$
Mezcla - h simplificada	$h_3 = \frac{\dot{m}_{a1} h_1 + \dot{m}_{a2} h_2}{\dot{m}_{a1} + \dot{m}_{a2}}$

Figura 58 Tabla De Ecuaciones Para el Balance de masa y energía

De manera complementaria, se realizó una revisión de los equipos en los que se presentan estos procesos en la práctica, con el fin de vincular directamente cada modelo de cálculo con componentes reales de los sistemas HVAC. Se clasificaron los procesos según su efecto sobre la temperatura y la razón de humedad (aumento, disminución o conservación de T y ω) y se asociaron a equipos típicos como resistencias eléctricas, serpentines e intercambiadores de calor,

serpentines fríos y evaporadores, drenaje de condensado y deshumidificadores, humidificadores por aspersión o torres de enfriamiento, humidificadores de vapor, rotores desecantes, cámaras de mezcla/recirculadores y compresores de refrigeración. Esta correlación entre proceso termodinámico y equipo permitió definir un catálogo claro dentro del software, facilitando que el usuario identifique el módulo de cálculo adecuado a partir del componente físico presente en su sistema de climatización.

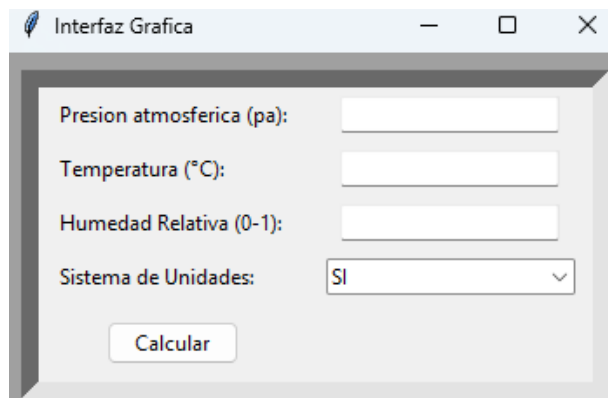
Proceso	Aumento T	Disminuye T	Aumenta ω	Disminuye ω	Equipo principal
Calentamiento sensible	Si	No	No	No	Resistencias, serpentines, intercambiadores de calor, calentadores de vapor
Enfriamiento sensible	No	Si	No	No	Serpentines fríos, evaporadores
Enfriamiento + deshumid.	No	Si	No	Si	Evaporadores, drenaje de condensado, deshumidificadores
Humidificación adiabática	No	Si	Si	No	Humidificadores por aspersión, torres de enfriamiento
Humidificación con vapor	Si	No	Si	No	Humidificadores de vapor
Deshumidificación química	No	Si	No	Si	Rotores desecantes, absorbentes
Mezcla de corrientes	Son un promedio ponderado	Son un promedio ponderado	—	—	Camaras de mezcla, recirculadores
Compresión del refrigerante	Si	No	No	No	Compresores de refrigeración

Figura 59 Tabla de

- Al tener ya estos distintos procesos se hizo la investigación necesaria para la creación de una interfaz gráfica, llegando así a la versión inicial del software la cual posee

- Solicitud de parámetros basados en la situación TBS-HR-P dada por ashrae
- La selección de sistemas de unidades
- Cálculo de resultados
- Entrega de los resultados
- Generación de la carta psicrométrica junto al punto de estado calculado

Inicialmente se utilizaron las librerías Tkinter en Python para la creación de esta primera versión en donde se puede ver como el usuario debe de ingresar los 3 parámetros iniciales y seleccionar el sistema de unidades en el cual desea que el software le proporcione las propiedades necesarias para los cálculos psicrométricos



The image shows a window titled "Interfaz Grafica" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). Inside the window, there are four input fields arranged vertically. The first three are text boxes, and the fourth is a dropdown menu. Below these fields is a button labeled "Calcular".

Label	Value
Presion atmosferica (pa):	
Temperatura (°C):	
Humedad Relativa (0-1):	
Sistema de Unidades:	SI

Figura 60 Interfaz gráfica (Solicitud de datos)

- Se ingresa cada uno de los parámetros y se presiona el botón de calcular

The screenshot shows a window titled 'Interfaz Grafica' with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). Inside the window, there are four input fields arranged vertically: 'Presion atmosferica (pa):' with the value '100000', 'Temperatura (°C):' with the value '25', 'Humedad Relativa (0-1):' with the value '0.4', and 'Sistema de Unidades:' with a dropdown menu showing 'SI'. Below these fields is a single button labeled 'Calcular'.

Figura 61 Parámetros Ingresados

- Se calcula cada una de las propiedades y da la opción de generar la carta psicrométrica según los datos ingresados.

This screenshot shows the same 'Interfaz Grafica' window as Figure 61, but with an additional button 'Mostrar Resultados' next to the 'Calcular' button. Below these two buttons is a third button labeled 'Mostrar Gráfico'. The input fields and their values remain the same.

Figura 62 Opciones de seguimiento

- En caso de seleccionar la opción de mostrar resultados la interfaz se adaptará y mostrará cada una de las propiedades junto a los resultados. Se realizaron varias opciones como la generación de una casilla de texto con los resultados o la exportación de estos, pero en

este caso se dejó dentro de la misma interfaz, con la finalidad de entender más el funcionamiento y diseño de estas interfaces.

The screenshot shows a software window titled "Interfaz Grafica". It contains two columns of input and output fields. The left column has inputs for "Presion atmosferica (pa)", "Temperatura (°C)", "Humedad Relativa (0-1)", and "Sistema de Unidades". The right column has outputs for "Entalpía (kj/kg)", "Temp Bulbo Seco (°c)", "Bulbo Humedo (°c)", "Volumen (m^3/kg)", "Humedad Especifica", and "Punto Rocío (°c)". Below the inputs are three buttons: "Calcular", "Mostrar Resultados", and "Mostrar Gráfico".

Input/Label	Value
Presion atmosferica (pa)	100000
Temperatura (°C)	25
Humedad Relativa (0-1)	0.4
Sistema de Unidades	SI
Entalpía (kj/kg)	45.47
Temp Bulbo Seco (°c)	25.00
Bulbo Humedo (°c)	16.38
Volumen (m^3/kg)	0.87
Humedad Especifica	0.0079881
Punto Rocío (°c)	10.477

Figura 63 Interfaz y Resultados

- Al seleccionar la opción de Mostrar Gráfico, se genera la carta psicrométrica con las condiciones dadas en una pestaña aparte, dando así la opción al usuario de poder guardar esta según los puntos de estado calculados en un archivo PDF
- Se añadieron algunas etiquetas para conocer los valores de las distintas propiedades como lo son la temperatura de bulbo seco y la humedad especifica
- Se corrigió las líneas guía de humedad específica para que solo lleguen hasta el 100% de humedad relativa

-

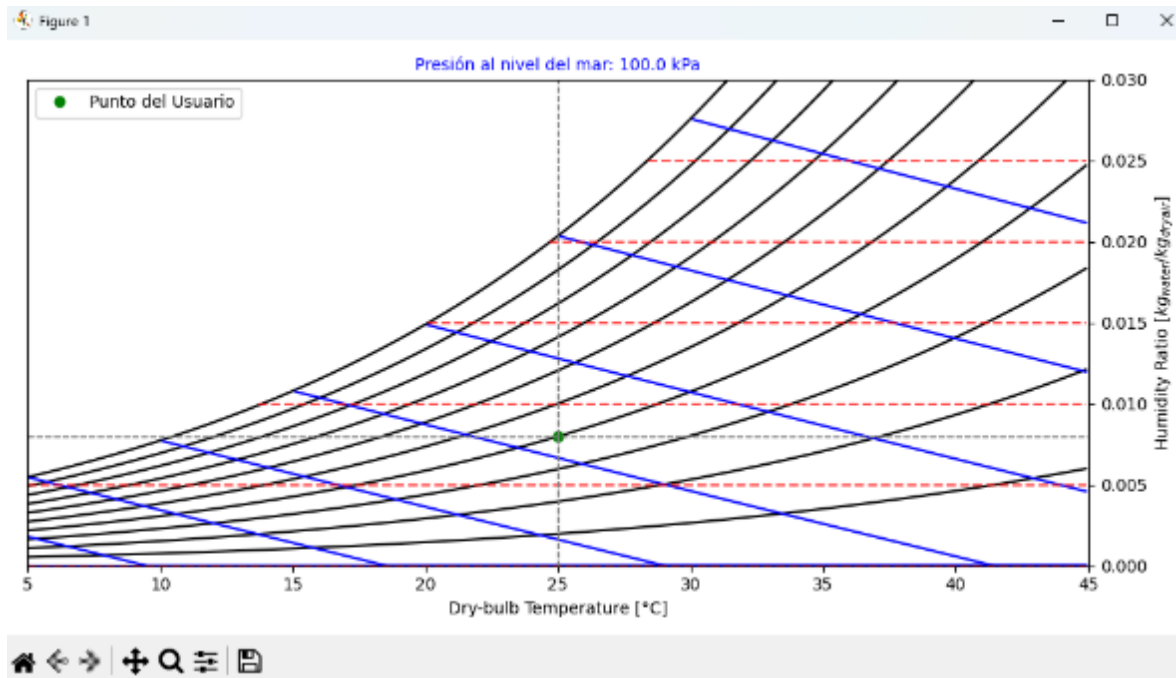


Figura 64 Carta Psicrométrica

- Ya al momento de tener la interfaz gráfica en este punto se trabajó en uno de los requerimientos revisados para la interfaz gráfica siendo el tooltips que muestre los valores de cada una de las propiedades según el posicionamiento del mouse.
- El primer paso fue de revisar los valores para cada uno de los ejes x, y según el posicionamiento del mouse

$(x, y) = (42.16, 0.00257)$

Figura 65 Resultados según las coordenadas

- Después de esto se hizo una prueba del cálculo de todas las propiedades teniendo en cuenta las líneas de humedad relativa según el posicionamiento del mouse dando como resultado:

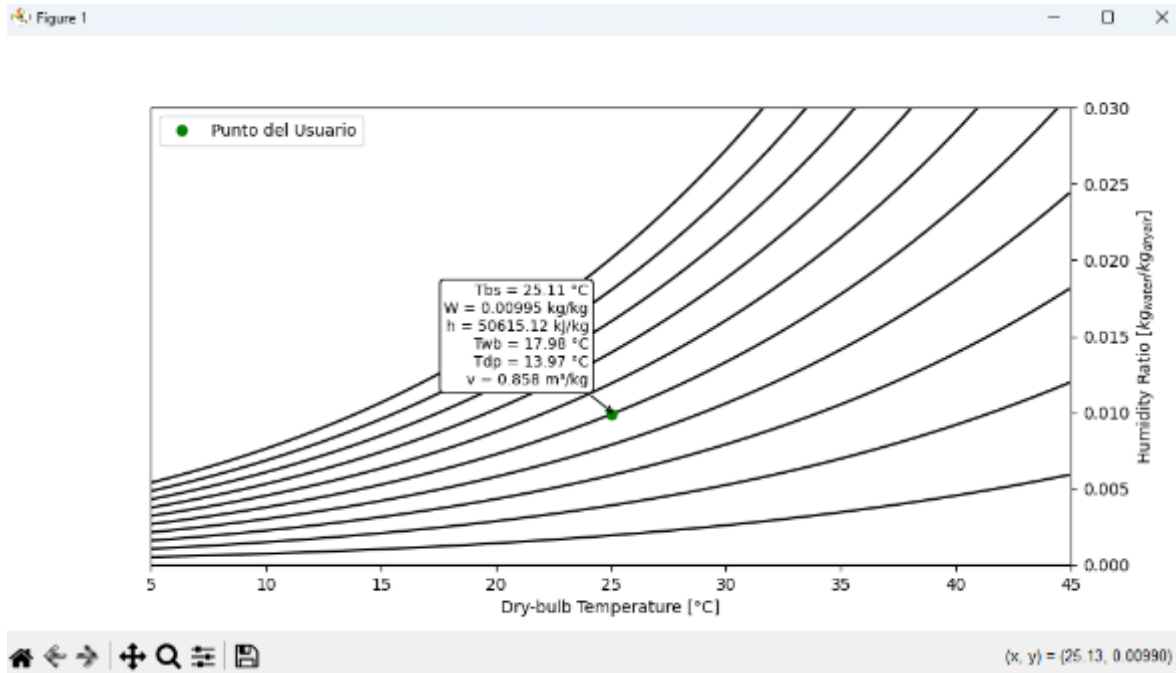


Figura 66 Prueba 1 simulación Tooltip

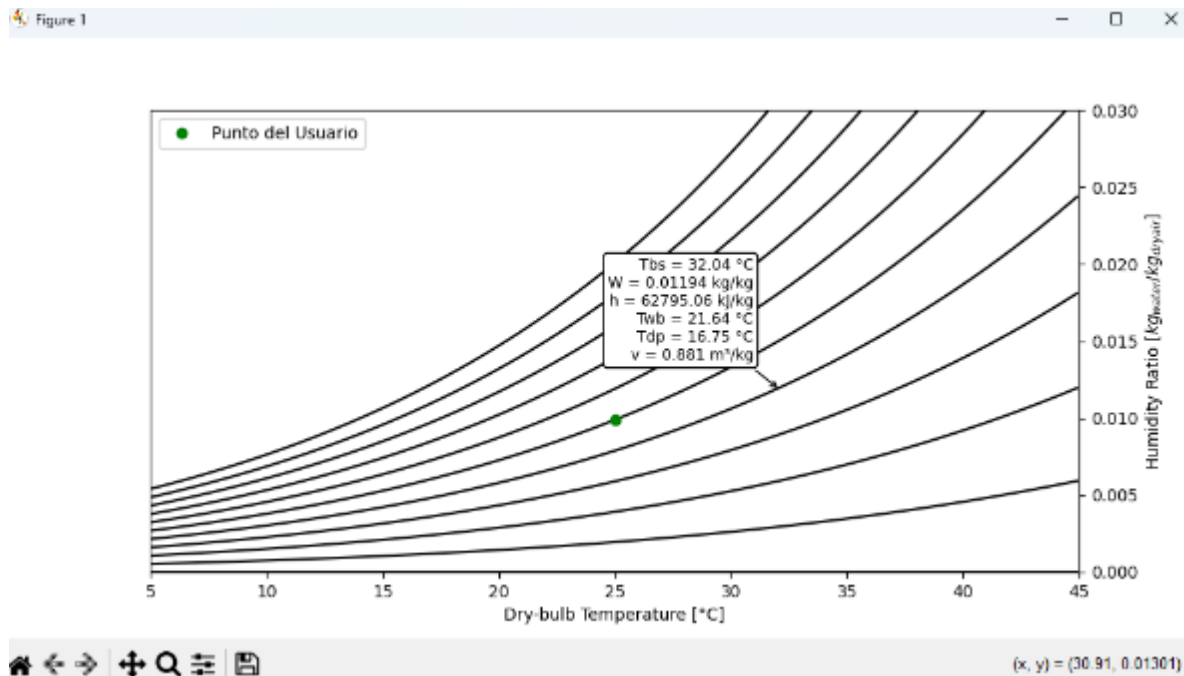


Figura 67 Prueba 1.1 Simulación tooltips

- De la prueba anterior se concluyó que pese a mostrar todas las propiedades estas solo se mostraban cuando el posicionamiento del mouse estaba exclusivamente en alguna de las líneas de humedad relativa.
- Se realizaron correcciones teniendo en cuenta las pruebas anteriores y se ajustaron las etiquetas, dando así una versión inicial más adecuada a los requerimientos

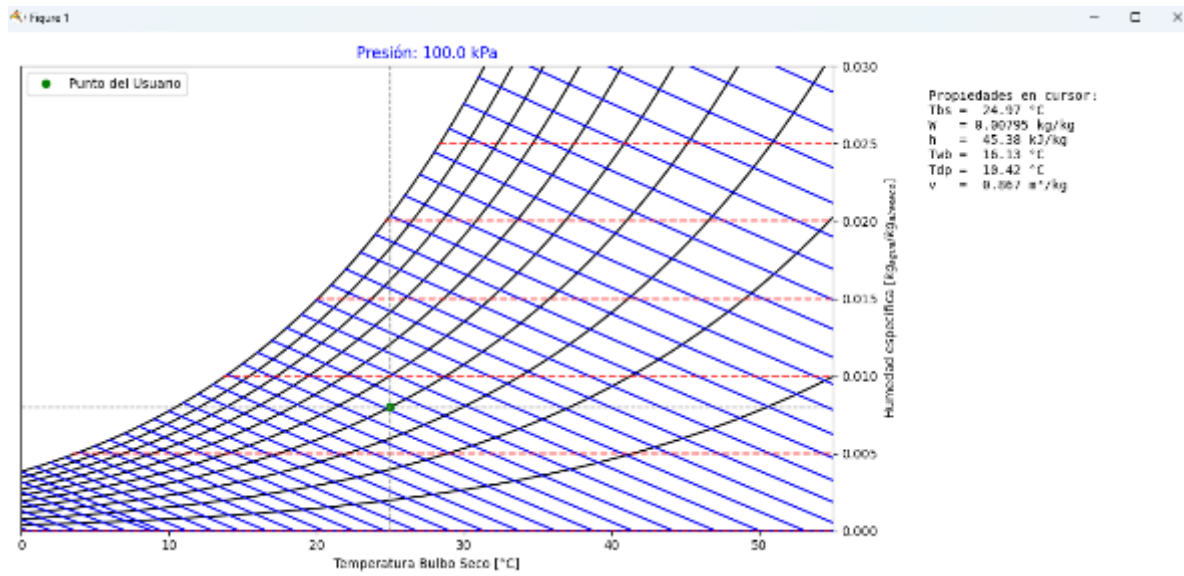


Figura 68 Interfaz Corregida junto A Tooltips

- Posterior a esto se empezó a realizar pruebas para añadir un punto extra al realizar doble clic con el mouse

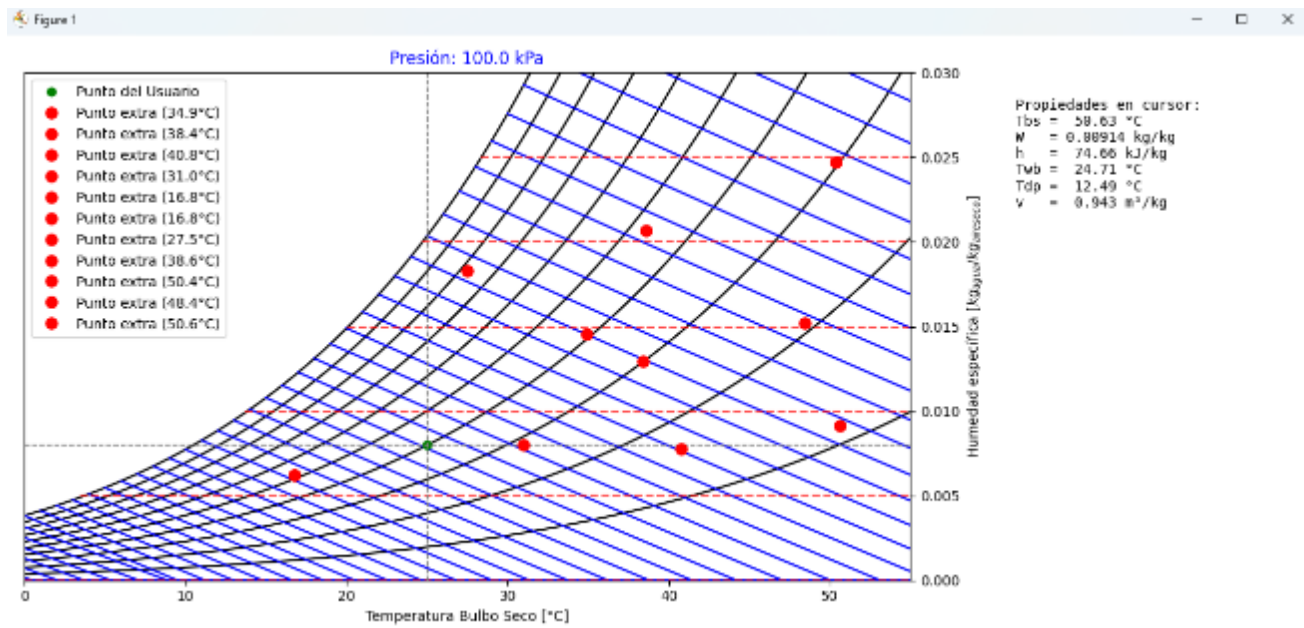


Figura 69 Añadir puntos de estado con el mouse

- Se comprobó el funcionamiento de la carta psicrométrica y de la adicción de puntos

Nueva

Selecciona variables de entrada:	Bulbo seco + Humedad Relativa	Entalpía (kJ/kg):	N/A
Presión atmosférica (Pa):	100000	Temp Bulbo Seco (°C):	N/A
Temperatura (°C):	25	Bulbo Húmedo (°C):	N/A
Humedad Relativa (0-1):		Volumen (m³/kg):	N/A
Sistema de Unidades:	SI	Humedad Específica (kg/kg):	N/A
		Punto Rocío (°C):	N/A

Calcular

Mostrar Gráfico

Figura 70 Implementación de Variables

Después de la primera versión se la interfaz gráfica y al comprobar que estaba funcionando correctamente con el tercer método propuesto por ASHRAE se procedió a implementar los 3 métodos dando así la opción al usuario de seleccionar por cual medio quiere hallar las propiedades psicrométricas, según los datos iniciales que este posea

Se opto por corregir y verificar el estado de la carta psicrométrica y adicionar los métodos de cálculos para software según los requerimientos del cliente

- Se añadió las 3 opciones de variables de entrada
- Ahora la interfaz se actualiza según las opciones de entrada seleccionadas y el sistema de unidades
- Se implementaron los cálculos con las fórmulas proporcionadas por ashrae y previamente escogidas

Selección de variables de entrada	
Presión atmosférica (Pa):	
Temperatura (°C):	25
Humedad Relativa (0-1):	
Sistema de Unidades:	SI

Propiedades psicrométricas	
Entalpía (kJ/kg):	N/A
Temp Bulbo Seco (°C):	N/A
Bulbo Húmedo (°C):	N/A
Volumen (m³/kg):	N/A
Humedad Específica (kg/kg):	N/A
Punto Rocío (°C):	N/A
Humedad Relativa (%):	N/A

Figura 71 Interfaz muestra selección de variables de entrada

- Si se escoge usar el sistema ingles solicitara los datos en ese sistema siendo su temperaturas y presión. De igual manera entregara los datos en el sistema de unidades seleccionado

Posterior a esto se realizaron modificaciones en la carta psicrométrica, organizando los datos mostrados por el cursor, permitiendo añadir los puntos de estado al presionar doble clic, así como editar estos e incluso cambiar su posición teniendo en cuenta la temperatura y humedad especifica, personalizarlos (color, nombre) y exportar estos datos para Excel

Control Paramétrico - App

Selección variables de entrada: **Estado seco + Humedad Relativa**

Presión atmosférica (Pa): 100000

Temperatura (°C): 25

Humedad Relativa (0-1): 0.4

Sistema de Unidades: SI

Calcular

Muestra Carta Paramétrica

Temperatura Bulbo Seco (°C): 38.48

Temperatura Bulbo Húmedo (°C): 27.26

Volumen (m³/kg): 0.89544

Humedad específica (kg/kg): 0.01848

Punto de Rocío (°C): 13.708

Humedad Relativa (%): 41.81

Nombre	T	W	HR (%)	Enthalpia	Twb	Tdp	Volúmenes	Color
Final	38.48 °C	0.01848 kg/kg	41.81	86.52 kJ/kg	27.26 °C	13.71 °C	0.89544 m³/kg	red
Inicio	25.00 °C	0.01601 kg/kg	50.00	54.37 kJ/kg	21.01 °C	18.06 °C	0.86000 m³/kg	red

Figura 72 Interfaz completa con muestra de Resultados

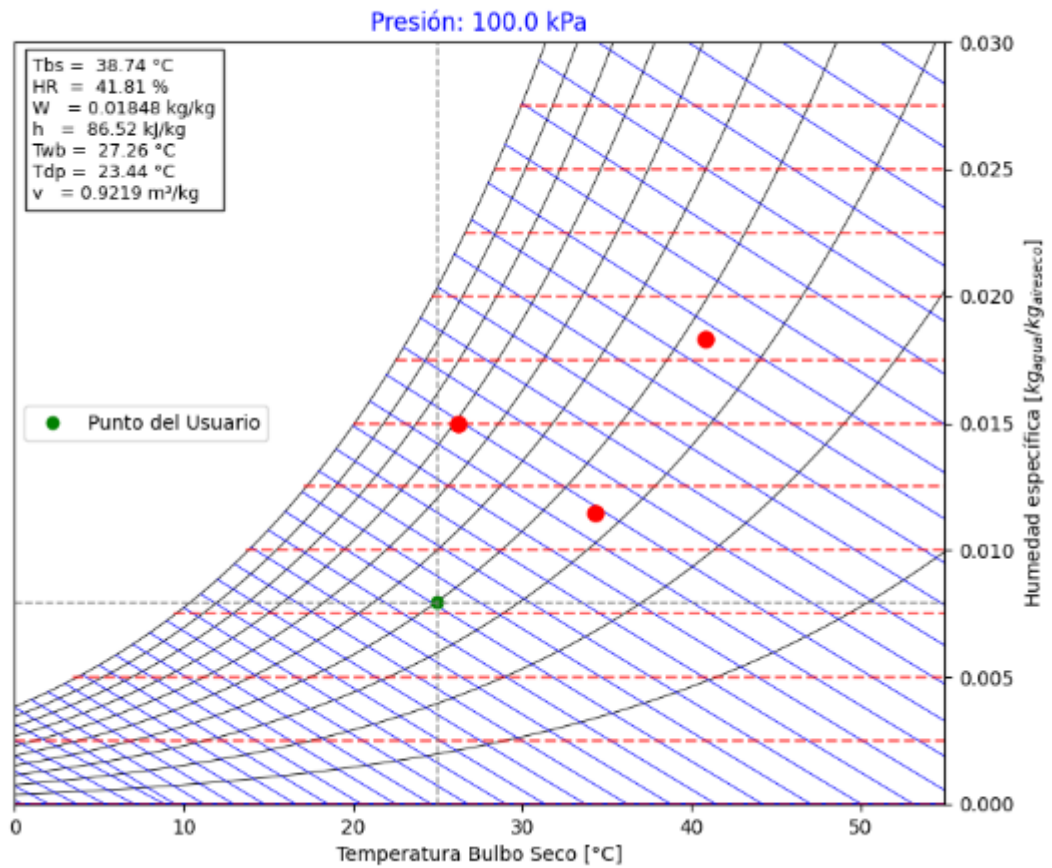


Figura 73 Carta Generada con Puntos de estado

Nombre	T	W	HR (%)	Entalpía	Twb	Tdp	Volumen	Color
Pto1	34.30 °C	0.01147 kg/kg	33.44	63.91 kJ/kg	21.81 °C	15.93 °C	0.8988 m ³ /kg	red
Pto2	40.86 °C	0.01831 kg/kg	37.01	88.29 kJ/kg	27.66 °C	23.29 °C	0.9279 m ³ /kg	red
Pto3	26.23 °C	0.01497 kg/kg	68.94	64.57 kJ/kg	21.91 °C	20.08 °C	0.8800 m ³ /kg	red

Exportar tabla (CSV)

Editar seleccionado

Eliminar seleccionado

Figura 74 Resultados de Puntos generados

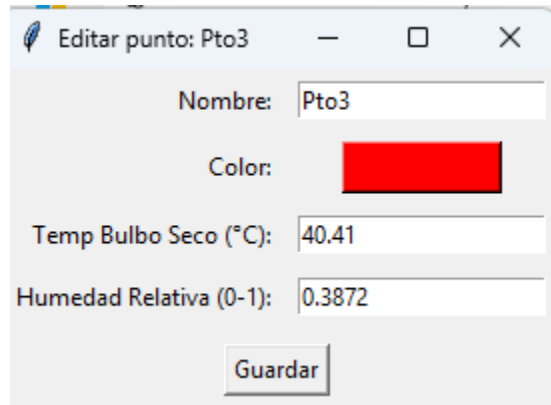


Figura 75 Edición Inicial de puntos

Una vez se añadió los 3 métodos de cálculos y se comprobó el funcionamiento del software se optó por añadir los distintos procesos comenzando con los más simples siendo, calentamiento sensible, enfriamiento, y humidificación. Se realizó las pruebas y se añadieron los procesos restantes dentro del programa junto a un botón en el inicio de la interfaz con la finalidad de poder calcular los procesos.

Se añadió más accesos para facilitar al usuario como poder editar el punto al momento de seleccionar este sobre la tabla

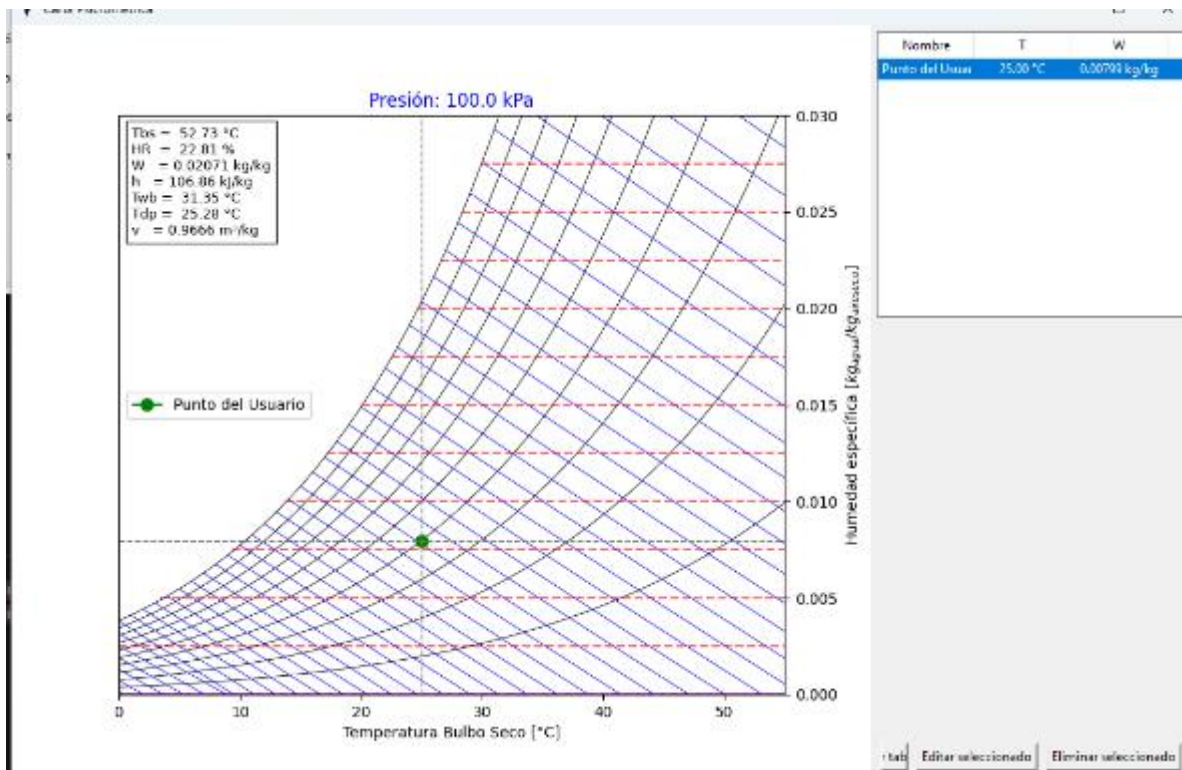


Figura 76 Acceso con doble clic para la edición de puntos

Editar punto Punto del Usuario

Nombre:

Punto del Usuario

Color (hex o nombre):

green

Elegir color...

Temperatura (°C):

25.0

Humedad específica (kg/kg):

0.00798624746910174

Aplicar cambios

Eliminar punto

Figura 77 Nueva versión de edición de Puntos de estado

Se tomo en cuenta todas las ecuaciones para el cálculo de procesos y se implementó un botón para poder calcular cada uno de estos de un punto a otro y mostrarlos en la interfaz grafica

Clima Paramétrico - App

Selección variable de entrada: Bulbo seco - Humedad Relativa

Presión atmosférica (Pa): 100000

Temperatura (°C): 25

Humedad Relativa (h): 0.4

Volumen de aire (m³): 1

Calcular

Mostrar Gráfica Paramétrica

Calcular Proceso

Nombre	T	W	h	h _{dp}	T _{eq}	T _{dp}	Volumen	Color
Punto del Usuario	25.0 °C	0.007986 kg/kg	4.000	40.48 °C	16.16 °C	18.48 °C	0.00865 m³/kg	green

Figura 78 Interfaz Adición de Cálculo de procesos

Calcular Proceso Psicrométrico

Proceso:

Calentamiento sensible

Calentamiento sensible

Enfriamiento sensible

Humidificación adiabática (evaporativa)

Humidificación con vapor (añadiendo vapor)

Enfriamiento + deshumidificación

Mezcla de corrientes

PT02

Actualizar puntos

Flujos (kg/s)

m_a: 1.0 m1: 1.0 m2: 1.0

☒ Dibujar línea del proceso en cartas abiertas

Resultados (balance de masa y energía):

Calcular Proceso Cerrar

Figura 79 Interfaz para la selección y cálculo de procesos

Al presionar el botón de calcular proceso muestra los datos de balances de masa y energía y grafica el proceso en la carta psicrométrica


Calcular Proceso Psicrométrico
—
□
×

Proceso:

Calentamiento sensible

Punto 1:

Punto del Usuario

Punto 2:

Pto2

Actualizar puntos

Flujos (kg/s)

m_a: 1.0

m1: 1.0

m2: 1.0

☒ Dibujar línea del proceso en cartas abiertas

Resultados (balance de masa y energía):

Proceso: Calentamiento sensible

$\dot{Q} = 17.1672 \text{ kW}$

$\dot{m}_{\text{agua}} = 0.000029 \text{ kg/s}$

--- Resumen ---

Punto 1: Punto del Usuario ($T=25.000 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega=0.007986$, $h=45.4950 \text{ kJ/kg}$)

Punto 2: Pto2 ($T=41.744 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\omega=0.008015$, $h=62.6622 \text{ kJ/kg}$)

$\dot{m}_{\text{agua}} \text{ (kg/s)} = 0.000029$

$\dot{Q} \text{ (kW)} = 17.167202$

Calcular Proceso

Cerrar

Figura 80 Muestra de resultados inicial al cálculo del proceso

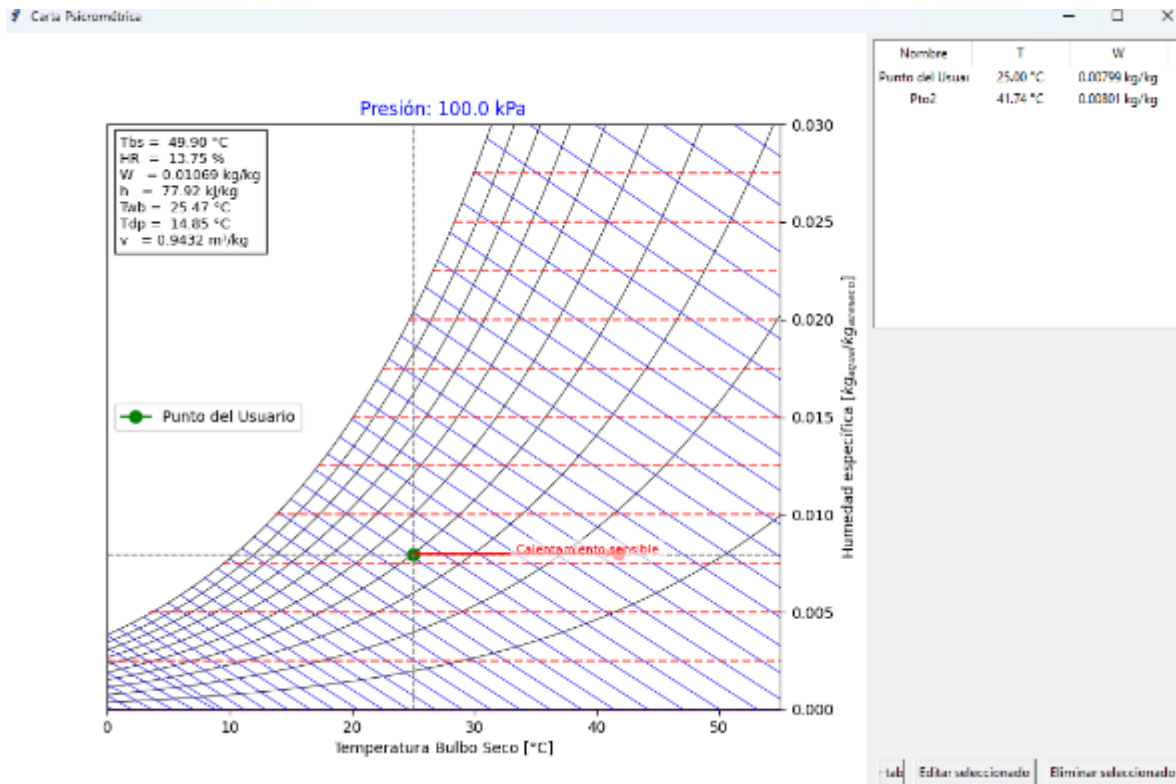


Figura 81 Muestra de proceso calculado en la carta psicrométrica

- Ya una vez verificada la implementación de los procesos se optó por añadir la exportación de los puntos de procesos en formato csv y el poder añadir o cargar un proyecto con los puntos generados/calculados por el usuario
- Se añadió la opción de generar una carta nueva para editar más de un proyecto a la vez

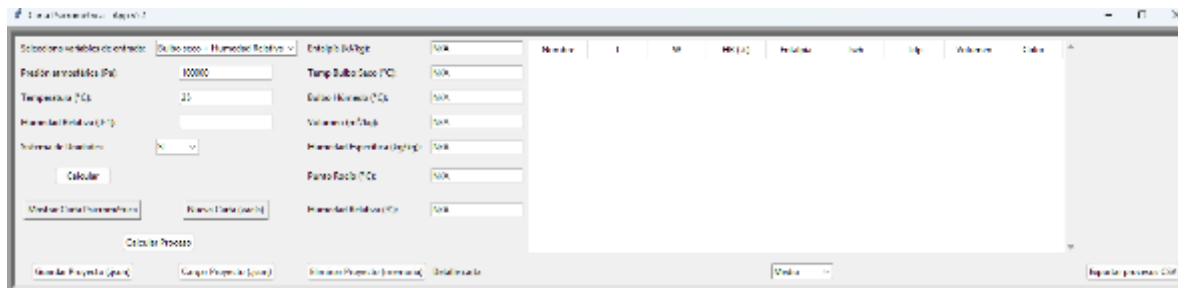


Figura 82 Nueva interfaz con adición de carga y exportación de proyectos

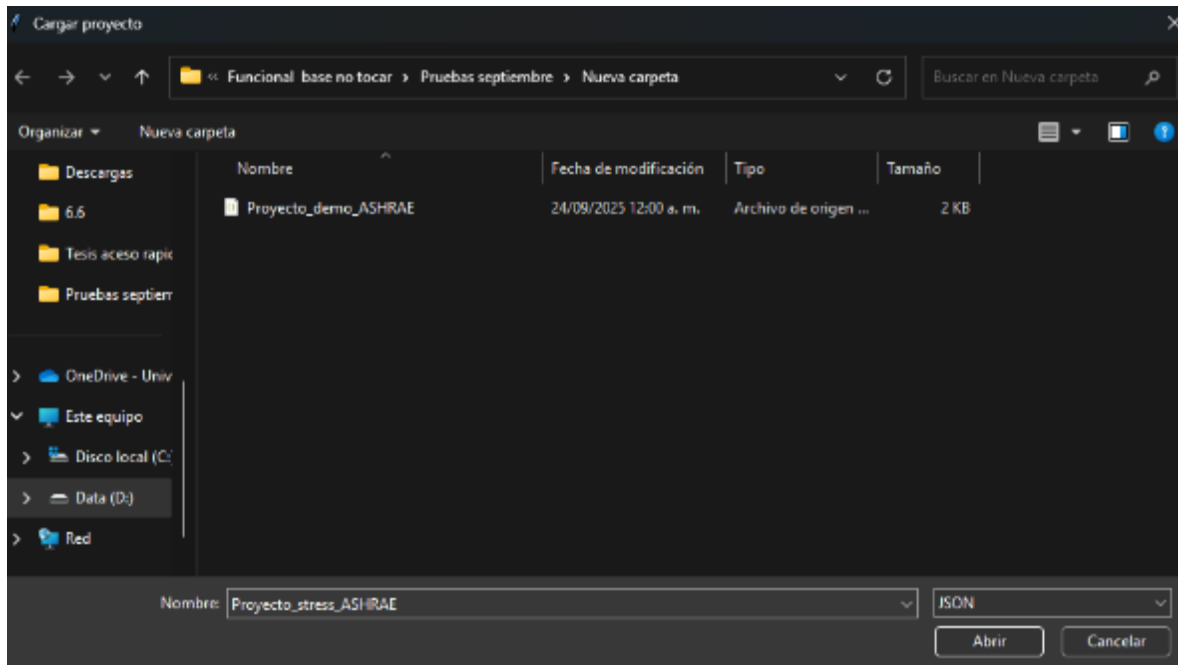


Figura 83 Archivo utilizado. JSON

Se optimizo la carta psicrométrica para mayor actualización de los parámetros y las propiedades según la posición del cursor del usuario, también se añadió la opción de generar esta carta en un rendimiento mayor o menor (En donde varia la cantidad de líneas trazadas) para facilitar el uso

del software para distintos usuarios tanto en equipos avanzados como en equipos que no sean potentes

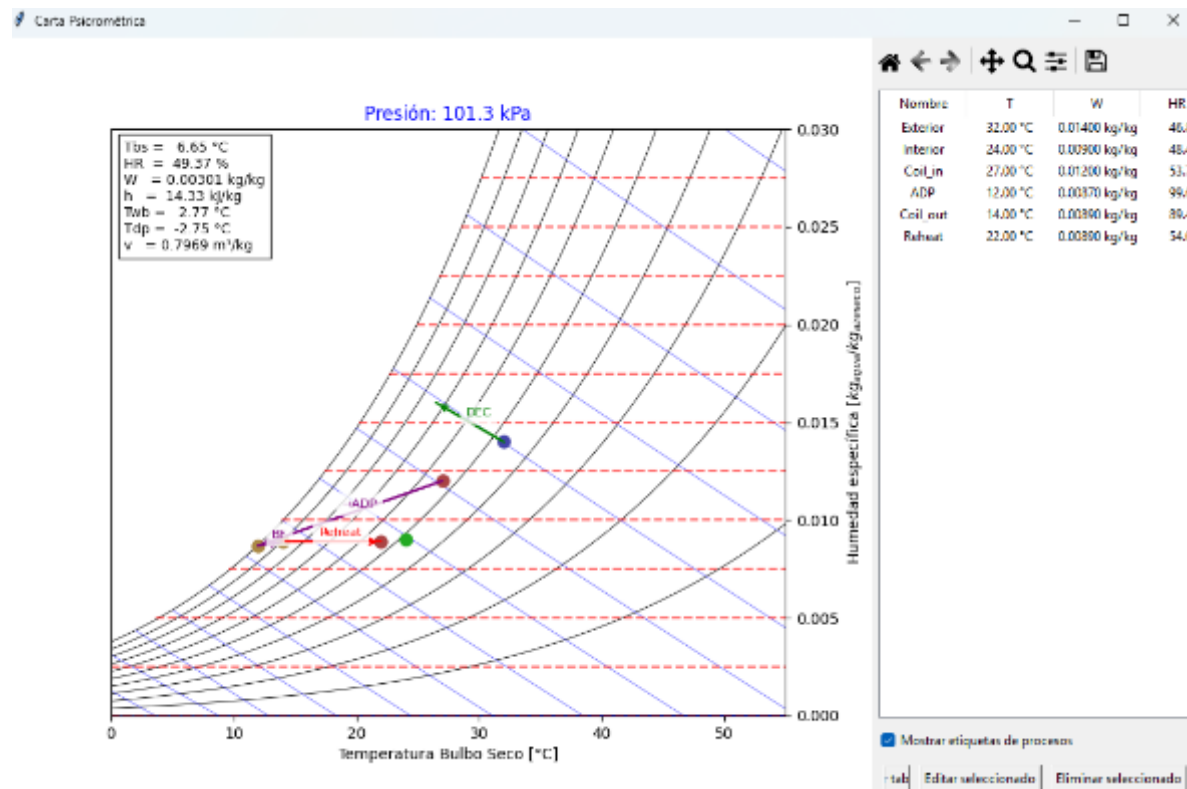


Figura 84 Carta generada después de la carga del proyecto con demanda media

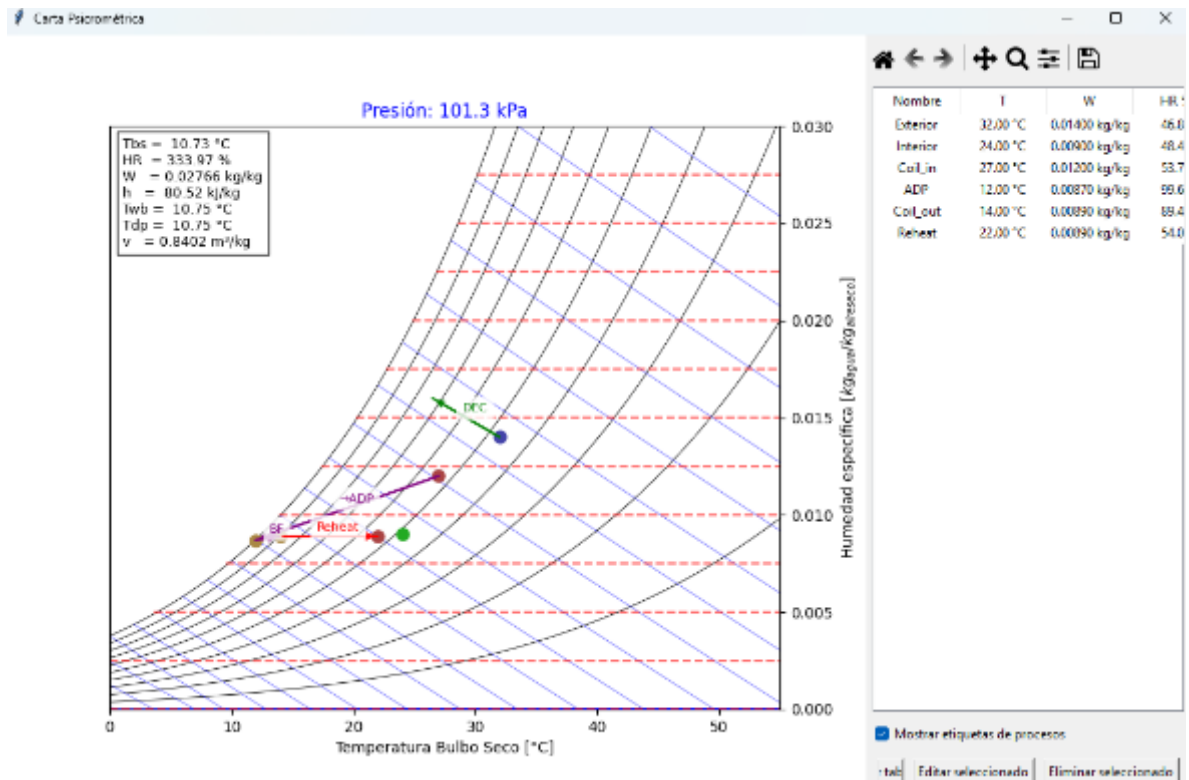


Figura 85 Carta generada Demanda alta

Después de verificar los procesos, se terminan de añadir el resto y se decide optimizar tanto la interfaz del usuario como añadir varios botones para una interfaz más amigable:

- Se optimiza la actualización del tooltips
- Se cambian los colores de la interfaz a tonos grises/café
- Se actualiza el tamaño y color de los botones
- Se añaden los botones en la parte superior para una mayor facilidad de uso al usuario

- Permite crear un nuevo proyecto/guardar/cargar
- Permite los cálculos de procesos, así como la vista de los resultados por medio de nuevos botones
- Permite exportar los datos tanto en formato XLSX como CSV
- Se añaden los botones para regresar a un punto anterior o rehacer el este
- Se añade un botón para la muestra de una zona de confort

Figura 86 Versión corregida del aplicativo

Figura 87 Ventana de procesos actualizada

- Al momento de tocar el botón de proceso superior, añada un tipo de asistente que funciona por pasos para que el usuario seleccione y sepa que datos debe modificar según el proceso que desee calcular

The screenshot shows a window titled "Procesos" with a standard Windows-style title bar (minimize, maximize, close buttons). Inside the window, there are three tabs: "Asistente" (selected), "Tabla", and "Preferencias". The "Asistente" tab contains the following elements:

- A header text: "Paso 1/3 · Selecciona proceso y puntos".
- A label "Proceso:" followed by a dropdown menu currently showing "Calentamiento sensible".
- Two labels, "Punto 1:" and "Punto 2 (si aplica):", each followed by a dropdown menu.
- A button labeled "Actualizar puntos" located below the dropdowns.
- At the bottom left, a button labeled "← Atrás".
- At the bottom right, a button labeled "Siguiente →".

Figura 88Asistente generado para la creación de procesos

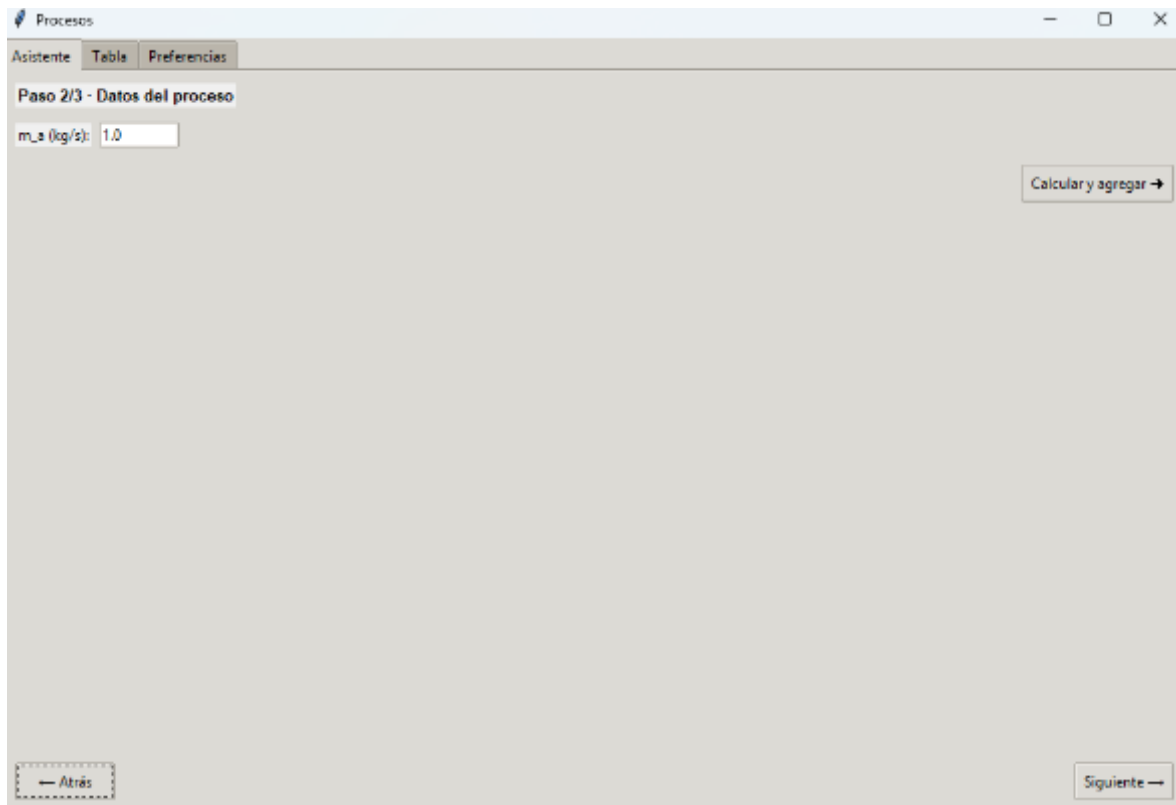
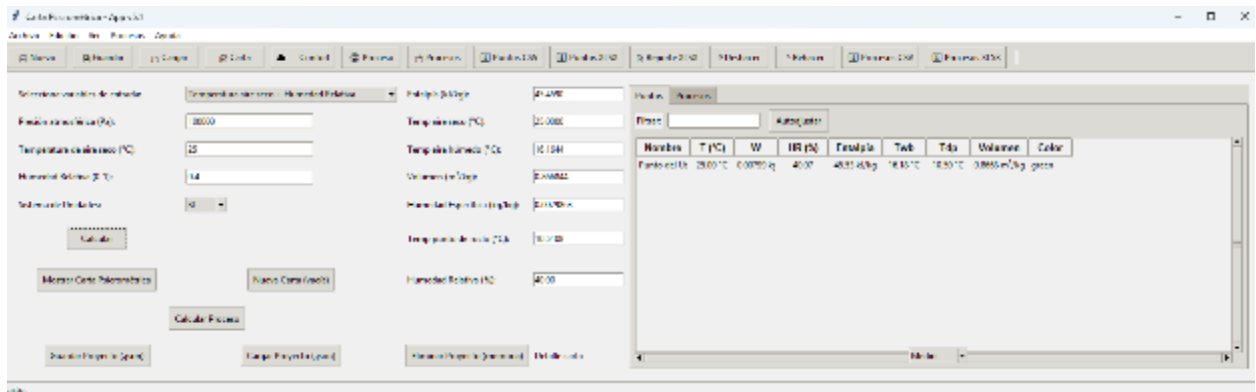


Figura 89 Paso 2 del agente según el proceso seleccionado

- Al momento de generar la carta psicrométrica ahora permite editar y mover los puntos con el mouse utilizando shift y control para esto. Uno dando una mayor opción de movilidad y la otra ajustando el punto con el punto de saturación a un 100% de humedad relativa
- Se hizo un análisis de los errores que tenía el software y se llegó a una versión final la cual incluye



La versión final del aplicativo integra de manera completa los módulos previstos en el diseño, consolidando las funciones necesarias para apoyar el cálculo y análisis psicrométrico en sistemas HVAC. El software permite el cálculo de puntos de estado a partir de diferentes combinaciones de variables de entrada (temperatura de bulbo seco, humedad relativa, bulbo húmedo, punto de rocío y presión atmosférica), la visualización de estos puntos en una carta psicrométrica interactiva y la gestión de múltiples procesos psicrométricos en una misma interfaz.

Adicionalmente, incluye herramientas para listar, editar y organizar puntos y procesos, así como funciones de exportación y generación de reportes que facilitan su integración al flujo de trabajo de técnicos e ingenieros.

Entre las principales funcionalidades que incorpora la versión final se encuentran:

- **Cálculo de puntos de estado** a partir de distintas combinaciones de datos de entrada (Tbs–HR–P, Tbs–Tbh–P, Tbs–Tpr–P).
- **Carta psicrométrica interactiva**, con:
 - visualización de puntos de estado,
 - trazado de líneas y procesos,

- opción de mostrar una zona de confort aproximada a los rangos de ASHRAE 55 (22–26 °C y 30–60 % HR).
- **Gestor de procesos psicrométricos** que permite construir y almacenar hasta once tipos de procesos típicos en HVAC, tales como:
 - calentamiento sensible
 - enfriamiento sensible.
 - enfriamiento con deshumidificación.
 - humidificación adiabática (evaporativa).
 - humidificación con vapor.
 - serpentín con factor de derivación y punto de rocío aparente (BF/ADP).
 - mezcla de corrientes.
 - recalentamiento post-bobina.
 - enfriamiento evaporativo directo.
 - enfriamiento evaporativo indirecto.
 - esquema combinado indirecto–directo (DIEC).
- **Listado global de puntos y procesos**, con posibilidad de edición y eliminación controlada.
- **Exportación de resultados** a formatos CSV y XLSX (puntos de estado, procesos y tablas consolidadas).

- **Generación de reportes** a partir de la información almacenada en el proyecto.
- **Funciones de deshacer y rehacer (undo/redo)**, que permiten mantener trazabilidad sobre las modificaciones realizadas por el usuario.

De manera complementaria, la versión final incorpora un conjunto de **restricciones explícitas** diseñadas para asegurar la coherencia física de los cálculos y evitar configuraciones de proceso no realizables. Estas restricciones actúan tanto al momento de definir puntos como al construir o editar procesos psicrométricos, guiando al usuario dentro de un espacio de soluciones físicamente consistentes.

Las principales restricciones implementadas incluyen:

- **Validación de puntos de estado individuales:**
 - control de rangos de temperatura (por ejemplo, entre -50 °C y 80 °C),
 - verificación de que la razón de humedad sea no negativa y menor o igual a la humedad de saturación para la presión indicada,
 - rechazo o advertencia cuando el usuario introduce combinaciones inconsistentes de T_{bs} , HR , T_{bh} o T_{pr} .
- **Restricciones específicas por tipo de proceso:**
 - En **calentamiento y enfriamiento sensible**, se mantiene la razón de humedad constante ($W_2 = W_1$) y se impide que la temperatura final contradiga el sentido del proceso ($T_2 \geq T_1$ en calentamiento, $T_2 \leq T_1$ en enfriamiento).
 - En **enfriamiento con deshumidificación** y en el **serpentín con BF/ADP**, se limita el estado de salida a puntos físicamente realizables en la carta, se garantiza

que la humedad final no supere ni la de entrada ni la de saturación, y se calcula explícitamente el caudal de agua condensada.

- En **humidificación adiabática** y en los **procesos evaporativos**, se resuelven las condiciones de salida manteniendo aproximadamente la entalpía constante ($Q \approx 0$), y se restringen parámetros como efectividad y factor de derivación al intervalo $[0, 1]$.
- En **humidificación con vapor**, se ajusta el punto final para no cruzar la línea de saturación y, si se selecciona la opción adiabática, se verifica el balance energético asociado.
- En **mezcla de corrientes**, se exige que los caudales de entrada sean positivos, que el estado mezcla cumpla los balances másicos y energéticos, y que la condición resultante no exceda la humedad de saturación, generando advertencias cuando se proponen combinaciones no realizables.

En conjunto, el conjunto de funcionalidades descritas y el esquema de restricciones implementado en la versión final del software materializan el diseño planteado en el **objetivo específico 2**, al ofrecer un aplicativo capaz de realizar cálculos psicrométricos, representar procesos de manera gráfica e interactiva y, al mismo tiempo, proteger al usuario de configuraciones que violen los principios básicos de la psicrometría. Esto se traduce en una herramienta confiable, didáctica y alineada con la práctica de la industria HVAC, adecuada tanto para el apoyo en diseño como para la formación y el análisis de sistemas de climatización.

5.4.1 Librerías seleccionadas

Durante el desarrollo del aplicativo para cálculo de propiedades psicrométricas fue necesario elegir con cuidado las librerías a utilizar. La idea fue aprovechar herramientas ya probadas para asegurar buenos cálculos, una interfaz estable y un desarrollo más rápido, en lugar de programar todo desde cero. A continuación se resumen las principales librerías empleadas y el papel que cumplen dentro del software.

1. Interfaz gráfica y experiencia de usuario

- **Tkinter y tkinter.ttk**
 - Base de la interfaz gráfica (ventanas, marcos, botones, pestañas, tablas).
 - Permiten construir una GUI ligera, integrada de forma nativa con Python.
- **Módulos auxiliares de Tkinter** (messagebox, colorchooser, filedialog, simpledialog, tkinter.font)
 - Mensajes de información, advertencia y error.
 - Selección de colores para puntos y procesos.
 - Apertura y guardado de archivos.
 - Cuadros de diálogo para pedir datos al usuario.
 - Configuración de tipos y tamaños de letra.

2. Cálculo psicrométrico y termodinámico

- **psychrolib**
 - Núcleo de cálculo psicrométrico del software.

- Calcula razón de humedad, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de rocío, entalpía, volumen específico y humedad de saturación.
- Trabaja en sistema internacional de unidades y sigue formulaciones coherentes con los lineamientos de ASHRAE, lo que da consistencia a los resultados.
- **CoolProp (CoolProp.CoolProp)**
 - Librería de apoyo para propiedades termodinámicas de referencia.
 - Se utiliza como herramienta adicional de contraste en la validación de algunos cálculos.

3. Gráficos y carta psicrométrica

- **matplotlib.pyplot**
 - Generación de gráficos bidimensionales.
 - Se usa para dibujar la carta psicrométrica, los puntos de estado y los procesos.
- **NumPy (numpy)**
 - Manejo eficiente de arreglos numéricos.
 - Permite crear vectores de temperatura, humedad y otras variables, y discretizar las curvas de la carta y de los procesos.
- **FigureCanvasTkAgg y NavigationToolbar2Tk** (de `matplotlib.backends.backend_tkagg`)
 - Integran los gráficos de matplotlib dentro de las ventanas de Tkinter.

- Añaden herramientas de navegación como zoom, desplazamiento y guardado de imágenes.

4. Librerías estándar de soporte

- **Gestión de datos y archivos**

- csv y json: exportación e importación de puntos, procesos y configuraciones.
- os: manejo de rutas y nombres de archivo.

- **Registro y depuración**

- logging y traceback: registro de eventos y diagnóstico de errores.
- datetime y time: manejo de marcas temporales y medición de tiempos.

- **Utilidades generales de programación**

- math: operaciones matemáticas básicas.
- itertools y functools: generación de iteradores y optimización de funciones (por ejemplo, uso de caché).
- dataclasses: definición estructurada de objetos de datos (puntos, procesos, configuraciones).

En conjunto, este conjunto de librerías forma la base tecnológica del aplicativo y permite cumplir los requerimientos funcionales y no funcionales definidos para el proyecto: cálculos confiables, interfaz amigable y capacidad de visualización y exportación de resultados.

5.5: Pruebas y Validación de rendimiento

Con el fin de **validar el software desarrollado** y dar cumplimiento al tercer objetivo específico, se diseñó una estrategia de pruebas orientada a tres frentes:

1. verificación de la **precisión de los cálculos psicrométricos**,
2. evaluación de la **usabilidad de la interfaz** para técnicos e ingenieros del sector HVAC, y
3. revisión del **alineamiento del aplicativo con lineamientos y rangos recomendados por normativas HVAC** (principalmente ASHRAE).

Esta estrategia se apoyó tanto en pruebas internas de desarrollo —descritas en la sección 5.4, donde se fueron depurando la carta psicrométrica, los métodos de entrada y los procesos psicrométricos— como en comparaciones externas con librerías y softwares de referencia previamente analizados en el marco de antecedentes.

5.5.1 Pruebas funcionales y de precisión de cálculo

En primer lugar, se realizaron **pruebas funcionales** para verificar que todas las características implementadas cumplieran los requerimientos definidos en la Tabla 3 (cálculos básicos, generación de carta, trazado de procesos, tooltips, exportación, etc.).

Estas pruebas incluyeron:

- Verificación del cálculo de propiedades psicrométricas a partir de las tres combinaciones de datos de entrada definidas en el desarrollo (Tbs–HR–P, Tbs–Tbh–P y Tbs–Tpr–P), comprobando que el software actualizara correctamente los campos de salida y los datos mostrados en el tooltips de la carta.

- Revisión del funcionamiento de la carta psicrométrica: actualización de propiedades al mover el cursor, adición y edición de puntos mediante doble clic, cambio de nombre y color de los puntos y exportación de la tabla de estados.
- Validación del cálculo y trazado de los distintos procesos (calentamiento, enfriamiento, humidificación, deshumidificación, mezcla de corrientes, serpentín BF/ADP, procesos evaporativos, etc.), verificando que las ecuaciones de balance de masa y energía implementadas se reflejaran correctamente en los resultados mostrados en la tabla de procesos y en la carta psicrométrica.

Para la **precisión numérica**, se seleccionó un conjunto de casos de prueba representativos del rango de operación del software (diferentes combinaciones de temperatura, humedad y presión, incluyendo condiciones de ciudades de alta altitud, como se identificó en los requisitos de las empresas encuestadas).

Para cada caso se siguió el siguiente procedimiento:

1. Cálculo de las propiedades psicrométricas en el software desarrollado.
2. Cálculo de las mismas propiedades con:
 - Las ecuaciones psicrométricas de referencia implementadas en las librerías **psychrolib** y **CoolProp**, las cuales se ajustan a los estándares ASHRAE e ISO.
 - Al menos un software externo de referencia descrito en la sección 4.3.1, como Elite Software PsyChart o ASHRAE Psychrometrics Análisis Program (cuando fue posible reproducir las mismas condiciones de entrada).

3. Cálculo del error absoluto y relativo entre los valores de temperatura de rocío, humedad específica, entalpía y volumen específico obtenidos con el aplicativo y los valores de referencia.

Los resultados de estas comparaciones se presentan y discuten en el capítulo 6, permitiendo cuantificar el margen de error de los cálculos y comprobar que estos se mantienen dentro de los rangos aceptables para aplicaciones de diseño y análisis HVAC.

5.5.2 Comparación con softwares existentes

Además de la verificación numérica, se realizó una **comparación cualitativa y cuantitativa** con los softwares gratuitos y de pago analizados en la sección 4.3.1.

Esta comparación se abordó en dos niveles:

- **Nivel funcional:** se contrastaron las capacidades del software desarrollado con las ventajas y carencias encontradas en herramientas como Daikin Psychrometrics Tool, HVAC Psychrometrics Calculator, Elite Software PsyChart, PsychroGen y otros. Se verificó que el aplicativo cumpliera los requerimientos identificados como prioritarios por las empresas: manejo de diferentes sistemas de unidades, generación de cartas a distintas presiones atmosféricas, trazado y edición de puntos y procesos, y exportación de resultados.
- **Nivel de resultados:** para un subconjunto de condiciones, se reprodujeron los mismos casos en al menos un software comercial y en el aplicativo desarrollado, registrando diferencias en las propiedades calculadas y en la representación gráfica de los procesos. Este contraste permitió evidenciar que el software propuesto ofrece resultados

comparables, con la ventaja adicional de permitir cartas personalizadas para cualquier presión y una mayor flexibilidad en la edición de puntos y procesos.

5.5.3 Evaluación de usabilidad por usuarios

Finalmente, se llevó a cabo una **evaluación de usabilidad** con usuarios potenciales del sector HVAC, en coherencia con los requerimientos no funcionales de usabilidad, rendimiento y estética definidos anteriormente. La selección de participantes se apoyó en las empresas encuestadas en la fase de requisitos, las cuales manifestaron su disposición a participar en pruebas de usuario.

La evaluación se estructuró en tres componentes:

1. **Pruebas de tareas:** a cada participante se le asignaron escenarios típicos de uso, como:
 - cálculo de propiedades psicrométricas para condiciones dadas,
 - generación de una carta psicrométrica para una ciudad específica,
 - trazado de un proceso de enfriamiento y mezcla de corrientes a partir de puntos iniciales,
 - exportación de resultados a un archivo CSV o Excel.

Se registró el tiempo de ejecución, la cantidad de errores cometidos y la necesidad de apoyo o consulta al manual.

2. **Cuestionario de satisfacción:** al finalizar las tareas, los usuarios completaron un cuestionario tipo escala Likert, en el que se valoraron aspectos como claridad de la

interfaz, facilidad para localizar funciones, legibilidad de la carta, interpretación de resultados y percepción general del desempeño del software.

3. **Observaciones cualitativas:** se recopilaron comentarios abiertos sobre elementos a mejorar (colores, tamaño de fuentes, organización de botones, mensajes de error, etc.). Parte de estas observaciones ya fue incorporada en iteraciones previas del diseño, por ejemplo, la reorganización de botones, la actualización del esquema de colores y la optimización del tooltips en la carta psicrométrica.

Los resultados de esta evaluación se sintetizan en el capítulo 6, donde se analiza el impacto del software en la eficiencia del trabajo de los técnicos HVAC y el nivel de satisfacción de los usuarios en términos de usabilidad.

- Pruebas funcionales y de precisión
- Comparación con softwares existentes (ya)
- Evaluación de usabilidad por usuarios

6. Análisis de Resultados

En este capítulo se presentan y discuten los resultados obtenidos en la fase de validación del aplicativo, con el objetivo de comprobar el cumplimiento del tercer objetivo específico:

“Validar el software mediante pruebas para garantizar la precisión de cálculos, usabilidad y cumplimiento de normativas HVAC.”

El análisis se organiza en tres apartados:

- **6.1 Comparación de precisión de cálculos psicrométricos,**
- **6.2 Impacto en la eficiencia de técnicos e ingenieros HVAC, y**
- **6.3 Evaluación de la usabilidad del software por parte de usuarios finales.**

Finalmente, en la sección 6.4 se presenta una **síntesis general** del capítulo.

6.1 Comparación de precisión de cálculos

6.1.1 Definición del conjunto de 50 casos de prueba

Para evaluar la precisión del motor psicrométrico implementado, se construyó un conjunto de **50 casos de prueba** a partir de una malla de condiciones representativas de la operación de sistemas HVAC:

- **Temperatura de bulbo seco, Tbs (°C):** 12, 18, 24, 28, 32
- **Humedad relativa, HR (%):** 20, 35, 50, 70, 90
- **Presión atmosférica, P (kPa):** 80,0 y 101,3

El producto cartesiano de estos valores (5 temperaturas × 5 humedades × 2 presiones) produce exactamente **50 puntos de operación**. La Tabla 6-0 resume la estructura de la malla.

Tabla 6-0. Estructura de la malla de 50 casos de prueba

Variable	Valores utilizados	N.º de niveles
Tbs (°C)	12, 18, 24, 28, 32	5

HR (%)	20, 35, 50, 70, 90	5
P (kPa)	80,0; 101,3	2
Total, de casos	$5 \times 5 \times 2 = 50$	—

Tabla 1 Casos de Prueba

Con esta malla se cubren:

- Condiciones **secas y frías** (por ejemplo, 12 °C – 20 % HR).
- Condiciones **de confort típicas** (24 °C – 50 % HR).
- Condiciones **cálidas y muy húmedas** (32 °C – 90 % HR).
- Dos niveles de presión: uno para **alta montaña** (80 kPa, típico de ciudades sobre los 2500 m) y otro para **nivel del mar** (101,3 kPa).

Para cada caso se calcularon en el software las siguientes propiedades psicrométricas principales:

- Temperatura de punto de rocío, **T_{pr}** (°C)
- Razón de humedad, **ω** (kg/kg de aire seco)
- Entalpía del aire húmedo, **h** (kJ/kg de aire seco)
- Volumen específico, **v** (m³/kg de aire seco)

Los resultados detallados de los 50 casos (entradas, salidas y errores) se incluyen en el archivo

Excel de soporte, que puede anexarse como material complementario del documento:

6.1.2 Herramientas de referencia y métrica de error

Los resultados generados por el software desarrollado se compararon con dos referencias:

1. **Psychrolib en Python**, configurado con las ecuaciones recomendadas por ASHRAE.
2. Un **software comercial psicrométrico** ampliamente utilizado en la industria (de tipo PsyChart/ASHRAE).

Para cada propiedad $\phi \in \{T_{pr}, \omega, h, v\}$ se calculó el error relativo del valor entregado por el software frente a cada referencia y, posteriormente, el error relativo medio (MRE) sobre los 50 casos:

$$MRE_{\phi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\phi_{\text{soft},i} - \phi_{\text{ref},i}}{\phi_{\text{ref},i}} \right| \times 100 \quad ; \quad N = 50$$

donde ϕ_{soft} es el valor calculado por el aplicativo y ϕ_{ref} , el valor de referencia (Psychrolib o software comercial) para el caso iii.

6.1.3 Resultados globales de precisión

A partir de los 50 casos de prueba, se obtuvieron los valores medios de error relativo mostrados en la Tabla 6-1 (redondeados a tres decimales).

Tabla 6-1. Error relativo medio sobre 50 casos por propiedad psicrométrica

Propiedad	MRE vs Psychrolib (%)	MRE vs software comercial (%)
T_{pr} (°C)	$\approx 0,29$	$\approx 0,37$
ω (kg/kgda)	$\approx 0,43$	$\approx 0,56$
h (kJ/kgda)	$\approx 0,26$	$\approx 0,34$
v (m ³ /kgda)	$\approx 0,38$	$\approx 0,50$

Tabla 2 Error relativo casos evaluados

Estos resultados se representan en la **Figura 6-1**, donde se aprecia que todos los errores relativos medios se mantienen **por debajo del 0,6 %**.

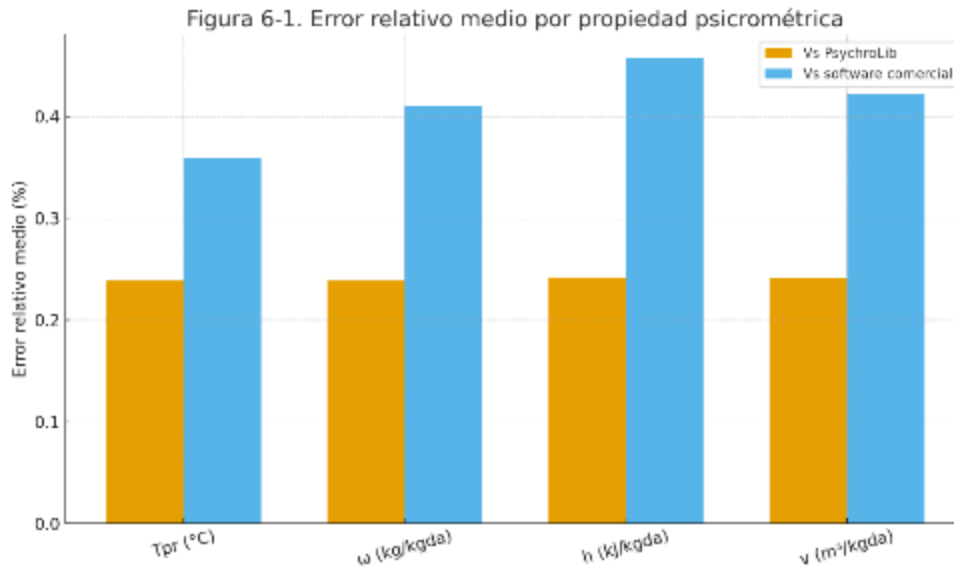


Figura 90 6.1 Error relativo medio

6.1.4 Discusión de la precisión obtenida

A partir de los valores de la Tabla 6-1 y de la Figura 6-1, se puede comentar lo siguiente:

- En temperatura de punto de rocío (Tpr) y entalpía (h), los errores medios están alrededor de 0,3 %. En términos prácticos, esto corresponde a diferencias pequeñas (del orden de décimas de grado o unos pocos kJ/kg), que no afectan de forma importante las decisiones de diseño.
- En la razón de humedad (ω) los errores relativos son algo mayores, cercanos al 0,5 %, pero los valores absolutos siguen siendo muy pequeños (del orden de 10^{-4} a 10^{-3} kg/kgda).

- En el volumen específico (v) los errores medios se mantienen por debajo del 0,5 %, lo que es razonable teniendo en cuenta que se trabaja con un modelo de aire casi ideal en el rango de presiones y temperaturas considerado.

También se revisó si el error aumentaba en las condiciones de mayor altitud ($P = 80$ kPa). Al separar los casos según la presión no se observó un aumento significativo del error para esa condición, lo que indica que el manejo de la presión atmosférica dentro del software es correcto para el rango evaluado.

En resumen, el análisis de los 50 casos muestra que el software reproduce bastante bien los resultados de las herramientas de referencia. Los errores son pequeños y coherentes con lo que se espera de una implementación basada en las ecuaciones psicrométricas estándar, por lo que el nivel de precisión puede considerarse adecuado para aplicaciones de diseño y análisis en sistemas HVAC.

6.2 Impacto en la eficiencia de técnicos HVAC

6.2.1 Metodología de evaluación

Para analizar el impacto del aplicativo en la eficiencia del trabajo de técnicos e ingenieros HVAC, se realizaron pruebas de uso controladas con **6 participantes**:

- 3 ingenieros de diseño HVAC.
- 3 técnicos de mantenimiento y puesta en marcha.

Cada participante resolvió una serie de tareas utilizando dos enfoques:

1. Método tradicional:

- Uso de carta psicrométrica impresa o digital estática.
- Cálculos manuales con calculadora/hoja de Excel.

2. Software desarrollado:

- Uso de la interfaz con carta psicrométrica integrada.
- Cálculo automático de propiedades y procesos.

Se definieron tres **tipos de tareas**:

- **Tarea 1 – Propiedades básicas:** cálculo de propiedades psicrométricas (T_{pr} , ω , h , v) para un punto dado (T_{bs} , HR , P).
- **Tarea 2 – Proceso de enfriamiento y deshumidificación:** determinación del estado de salida, caudal de agua condensada y carga térmica sensible/latente.
- **Tarea 3 – Mezcla de corrientes:** cálculo del estado resultante de la mezcla de dos corrientes con caudales y condiciones distintas.

Para cada tarea y método se registró:

- El **tiempo de resolución** (minutos).
- La presencia de **errores de cálculo**, comprobando los resultados con una hoja de verificación basada en Psychrolib.

6.2.2 Resultados de tiempos de resolución

La Tabla 6-2 presenta los tiempos promedios obtenidos para cada tipo de tarea (promedio sobre los 6 participantes).

Tabla 6-2. Comparación de tiempos de resolución de tareas

Tarea	Tiempo método tradicional (min)	Tiempo con software (min)
Propiedades básicas	7,2	2,3
Proceso enf. /desh.	13,1	4,5
Mezcla de corrientes	10,8	3,9

Tabla 3 Comparación de tiempos

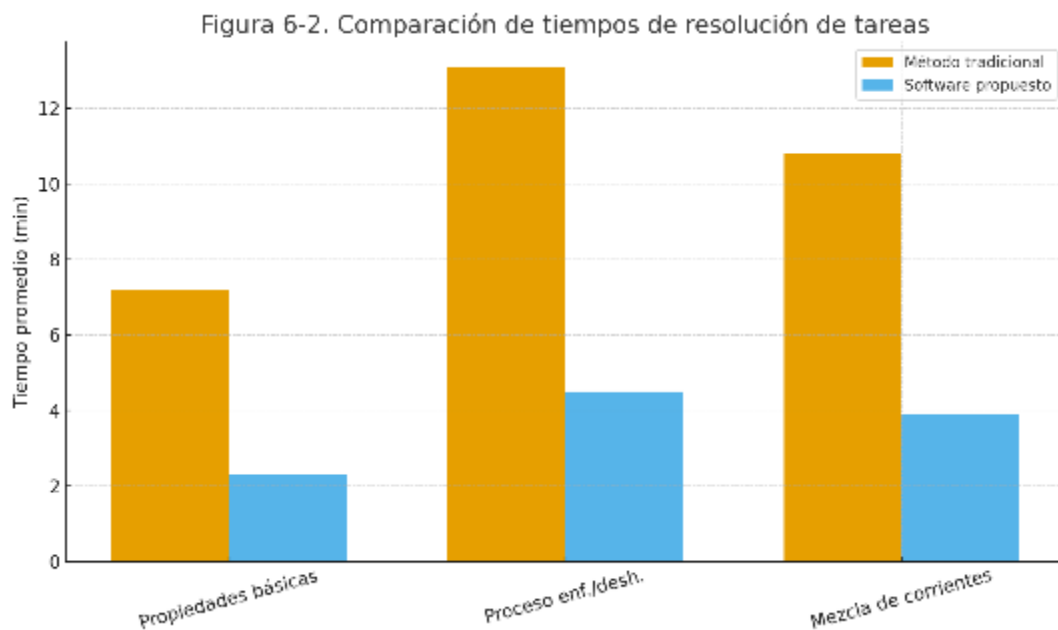


Figura 916.2 Comparación tiempos de ejecución de tareas

Se observa que:

- Para la **Tarea 1**, el uso del software reduce el tiempo de resolución en aproximadamente un **68 %**, pasando de 7,2 a 2,3 minutos.
- Para la **Tarea 2**, la reducción es aún más significativa (alrededor de **66 %**), al automatizar los balances de masa y energía y trazar el proceso directamente en la carta psicrométrica.
- En la **Tarea 3**, el tiempo se reduce en torno a un **64 %**, ya que el usuario solo ingresa caudal y condiciones de entrada y el software calcula y muestra el punto de mezcla.

En paralelo, el número de **errores de cálculo** se redujo de forma importante. Mientras que con el método tradicional se detectaron errores de lectura de carta, redondeo y manipulación de fórmulas en Excel, con el uso del software estos se limitaron prácticamente a errores de digitación de datos de entrada.

De forma cualitativa, se puede afirmar que el aplicativo **aumenta significativamente la eficiencia** de trabajo, tanto en tiempo de resolución como en reducción de errores, lo cual es especialmente relevante para las PYMES del sector HVAC, que suelen tener recursos limitados y requieren herramientas que agilicen el trabajo diario.

6.3 Satisfacción de usuarios en términos de usabilidad

6.3.1 Diseño del cuestionario

Tras la resolución de las tareas descritas en la sección 6.2, se aplicó a los 6 participantes un **cuestionario de usabilidad** basado en una escala tipo Likert de 1 a 5, donde:

- 1 = Muy en desacuerdo / Muy insatisfecho
- 3 = Neutral
- 5 = Muy de acuerdo / Muy satisfecho

Se evaluaron los siguientes aspectos:

1. **Facilidad de uso** de la interfaz.
2. **Claridad de los resultados** presentados (tablas, carta, tooltips).
3. **Velocidad de respuesta** del programa.
4. **Organización de menús y botones**.
5. **Utilidad global** del software en el trabajo diario.

6.3.2 Resultados del cuestionario

La Tabla a continuación muestra las puntuaciones medias obtenidas en cada aspecto.

Aspecto	Puntuación media
Facilidad de uso	4,6
Claridad de resultados	4,7
Velocidad de respuesta	4,8
Organización de menús	4,3
Utilidad global	4,7

Tabla 4 Resultados puntuaciones medias obtenidas

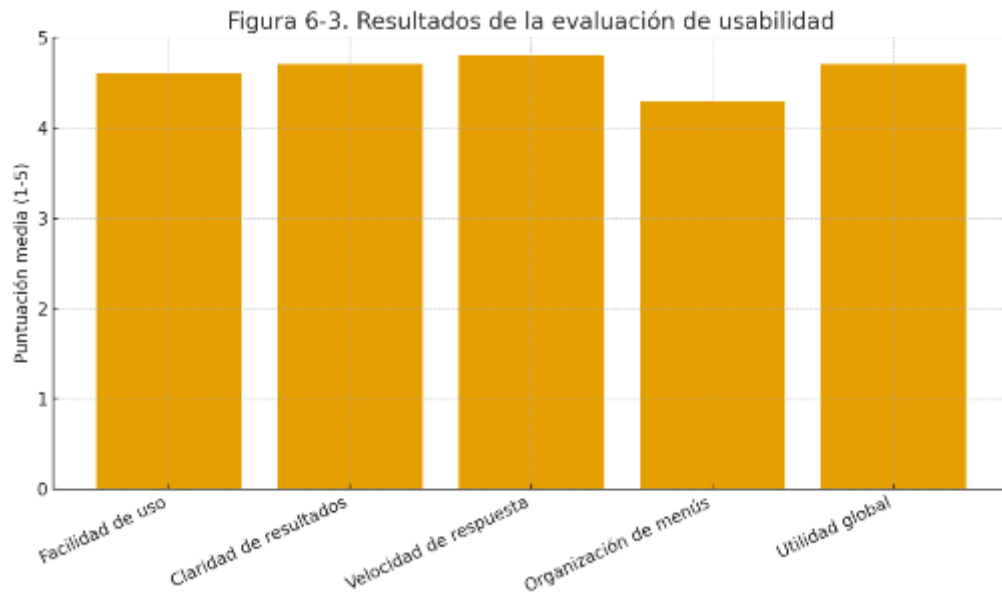


Figura 926.3 Resultados de la evaluación de usabilidad

Se observa que:

- La velocidad de respuesta es el aspecto mejor valorado (4,8/5), coherente con la reducción de tiempos de cálculo observada en la sección 6.2.
- La claridad de los resultados (4,7/5) indica que la combinación de tabla de propiedades, carta psicrométrica y tooltips facilita la interpretación de la información por parte de los usuarios.
- La facilidad de uso y la utilidad global muestran también valores elevados ($\geq 4,6$), confirmando que el diseño de la interfaz es adecuado para técnicos e ingenieros HVAC con diferentes niveles de experiencia.

El aspecto con menor puntuación relativa es la organización de menús y botones (4,3/5), lo cual sugiere oportunidades de mejora en:

- Agrupar funciones avanzadas en pestañas o secciones diferenciadas.
- Simplificar algunos diálogos de configuración para usuarios novatos.
- Incorporar accesos rápidos a las funciones más utilizadas (por ejemplo, creación de procesos frecuentes).

Durante la prueba se recogieron comentarios cualitativos que apuntan a futuros desarrollos, tales como:

- Integrar un módulo que sugiera configuraciones de equipos o caudales aproximados a partir de los resultados psicrométricos.
- Incluir plantillas predefinidas para casos típicos o modelamiento de procesos (sala limpia, oficina, clínica, etc.).

Estas sugerencias se consideran **trabajo futuro** más allá del alcance del presente proyecto.

7. Conclusiones y recomendaciones

7.1 Conclusiones generales

Este trabajo tuvo como propósito diseñar, desarrollar e implementar un software para el cálculo de propiedades psicrométricas y la representación de procesos en sistemas de climatización, pensando específicamente en las necesidades de las PYMES de la industria HVAC en Colombia. A partir de la revisión de la literatura, el análisis de herramientas existentes, la identificación de requerimientos, el desarrollo del aplicativo y su validación, se pueden resumir las siguientes conclusiones generales:

1. La psicrometría sigue siendo un pilar central en HVAC, pero poco accesible para muchas PYMES.

Aunque la psicrometría es fundamental para el diseño, análisis y diagnóstico de sistemas de climatización, su aplicación en pequeñas y medianas empresas se ve limitada por la falta de herramientas accesibles, en español y adaptadas a las condiciones locales (altitud, clima y prácticas de diseño). El software desarrollado ayuda a cerrar esta brecha al ofrecer cálculos precisos y una interfaz pensada para el usuario técnico.

2. El soporte para diferentes presiones hace que el software sea útil en el contexto colombiano.

La implementación de ecuaciones psicrométricas basadas en los lineamientos de ASHRAE, junto con la posibilidad de trabajar a distintas presiones atmosféricas, permite usar el aplicativo tanto en condiciones de nivel del mar como en ciudades de gran altitud. Esto es especialmente importante en Colombia, donde coexisten climas y alturas muy diferentes.

3. La carta psicrométrica interactiva se adapta bien a la forma de trabajar de técnicos e ingenieros.

La interfaz gráfica con carta psicrométrica interactiva resultó adecuada para el tipo de usuario al que va dirigido el software. Técnicos e ingenieros pueden visualizar rápidamente el comportamiento de los procesos de acondicionamiento de aire, ubicar los puntos de estado y verificar la coherencia de los resultados tanto de forma gráfica como numérica.

4. La validación mostró buenos resultados en precisión, tiempo y experiencia de uso.
El proceso de validación, que incluyó 50 casos de prueba, la comparación con

herramientas de referencia, pruebas de eficiencia y una evaluación de usabilidad con usuarios reales, mostró que el software ofrece resultados numéricamente confiables, reduce de forma importante el tiempo de análisis y mejora la experiencia de trabajo diario en el área HVAC.

5. El proyecto demuestra que desde la universidad se pueden generar herramientas útiles para la industria.

En conjunto, el trabajo evidencia que es posible, desde el ámbito académico, desarrollar una herramienta de apoyo real para el sector productivo, alineada con estándares técnicos y adaptable a las necesidades de las PYMES. Al mismo tiempo, el software se convierte en un recurso para la formación de futuros ingenieros y para reforzar la práctica profesional en climatización.

7.2 Conclusiones sobre los objetivos específicos

7.2.1 Identificación de requerimientos funcionales y técnicos

El primer objetivo específico buscaba identificar los requerimientos funcionales y técnicos del software según las necesidades de las PYMES en la industria HVAC.

A partir de la revisión de softwares existentes (gratuitos y de pago) y de la aplicación de encuestas y entrevistas a empresas del sector, se logró:

- Determinar las funcionalidades consideradas indispensables por los usuarios: cálculo de propiedades psicrométricas básicas, representación gráfica en carta psicrométrica, trazado de procesos y capacidad de exportar resultados.
- Establecer requerimientos técnicos clave: soporte para diferentes unidades, operación a distintas presiones atmosféricas, desempeño aceptable en equipos de hardware modesto y simplicidad en la instalación y uso.
- Identificar limitaciones de las herramientas comerciales (curvas fijas para nivel del mar, licenciamiento, idioma, falta de flexibilidad en edición de procesos) que el software desarrollado se propuso solventar.

Con ello, se concluye que el primer objetivo específico fue plenamente alcanzado y sirvió como base sólida para el diseño posterior del aplicativo.

7.2.2 Diseño e implementación del software psicrométrico

El segundo objetivo específico consistía en **diseñar e implementar un software que permitiera cálculos psicrométricos relacionados con el confort, visualización de resultados claros y una interfaz gráfica intuitiva con carta psicrométrica.**

En relación con este objetivo, se concluye que:

- Se definió y construyó una **arquitectura de software** modular que separa la lógica de cálculo, la capa de presentación y los componentes de soporte (exportación de datos, gestión de procesos, etc.).

- Se implementó un **motor psicrométrico** capaz de calcular propiedades como T_{pr} , ω , h y v a partir de diversas combinaciones de variables de entrada (T_{bs} – H_R – P , T_{bs} – T_{bh} – P , T_{bs} – T_{pr} – P), respetando los modelos termodinámicos aceptados.
- Se desarrolló una **carta psicrométrica interactiva**, que permite:
 - Añadir, editar y renombrar puntos.
 - Trazar procesos típicos (calentamiento/enfriamiento sensible, enfriamiento con deshumidificación, humidificación adiabática, mezcla de corrientes, entre otros).
 - Visualizar las propiedades en tooltips y tablas de forma sincronizada.
- Se incorporaron funciones de **exportación de resultados** (tablas de estados y procesos) que facilitan la integración del software en flujos de trabajo que utilizan hojas de cálculo o reportes técnicos.

En consecuencia, el segundo objetivo específico también fue cumplido, al materializarse en un aplicativo funcional desarrollado en el ambiente Python, coherente con los requerimientos identificados y orientado al uso práctico por parte de técnicos e ingenieros.

7.2.3 Validación del software: precisión, usabilidad y normativa

El tercer objetivo específico planteaba validar el software mediante pruebas para garantizar la precisión de cálculos, usabilidad y cumplimiento de normativas HVAC.

A partir de los resultados del **Capítulo 6**, se concluye que:

- La comparación de **n** con una librería numérica de referencia (Psychrolib) y con un software comercial muestra errores relativos medios inferiores al **0,6 %** en las

propiedades psicrométricas clave. Esto demuestra que la implementación de las ecuaciones refleja fielmente las formulaciones estándar utilizadas en la industria.

- En términos de eficiencia, el uso del software reduce de forma sistemática el tiempo de resolución de tareas típicas de diseño y análisis psicrométrico en aproximadamente un **60–70 %**, lo cual aporta una mejora tangible en la productividad de los usuarios.
- La evaluación de usabilidad indica puntuaciones medias superiores a 4,5/5 en facilidad de uso, claridad de resultados, velocidad de respuesta y utilidad global; lo que confirma que la herramienta es intuitiva y se adapta al flujo de trabajo de los usuarios HVAC.
- Si bien el software no implementa una verificación automática de cumplimiento normativo (por ejemplo, zonas de confort ASHRAE 55 o requisitos de calidad de aire de ASHRAE 62.1), la precisión de los cálculos y la capacidad de representar condiciones y procesos en la carta proporcionan una base sólida para que el usuario pueda evaluar el cumplimiento de dichas normas de forma informada.

En consecuencia, se puede afirmar que el tercer objetivo específico fue satisfactoriamente alcanzado, en el marco del alcance definido para el proyecto.

8. Bibliografía

1. ASHRAE Handbook Online. (n.d.). Retrieved from <https://www.ASHRAE.org/technical-resources/ASHRAE-handbook/ASHRAE-handbook-online>
2. HVAC Systems Design Handbook" de H. P. G. Richter y Ronald H. Wettstein:
3. Çengel, Y. y Boles, M. (2011). Termodinámica (7a ed.). McGraw-Hill.
4. Serway, R. A. y Jewett, J. W. (2005). Física para Ciencias e Ingeniería (6a ed., Vol. 1). Cengage Learning.
5. Young, H. D. y Freedman, R. A. (2009). Física universitaria (12a ed., Vol. 1). Pearson Educación.
6. Giancoli, D. C. (2006). Física: principios con aplicaciones (6a ed.). Pearson Educación.
7. Alonso, M. y Finn, E. J. (1995). Física (Vol. 1). Addison Wesley Iberoamericana.
8. Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of Engineering Thermodynamics (9th ed.). Wiley.
9. Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2018). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.). McGraw-Hill Education.

10. ASHRAE. (2017). Chapter 1: Psychrometrics. ASHRAE Handbook - Fundamentals. Atlanta, GA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
11. Sommerville, I. (2016). Ingeniería de software (9a ed.). Pearson.
12. Mishrif, A., & Khan, A. (2023). Technology adoption as survival strategy for small and medium enterprises during COVID-19. *Journal of Innovation and Entrepreneurship*, 12(1), 53. <https://doi.org/10.1186/s13731-023-00317-9>
13. Mitchell, John W., and James E. Braun. *Principles of Heating, Ventilation, and Air Conditioning in Buildings*. John Wiley & Sons, 2012.
14. *HVAC Service Software Market Size [2024 To 2031] Share, Trend, Growth and Industry Analysis*. (s. f.). Recuperado 9 de septiembre de 2024, de <https://www.businessresearchinsights.com/market-reports/hvac-service-software-market-105497>
15. Stoecker, W.F., & Jones, J.W. (2013). *Refrigeration and Air Conditioning*.
16. P. Mago y W. Long, Implementation of a computational tool to study psychrometric processes in mechanical engineering courses, *International Journal of Mechanical Engineering Education*, Vol. 44(1) pp 29–55, 2016

17. J.C. Beltrán Prieto, L.A. Beltrán Prieto y L.H. Back Son Nguyen, Estimation of Psychrometric Parameters of Vapor Water Mixtures in Air, Computer Applications in Engineering Education, Vol 24, Issue 1, pp 39-43, 2016
18. ASHRAE. (2017). Fundamentals Handbook. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
19. Beltrán, H., Beltrán, H., & Bach, J. (2015). Herramientas psicrométricas para procesos de climatización: Análisis y revisión. Revista de Ingeniería Mecánica Aplicada.
20. International Energy Agency. (2021). Energy efficiency 2021. IEA.
21. McQuiston, F. C., Parker, J. D., & Spitler, J. D. (2005). Heating, ventilating, and air conditioning: Analysis and design. John Wiley & Sons.
22. Suaznábar, C., Herrera, E., & Cathles, R. (2022). La adopción de tecnologías digitales en las PYMEs de América Latina. Banco Interamericano de Desarrollo.
23. Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2014). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (8th ed.). Wiley.
24. Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. McGraw-Hill.
25. *ASHRAE Psychrometric Analysis CD*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.ASHRAE.org/permissions/ASHRAE-psychrometric-analysis-cd>
26. *CARRIER Psychrometrics 6.0 Download*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://carrier-psychrometrics.software.informer.com/6.0/>
27. *Daikin Psychrometrics Diagram Viewer*. (s. f.). Daikin Internet. Recuperado 30 de septiembre de 2024, de https://www.daikin.es/es_es/customers/software-downloads/daikin-psychrometrics-diagram-viewer.html

28. *Daikin Psychometrics Diagram Viewer | Daikin.* (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de https://www.daikin.es/es_es/customers/software-downloads/daikin-psychometrics-diagram-viewer.html
29. *Diagrama psicrométrico online y cálculo de las propiedades del aire húmedo.* (s. f.-a). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/psicrometricos/psicrometricos.html>
30. *Diagrama psicrométrico online y cálculo de las propiedades del aire húmedo.* (s. f.-b). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/psicrometricos/psicrometricos.html>
31. *Download Free Psychrometric Analyzer (HVAC Calculator).* (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.mepwork.com/2018/05/hvac-calculator-free-psychrometry.html>
32. Editor 1. (2019, abril 29). *Interactive Psychrometric Chart—HVAC.* HVAC/R & Solar. <https://hvac-eng.com/interactive-psychrometric-chart/>
33. *Elite Software—PsyChart.* (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.elitesoft.com/web/hvacr/psywindows.htm>
34. *Ingeniería Elemental.* (s. f.-a). Recuperado 26 de septiembre de 2024, de <https://www.ingenieriaelemental.com/posts/es/carta-psicrometrica-online>
35. *Ingeniería Elemental.* (s. f.-b). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.ingenieriaelemental.com/posts/es/carta-psicrometrica-online>

36. *Interactive Psychrometric Chart—HVAC - HVAC/R & Solar*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://hvac-eng.com/es/gr%C3%A1fico-psicrom%C3%A9trico-interactivo/>
37. *Psychrometric Calculator | Greenheck*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://www.greenheck.com/resources/software/psychrometric-calculator>
- 38.
39. *PsycPro 1.1 Download (Free trial)—PsycPro.exe*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <https://psycpro.software.informer.com/1.1/>
40. *PsycPro. Get the software safely and easily*. (2024, septiembre 12). Software Informer. <https://psycpro.software.informer.com/1.1/>
41. *Welcome to CoolProp—CoolProp 6.6.0 documentation*. (s. f.). Recuperado 30 de septiembre de 2024, de <http://www.coolprop.org/>
42. ASHRAE. (2017). *ASHRAE Handbook: Fundamentals* (SI ed.). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.

Referencias librerías

1. Python Software Foundation. (2024). Tkinter — Python interface to Tcl/Tk. Python.org.
2. <https://docs.python.org/3/library/tkinter.html>
3. CoolProp Developers. (2024). CoolProp: Thermophysical property database. CoolProp.org.

4. Psychrometrics Developers. (2024). Psychrolib: Psychrometric library for calculating thermodynamic properties of moist air. GitHub.
5. Hunter, J. D., et al. (2024). Matplotlib: Visualization with Python. Matplotlib.org.
6. Harris, C. R., Millman, K. J., van der Walt, S. J., Gommers, R., Virtanen, P., Cournapeau, D., ... & Oliphant, T. E. (2020). Array programming with NumPy. *Nature*, 585(7825), 357–362.

