

CLASIFICACIÓN DE CRITERIOS MÍNIMOS DE DISEÑO, SELECCIÓN Y FABRICACIÓN DE  
TUBERÍAS EN SISTEMAS HVAC&R

Fabian Fernando Pedraza Torres

Trabajo de Grado para Optar al Título de Especialista en Ingeniería de Refrigeración y  
Climatización

Director

Juan Pablo Flórez Mera

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Posgrado de especialización de ingeniería de refrigeración y climatización

Bucaramanga

2025

### **Dedicatoria**

Dedico este esfuerzo a mi madre, quien en vida siempre veló por mi crecimiento como persona y como profesional. A ella le dedico este trabajo y el título que representa, ya que a ella le hubiera gustado ver este nuevo logro profesional.

## **Agradecimientos**

Este documento es el resultado de muchos años de experiencia, conocimientos adquiridos, esfuerzo y dedicación del autor y de los profesionales que interactuaron con él durante casi 11 años en la industria de la refrigeración industrial.

A mis colegas, familia y amigos, quienes me acompañaron en este camino, que desde la academia, se interrumpió por muchas razones. Solo aquellos que me conocen, saben el esfuerzo que me causó el poder retomarlo y poder culminar este logro a cabalidad.

Esta monografía refleja mi intención de poder transmitir mi conocimiento en diseño de redes de tubería, que tan solo es un pequeño apartado de mi aporte como profesional, al integrar mi conocimiento de la herramienta ofimática a la ingeniería mecánica, al desarrollar una herramienta de libre uso para quienes se enfrentan a la toma de decisiones en el campo del diseño, validación y selección de tubería para sistemas de refrigeración.

Espero que mi historia sirva de inspiración a quienes luchan contra la adversidad, cuestiones económicas y de los cambios de vida drásticos en torno a los cambios de vida. Estoy seguro que con determinación y apoyo, cualquier meta es alcanzable.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
<b>Contenido</b>	
Glosario.....	10
Introducción.....	14
1. Planteamiento del Problema .....	15
1.1 Formulación del Problema .....	16
1.1.1 Sistematización del Problema .....	16
2. Objetivos.....	17
2.1 Objetivo General.....	17
2.2 Objetivos Específicos.....	17
3. Justificación .....	18
3.1 Justificación Teórica.....	18
3.2 Justificación Social - Práctica .....	18
4. Marco Referencial.....	19
4.1 Marco Teórico .....	19
4.1.1 Principios de Funcionamiento de los Sistemas de refrigeración	
19	
4.1.1.1 Subcooling.....	21
4.1.1.2 Superheat .....	21

4.1.2	Coeficiente de Rendimiento (COP).....	22
4.1.3	Características de los tipos de Refrigerantes .....	23
4.1.4	Tuberías para sistemas de refrigeración .....	24
4.2	Marco Conceptual .....	26
4.2	Marco Legal.....	27
5.	Metodología .....	29
6.	Resultados .....	30
6.1	Objetivo Específico 1.....	30
6.1.1.	Lista de variables implícitas en la selección de diámetros de tubería:.....	31
6.1.2.	Criterios mínimos para el cálculo y selección de tubería:.....	32
6.1.3.	Metodología y paso a paso para validación de diámetros de tubería:.....	34
6.2	Objetivo Específico 2.....	35
6.3	Objetivo Específico 3.....	40
6.3.1.	Sección de datos de entrada del sistema.....	41
6.3.2.	Sección de criterios de selección. ....	42

6.3.3. Sección de la interfaz gráfica para sistemas tipo espina de pescado. ....	42
6.3.4. Sección de resultados de las selecciones.....	43
6.3.5. Sección de variables físicas del sistema.....	44
6.3.6. Sección de cálculo e iteración. ....	45
6.3.7. Ejemplo comparativo de la herramienta con los otros programas del objetivo 2. ....	47
7. Conclusiones .....	49
Referencias Bibliográficas .....	52
Apéndices .....	49

### Lista de Figuras

Fig 1. Diagrama de mollier, basado en manual Handbook refrigeración 271 de 2024.....	<u>20</u>
Fig 2. Interfaz general del software Coolselector2 .....	<u>36</u>
Fig 3. Sección de los datos de entrada en software Coolselector2 .....	<u>37</u>
Fig 4. Selección de tubería de acuerdo al software Coolselector2 .....	<u>37</u>
Fig 5. Interfaz general de acuerdo al software Linesize .....	<u>38</u>
Fig 6. Selección de tubería de acuerdo al software Linesize .....	<u>39</u>
Fig 7. Sección de datos de entrada del sistema de la herramienta de cálculo .....	<u>41</u>
Fig 8. Sección de criterios de selección de la herramienta de cálculo .....	<u>42</u>
Fig 9. Sección de interfaz gráfica para sistemas tipo espina de pescado .....	<u>43</u>
Fig 10. Sección de resultado de las selecciones de la herramienta de cálculo .....	<u>44</u>
Fig 11. Sección de variables físicas de la herramienta de cálculo .....	<u>44</u>
Fig 12. Apartado de longitud equivalente por accesorios línea de succión para cada tramo de tubería .....	<u>46</u>
Fig 13. Apartado de longitud equivalente por accesorios línea de líquido para cada tramo de tubería .....	<u>47</u>
Fig 14. Resultados de selección de tubería de succión para el ejemplo 1 .....	<u>48</u>
Tabla 1. Efecto del incremento del aumento en la temperatura de la línea de succión para el refrigerante R22, a SST 5°C y SCT 40°C, basada en la tabla 2 del capítulo 1.3 del Handbook 271 de la ASHRAE.....	<u>30</u>
Tabla 2. Variables implícitas en la selección de diámetros de tubería .....	<u>31</u>

Tabla 3. Apartado del conteo de accesorios de acuerdo a la información diligenciada en los datos de entrada y la interfaz gráfica .....	<u>45</u>
---	-----------

**Lista de Apéndices**

Apéndice A. Tabla 7 Handbook refrigeración 271 de 2024 .....	<u>53</u>
Apéndice B. Tabla de propiedades de Refrigerante R507A.....	<u>54</u>

## Glosario

A continuación, se presentan en orden alfabético, todos los conceptos relevantes para tener en cuenta para el desarrollo del proyecto de grado. Las fuentes de información fueron la Real Academia Española (2024), el Ministerio de Minas y Energía de Colombia (2023), el Ministerio del Medio Ambiente de Colombia (2024) y (ACAIRE, 2022).

**Acumulador de succión:** Recipiente metálico, considerado como elemento de refrigeración dentro de los sistemas HVAC&R, cuyo objetivo principal es el de acumular el refrigerante en estado líquido, para evitar que este líquido pase a la brida de succión del compresor.

**Arrastre de aceite:** Efecto físico que permite retornar el aceite particulado, presente en las tuberías cerradas, debido al flujo constante de la mezcla de refrigerante y aceite, para lograr dar continuidad a la lubricación de los componentes móviles del compresor.

**Botella de líquido:** Recipiente metálico con válvulas de servicio, para contener el refrigerante en estado líquido del sistema en las paradas del sistema y en funcionamiento.

**Capacidad frigorífica:** Magnitud de potencia que mide la cantidad de calor que puede disipar o absorber un elemento para el caso de intercambiadores, o la cantidad de potencia equivalente al flujo másico que puede transportar un compresor.

**Circuito de tubería de refrigeración:** Red de tuberías independientes, que hacen parte de un sistema de redes en paralelo, para succión y líquido, que interconectan acumulador de succión y botella de líquido con varios evaporadores, mediante la metodología espina de pescado.

**Compresor:** Componente principal en un sistema de aire acondicionado que comprime el refrigerante en estado gaseoso, aumentando su presión y temperatura antes de pasar al condensador.

**Condensador:** Dispositivo en un sistema de refrigeración donde el refrigerante libera calor al ambiente exterior y pasa del estado gaseoso al estado líquido.

**Efecto refrigerante:** Magnitud resultante de la energía útil en la etapa de evaporación, debido al cambio de fase líquido a gas del refrigerante de tránsito.

**Evaporador:** Componente del sistema de aire acondicionado donde el refrigerante absorbe calor del aire interior, evaporándose y enfriando el ambiente.

**Filtro secador:** Elemento de refrigeración y recipiente metálico que contiene un filtro, tipo cartucho o tipo piedra, que sirve para retirar la humedad presente en el sistema.

**Flash-gas:** Efecto causado por líquido refrigerante, al encontrarse en tránsito por diámetros de tubería no adecuados, que promueven la evaporación instantánea del líquido refrigerante antes de convertirse en efecto refrigerante útil en el evaporador.

**Flujo másico:** Cantidad de masa de refrigerante transportada en un intervalo de tiempo. Esta magnitud depende de la densidad del refrigerante, temperatura y trabajo impartido en un instante determinado.

**Golpe de ariete:** Fenómeno que se produce cuando la presión en una tubería cambia de forma brusca, provocando un aumento o disminución de la presión, y generando sobrepresiones en las líneas que pueden ocasionar daños del material y fugas en sistemas cerrados.

**Línea de descarga:** Tramo de tubería que va desde la salida del compresor hasta la entrada del condensador.

**Línea de líquido:** Tramo de tubería que va desde la salida del condensador hasta la entrada de la válvula de expansión.

**Línea de succión:** Tramo de tubería que va desde la salida del evaporador hasta la entrada del compresor.

**Presión de alta:** Variable de presión, medida con manómetro, presente entre las líneas de tubería desde la brida de descarga del compresor y la válvula de expansión.

**Presión de baja:** Variable de presión, medida con manómetro, presente entre las líneas de tubería desde la válvula de expansión hasta la brida de succión del compresor.

**Punto de operación:** Combinación de parámetros y variables que el diseñador tiene como referencia para calcular y seleccionar los equipos, componentes y elementos de refrigeración. Normalmente este punto de operación corresponde al punto crítico de análisis en el que los componentes deben funcionar y garantizar las condiciones de temperatura.

**Rack de compresores:** Conjunto de componentes mecánicos y eléctricos conformados por un mueble que aloja los principales componentes de la central de frío (acumulador de succión, botella de líquido, compresores, entre otros). De este conjunto se interconectan todos los circuitos de refrigeración del sistema.

**Refrigerante:** Sustancia utilizada en sistemas de refrigeración y aire acondicionado que circula por el sistema absorbiendo y liberando calor al cambiar de estado, de líquido a gaseoso y viceversa.

**Retorno de líquido:** Fenómeno que ocurre cuando el refrigerante de trabajo, que pasa por la línea de baja presión, no es evaporado en su totalidad por el evaporador, y

tampoco es atrapado por el acumulador de succión, pasa en estado líquido al compresor por su brida de succión.

**Temperatura Ambiente:** Nivel térmico del aire en un entorno específico, que puede afectar el confort, la salud y el desempeño de las personas en condiciones normales.

**Temperatura de condensación:** Temperatura a la cual el refrigerante en estado gaseoso, se condensa debido a la presión a la cual se encuentra en tránsito. Está relacionada a la temperatura de saturación del gas refrigerante correspondiente a la presión de saturación.

**Temperatura de evaporación:** Temperatura a la cual el refrigerante en estado líquido, se evapora debido a la presión a la cual se encuentra en tránsito. Está relacionada a la temperatura de saturación del líquido refrigerante correspondiente a la presión de saturación.

**Transferencia de Calor:** Proceso físico por el cual el calor se mueve de una zona de mayor temperatura a una de menor temperatura, nivelando todo el calor.

**Válvula de expansión:** Elemento de refrigeración que se encarga de disminuir la alta presión de un refrigerante en tránsito, a través de un orificio que, por efecto físico, genera una presión de baja de acuerdo al funcionamiento del sistema cerrado de refrigeración. Cuenta con un ajuste mecánico que regula sensiblemente el paso de refrigerante y permite mantener un estado constante en presiones de trabajo.

**Unidad condensadora:** Conjunto de elementos mecánicos contenidos en una base o mueble, donde se alojan el compresor, botella de líquido, acumulador de succión, filtros, condensador, entre otros.

## Introducción

En la rama de la ingeniería mecánica, enfocada en el diseño mecánico de redes de tubería para diferentes sistemas mecánicos, existen constantes desafíos que los ingenieros tienen que validar para poder optimizar los recursos disponibles en los diferentes escenarios de la industria.

El valor técnico del diseñador va más allá de la selección de variables. También debe tomar decisiones en torno a los aspectos relevantes en montaje, abastecimiento, funcionamiento y mantenimiento de las líneas a instalar, y contar con la confianza y la certeza de las decisiones tomadas, para evitar problemas operativos a futuro, encarecer los montajes y garantizar la fácil expansión y modificación de las líneas, de ser requerido, con ramales adicionales que puedan surgir para una misma derivación.

Este documento solo se basará en aspectos de selección relacionados a diámetros de tubería, sin tener en cuenta aspectos de montaje como la viabilidad de usar accesorios, alturas piezométricas, criterios de flujo volumétrico, entre otros criterios.

Basado en años de experiencia como diseñador de redes de tubería, se ha optado por llenar de argumentos técnicos y confiables para tomar decisiones con respecto a la selección de los diámetros de tubería, y dar una herramienta de cálculo que le permita validar rápidamente la viabilidad de su decisión.

## 1. Planteamiento del Problema

En el diseño de redes de tubería para sistemas HVAC&R, se involucran muchas variables que inducen incertidumbre en las decisiones técnicas y económicas para los sistemas en proyectos HVAC&R. Por este motivo, es necesario identificar, priorizar y dimensionar, los impactos que se generan al momento de seleccionar diámetros de tubería.

En la actualidad, los diseñadores y proyectistas se enfrentan a complejas configuraciones de redes de tubería, que no permiten realizar un análisis crítico y esencial para determinar los puntos críticos de la red, donde se generan diferentes problemas asociados a magnitudes físicas no deseadas, como velocidad promedio, diferencial de temperatura y pérdida de presión debido a la fricción.

Existen programas de diseño asistido por computador y herramientas de cálculo que facilitan la detección y visualización de las variables, pero en algunas aplicaciones, se tornan complejas las configuraciones, dejando a criterio del diseñador muchas variables de entrada, sin ninguna orientación o consideraciones técnicas implícitas en su manejo. Además, la mayoría de estas herramientas cuentan con licencias con suscripciones y pagos, para acceder a muchas de sus ventajas y su uso de manera estándar, y no todas las aplicaciones tienen la solvencia económica para adquirirlas.

Todas estas situaciones inducen a malas selecciones de diámetros y secciones que presentan problemas técnicos como ruidos no deseados, retornos de líquido por líneas de succión de refrigerante, caídas de presión y diferenciales de temperatura, que se ven reflejados en consumos energéticos elevados, ineficiencias de los equipos, sobrecostos en los materiales, entre otros.

Por este motivo se requiere consolidar, analizar y verificar los criterios mínimos que están establecidos por el gremio ingenieril, y de manera conjunta, brindar al diseñador una ayuda práctica para tomar decisiones, en particular, en aplicaciones de bajo presupuesto y aquellas situaciones que demanden una toma de decisiones no automatizada.

De manera directa, se requiere un planteamiento priorizado y detallado de los criterios de selección definidos y precisados por la academia, con un orden de impacto detallado, para la toma de decisiones asertivas.

## **1.1 Formulación del Problema**

Por todo esto, se plantea la siguiente pregunta de investigación, que pretende ser resuelta con este proyecto:

¿Es posible priorizar las variables más significativas para la selección de diámetros de tubería en sistemas HVAC&R?

### **1.1.1 Sistematización del Problema**

Algunas preguntas complementarias son:

¿Es posible implementar una herramienta de cálculo rápido que permita implementar los criterios de selección, y determinar las fuentes científicas de la mayoría de los programas existentes, basados en ecuaciones empíricas de la academia?

¿Qué variables son de alto impacto, y cuales pueden considerarse de valor despreciable o constantes, al momento de diseñar una red de tubería para sistemas HVAC&R?

¿Existe alguna herramienta confiable de licencia gratuita, que permita a los diseñadores validar los cálculos y selección de diámetros de tubería en la nomenclatura comercial vigente en el mercado?

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Unificar y clasificar los criterios mínimos de diseño, selección y fabricación de redes de tubería en los sistemas HVAC&R.

### **2.2 Objetivos Específicos**

Establecer el estado del arte en la aplicación de normas, recomendaciones, criterios y consideraciones técnicas mínimas para el diseño, selección y cálculo de tuberías en sistemas HVAC&R para los fluidos el fluido de trabajo (refrigerante) R507A.

Evaluar las herramientas disponibles en el mercado para el diseño, selección y cálculo de tuberías en HVAC&R para el fluido de trabajo (refrigerante) R507A.

Diseñar una herramienta de aplicación de los criterios en el diseño, selección y fabricación de tuberías en HVAC&R para el fluido de trabajo (refrigerante) R507A.

### **3. Justificación**

#### **3.1 Justificación Teórica**

Con la investigación e indagación de las fuentes bibliográficas de las herramientas de cálculo existentes, se logra especificar las mínimas competencias requeridas en el campo de la ingeniería, basadas en modelos matemáticos, para determinar unos buenos criterios en la selección de diámetros de tubería en sistemas HVAC&R.

#### **3.2 Justificación Social - Práctica**

Se busca que los diseñadores de sistemas HVAC&R, y la comunidad en general, tengan los criterios, aspectos teóricos, estándares y herramientas necesarias, de manera condensada, al momento de diseñar y seleccionar materiales en redes de tubería para el fluido (refrigerante) R507A, para tomar decisiones en la elaboración de diseños y selección de tuberías en instalaciones.

## 4. Marco Referencial

### 4.1 Marco Teórico

Dentro del estudio de fenómenos de transporte enfocados a los sistemas HVAC&R, existen fundamentos relacionados a la mecánica de fluidos y la termodinámica de las redes de tubería. También se precisarán aspectos relevantes en torno a la capacidad frigorífica, potencia eléctrica, consumo de energía y eficiencia energética.

#### 4.1.1 Principios de Funcionamiento de los Sistemas de refrigeración

El ciclo de refrigeración, parte de una transferencia de energía entre el medio internos enfriar, y el medio exterior a depositar este calor. Como los sistemas de refrigeración son sistemas cerrados, no existe transferencia de masa para las líneas de refrigerante de trabajo. Bajo esta premisa, los sistemas de refrigeración tienen cuatro (4) elementos básicos para su correcto funcionamiento, los cuales funcionan para desempeñar las siguientes etapas:

- **Compresión:** Es la etapa en la cual el refrigerante se encuentra en estado gaseoso y es comprimido por el compresor, lo que genera un incremento en su presión y temperatura. Funciona como elemento de trabajo para la impulsión continua del refrigerante por la red de tuberías previstas para la conexión de todos los elementos.
- **Condensación:** Etapa en la cual, el condensador recibe refrigerante en estado gaseoso y alta presión, y este a su vez, mediante convección forzada, a través de ventiladores de motor eléctrico, disipa el calor de las tuberías de refrigeración, hasta condensar todo el refrigerante gaseoso. Este proceso

- libera calor al ambiente exterior, el cual sirve como medio externo disipador, por la diferencia de temperatura entre el refrigerante y el ambiente.
- **Expansión:** Etapa en la que la válvula de expansión, recibe refrigerante en estado líquido y alta presión, para ser transportado a través de un orificio que disminuye la presión del refrigerante. Debido a esta disminución súbita de la presión, el refrigerante pierde temperatura.
  - **Evaporación:** Etapa en la que el evaporador, recibe refrigerante en estado líquido y baja presión, para ser transportado por tuberías y aletas que están en contacto con el medio a enfriar. Debido a la diferencia de temperatura entre el refrigerante y el medio a enfriar, se produce una transferencia de calor, que enfría el aire interior del medio a enfriar, debido a la evaporación que ocurre por el lado del refrigerante. El refrigerante en estado gaseoso es transportado nuevamente al compresor para reiniciar el ciclo.

Las etapas del ciclo de refrigeración, se representan normalmente en un diagrama de Mollier, el cuál mediante una gráfica de presión y entalpía para diferentes tipos de refrigerantes, permite revisar los conceptos mencionados de las cuatro (4) etapas.

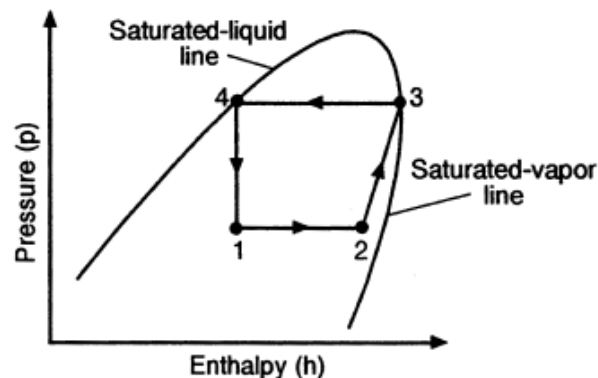


Figura 1. Diagrama de mollier, basado en manual Handbook refrigeración 271 de 2024.

#### **4.1.1.1 Subcooling**

Se denomina subcooling al pequeño enfriamiento que se da al refrigerante una vez sale del proceso de condensación. En este último, se busca que el fluido salga con una condición de líquido saturado, sin embargo, al llevarlo a la zona de líquido comprimido, comienza a ceder calor sensible nuevamente y por consecuencia a descender su temperatura.

Este proceso tiene dos objetivos fundamentales: La correcta alimentación de la válvula de expansión con solo líquido y el aumento de la capacidad frigorífica de la máquina. Lo último debido a que se disminuye en mayor proporción la entalpía del líquido y se puede generar un mayor salto entálpico en el evaporador lo que se traduce como un aumento del efecto refrigerante.

#### **4.1.1.2 Superheat**

Contrario al proceso anterior, el superheat o sobrecalentamiento se define como el aumento de temperatura del refrigerante en el último tramo del serpentín del evaporador e incluso en el trayecto hacia el compresor. Este proceso se busca para aumentar el efecto refrigerante, sin embargo, su principal función se basa en garantizar que la salida de la unidad evaporadora cuente con un fluido en estado de vapor sobrecalentado, ya que así el compresor recibirá este gas y no tendrá problemas de golpe de líquido que generen daños incluso irreversibles.

#### 4.1.2 Coeficiente de Rendimiento (COP).

De acuerdo con Singha et al. (2024), los sistemas de refrigeración son cambiantes, cada vez se implementan nuevas innovaciones para desarrollar sistemas con mayor eficiencia energética, y para ello, se evalúa el COP como “la relación entre la cantidad de calor extraído y la energía consumida durante el proceso” (pág. 1029). Entre más alto sea el valor de este coeficiente, el sistema se considera más eficiente, en comparación con otros sistemas similares.

Este coeficiente de rendimiento, no solo se limita a los parámetros de funcionamiento del equipo, sino que dependen también de tres aspectos fundamentales y que se consideran pilares de la eficiencia energética:

1. Operación
2. Mantenimiento
3. Planificación de la producción
4. Cambios tecnológicos

Analizando brevemente cada uno de ellos se puede llegar a diferentes escenarios. Uno de ellos puede ser una mala **operación** donde se incrementen infiltraciones de calor, se bloquee la ventilación, se introduzca mas carga térmica, entre otras que afectarán directamente el COP de la máquina.

Desde el punto de vista de **mantenimiento**, tener las superficies de intercambio de calor con incrustaciones hace que se genere un 'aislamiento' que es justamente lo opuesto a lo deseado en estos elementos puesto que pueden incrementarse las presiones generando fallas en la tubería que se traduzcan en fugas y por ende pérdidas de capacidad y eficiencia.

Por su parte, la **planificación de la producción** permite cumplir con las condiciones de carga establecidas en los diversos diseños que se plantean, conservando la eficiencia buscada o incluso, mejorándola.

Por último, los **cambios tecnológicos** llevarán a un aumento del coeficiente de desempeño desde el uso de equipos nuevos con mejor eficiencia.

#### **4.1.3 Características de los tipos de Refrigerantes**

Los refrigerantes más comunes que se utilizan en sistemas de refrigeración son del tipo hidrocarburos (HFC), como alternativa ecológica a los fluorocarbonos (CFC/HCFC) que se usaban anteriormente en la industria de la refrigeración sin ningún tipo de control. Como estos refrigerantes son sustancias que tienen un impacto directo a la capa de ozono, y al efecto de calentamiento global por las altas emisiones de dióxido de carbono, están mencionados dentro del protocolo de Montreal, acuerdo multilateral medioambiental de mayor éxito a nivel internacional, donde se especifican los acuerdos y vigencias de las sustancias refrigerantes de acuerdo a las naciones con mayores emisiones de dióxido de carbono. La última enmienda del protocolo es la de

Kigali (Ruanda) donde se establece la eliminación de los HFC en más de un 80% en los próximos 30 años.

La enmienda de Kigali, fue ratificada por el gobierno colombiano por la ley 369 de 2019, donde el país se adhiere a la sustitución de los refrigerantes HFC con el objetivo de fijar el consumo de refrigerantes altamente ecológicos, con cero ODP y bajo GWP.

De acuerdo a lo anterior, y teniendo en cuenta los aspectos comerciales en Colombia, el refrigerante de trabajo a usar es el R507A, consolidado en el mercado como el refrigerante de trabajo para aplicaciones de refrigeración de media y baja temperatura. La composición de este refrigerante es de una mezcla azeotrópica de los refrigerantes R-125 (50%), R-143a (50%). De la familia de los HFC, es un refrigerante sin aporte a la capa de ozono (0 ODP) y 3985 GWP (3985 toneladas de CO<sub>2</sub> por cada tonelada de refrigerante).

#### **4.1.4 Tuberías para sistemas de refrigeración**

Para los sistemas de refrigeración tradicionales, las tuberías más utilizadas son las de cobre, con diámetros nominales y comerciales en sistema inglés (SI). Al igual que sus accesorios, las tuberías de cobre son beneficiosas para la transferencia de calor, y vienen del tipo rígidas para diámetros superiores a 5/8", y flexibles desde 5/8" hasta 1/4". En cuanto a los accesorios más comunes, se incluyen codos, tees, uniones, copas reductoras, tapones, entre otros. Dependiendo del tipo de aplicación, y a las condiciones de trabajo a la que va a ser sometida, la tubería puede venir tipo L y tipo K (espesor de pared), fabricadas bajo estándares internacionales como ASTM y ASME. Como criterio de diseño y seguridad, la tubería L se puede usar para todas las líneas,

excepto para la línea de descarga del compresor hacia el condensador, donde se presentan altas presiones y altas temperaturas.

Con base en lo anterior, resulta ser de suma importancia dicho dimensionamiento de tubería debido a diferentes factores que afectan directamente el funcionamiento de los sistemas. Uno de ellos, es el régimen de flujo en el que se encuentra el fluido refrigerante al pasar por cada una de las etapas del ciclo.

Dicho régimen se establece con parámetros específicos tales como la velocidad del fluido, diámetro y longitud de la tubería y, por último, con la viscosidad dinámica del refrigerante. Según Mott (2015), este régimen está dado por el número de Reynolds para el cual se tiene que valores inferiores a 2.000 indican un flujo laminar y valores superiores a 4.000 ubican el fluido en un régimen turbulento. Para los casos donde el número de Reynolds se ubica entre 2.000 y 4.000 se considera como una zona de transición de flujo la cual no es de alcance de este trabajo.

Este régimen reviste suma importancia puesto que el comportamiento del fluido bajo estas condiciones, definirán las pérdidas de energía que tendrá el refrigerante a lo largo de determinado trayecto de tubería generando afectaciones en el funcionamiento y por ende en la eficiencia de la máquina.

$$h_L = f x \frac{L}{D} x \frac{v^2}{2g}$$

La ecuación de Darcy especificada anteriormente, se aplica para casos donde el flujo es completamente desarrollado de acuerdo al perfil de velocidades y se encuentra dentro del régimen turbulento. Dicha ecuación, permite cuantificar las pérdidas de energía del fluido, por lo que en un caso particular, dichas condiciones pueden llegar a generar fenómenos como el flash gas que consiste en la formación de burbujas de vapor a lo largo de la tubería que conduce el refrigerante condensado. Esta formación de burbujas genera diferentes condiciones críticas como la mala alimentación del dispositivo de expansión y la pérdida de capacidad del equipo.

Como bien se analiza, un mal dimensionamiento de la tubería puede generar cambios en el estado del fluido afectando la eficiencia del sistema en general e incluso generar daños que pongan en parada la máquina y afecten el proceso productivo de la planta.

#### **4.2 Marco Conceptual**

En los sistemas de refrigeración y climatización se involucran procesos de transferencia de masa y energía, mientras los fluidos refrigerantes son transportados por ciclos cerrados y abiertos, cambiando sus propiedades físicas de manera constante. Mientras esto ocurre, existen configuraciones geométricas de las redes de tubería que inducen a generar ineficiencias energéticas, provocando puntos de operación no deseados en ventiladores, compresores, bombas y otras máquinas involucradas en los sistemas mecánicos.

Con el pasar del tiempo, los físicos, ingenieros e investigadores, han precisado criterios para determinar los límites recomendados en variables como caída de presión, sobrecalentamiento, velocidades mínimas, y rangos de ruido, en las redes de tubería. Estos criterios definen una optimización de los materiales presentes en la fabricación y selección de estos componentes, para que la instalación de redes de tubería se haga rentable y las configuraciones no tengan complicaciones técnicas a futuro, como baja seguridad de las redes, estancamiento de aceite, velocidades altas no deseadas, retorno de líquido en líneas de succión de refrigerante en estado gaseoso, entre otras.

Es necesario orientar la investigación a lo que la industria, va desarrollando nuevas tecnologías y métodos de conexión, donde se involucran fenómenos físicos presentes entorno a las ciencias de transferencia de calor, termodinámica, mecánica de fluidos y resistencia de materiales.

#### **4.2 Marco Legal**

El proyecto se lleva a cabo en Colombia, donde la regulación se da por el Reglamento Técnico de Instalaciones Térmicas (RETSIT), el cual establece los parámetros que deben cumplir los sistemas de climatización en cuanto a su eficiencia y seguridad.

A nivel internacional, como normativa clave se destaca la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) la cual recopila aquellas normativas que promueven el uso de tecnologías más eficientes y el diseño de

sistemas que minimicen el consumo energético, como una estrategia encaminada al desarrollo sostenible.

La información teórica recopilada general está basada en el manual Handbook refrigeración 271 de 2024.

## 5. Metodología

De acuerdo a la experiencia adquirida en talleres, simposios, seminarios, sumado a la experiencia en campo como diseñador, calculista y ejecutor de proyectos del sector HVAC&R, se acorta el camino investigativo con respecto a las fuentes de información disponibles, para determinar los modelos y ecuaciones matemáticas aplicables, que explican el concepto de la mecánica de fluidos para poder determinar los diámetros de tubería para las redes de tubería de sistemas de refrigeración. El enfoque de revisión documental se basa en poder ampliar el argumento del uso de las ecuaciones descritas más adelante, y de la precisión en los criterios para selección de diámetros de tubería, por parte de la academia.

Adicionalmente se plantea hacer una revisión de una herramienta existente, de un fabricante de equipos mecánicos y accesorios reconocido a nivel mundial "Danfoss" para determinar poder revisar la viabilidad de una herramienta nueva, que permita simplificar algunos cálculos, y permita realizar una revisión en el estado del arte, de los modelos y ecuaciones matemáticas aplicables.

Finalmente, basados en el conocimiento de herramientas ofimáticas como el "Microsoft excel", se plantea el diseño, construcción e implementación de una herramienta de cálculo que permita validar cálculos rápidos de la selección de diámetros de tubería para diferentes configuraciones de redes de tubería, involucrando todas las ecuaciones investigadas.

## 6. Resultados

### 6.1 Objetivo Específico 1

Los diseñadores de redes de tubería, deben garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas, y tener en cuenta que tomar una decisión en un diámetro mayor o menor al calculado o seleccionado, puede comprometer el correcto flujo de refrigerante por las líneas. Según el Handbook 271 de la ASHRAE, el diseño de tuberías para sistemas de refrigeración, debe garantizar el suficiente suministro de refrigerante en el evaporador, seleccionar tuberías con las máximas caídas de presión recomendadas, prevenir trampas de aceite en los ramales de tubería, retorno de líquido durante la operación del compresor, evitar presencia de humedad en el sistema y mantener limpia la tubería, garantizando el flujo constante.

Adicionalmente, se debe tener en cuenta que las altas variaciones de la temperatura por las caídas de presión de las líneas, representan directamente en ineficiencias para el sistema.

$\Delta t$ [K]	% CAP	% Aumento consumo
0	100	100
1	96,8	104,3
2	93,6	107,3

Tabla 1. Efecto del incremento del aumento en la temperatura de la línea de succión para el refrigerante R22, a SST 5°C y SCT 40°C, basada en la tabla 2 del capítulo 1.3 del

Handbook 271 de la ASHRAE.

En relación al estado del arte en la aplicación de normas, recomendaciones, criterios y consideraciones técnicas mínimas para el diseño, selección y cálculo de tuberías en sistemas HVAC&R para los fluidos el fluido de trabajo (refrigerante) R507A, se lograron determinar los siguientes apartados a investigar:

### 6.1.1. Lista de variables implícitas en la selección de diámetros de tubería:

A continuación, se resume la lista de las principales variables implícitas en el cálculo, diseño y selección de tuberías para sistemas HVAC&R:

Sigla	Descripción	Concepto	Unidad SI - Inglés	Tipo
<b>SCP (en inglés)</b>	Saturated Condensing Pressure	Presión a la cual un refrigerante se condensa completamente	Bar - psi	Sistema
<b>SSP (en inglés)</b>	Saturated Suction Pressure	Presión a la cual un refrigerante se evapora completamente	Bar - psi	Sistema
<b>SCT (en inglés)</b>	Saturated Condensing Pressure	Temperatura a la cual un refrigerante se condensa completamente	°C - °F	Sistema
<b>SST (en inglés)</b>	Saturated Suction Temperature	Temperatura a la cual un refrigerante se evapora completamente	°C - °F	Sistema
<b>CAP</b>	Capacidad frigorífica	Potencia disipada, absorbida o transportada	kW - Btu/h	Sistema
<b><math>\phi</math></b>	Diámetro nominal de tubería	Diámetro de trabajo seleccionado para la línea específica	mm - in	A calcular
<b>V_liq</b>	Velocidad de líquido	Velocidad promedio del líquido dentro de la tubería	m/s - in/s	Implícita
<b>L_e</b>	Longitud equivalente	Longitud de la tubería teniendo en	m - ft	Implícita

		cuenta los accesorios utilizados		
$\Delta p$	Caida de presión por unidad de longitud equivalente	Caida de presión por unidad de longitud equivalente del ramal de tubería	Pa/m - psi/ft	Implícita
$\Delta t$	Aumento de temperatura de saturación	Aumento de temperatura de saturación por unidad de longitud equivalente del ramal de tubería	K/m - R/ft	Implícita

Tabla 2. Variables implícitas en la selección de diámetros de tubería.

Los diseñadores de redes de tubería pueden identificar estas variables fácilmente. Para efectos prácticos del funcionamiento, las que son del tipo "sistema", son las variables a las que el diseñador tiene conocimiento, debido a que corresponden ese punto de operación. Las variables "implícitas" corresponden a aquellas que mediante los métodos matemáticos y criterios de selección, son parte del estándar, independientes de los puntos y variables de operación de los sistemas.

### **6.1.2. Criterios mínimos para el cálculo y selección de tubería:**

El diseñador tiene que tener en cuenta dos (2) grupos de criterios, en orden de prioridad, para seleccionar el diámetro de tubería adecuado para la aplicación:

#### **6.1.2.1. Criterios de funcionamiento:**

Función de la línea de tubería: De acuerdo al Handbook 271 de la ASHRAE y basados en la tabla 7 (Apéndice A), se debe tener en cuenta si es una línea de succión,

líquido o descarga. La variación de temperatura por unidad de longitud para la succión es de 0.04 K/m, para la descarga es de 0.02 K/m y para el líquido es de 0.02 K/m.

Caida de presión máxima: La caída de presión no debería exceder una variación de temperatura de 1K.

Velocidad mínima: Los rangos para las líneas de succión deben estar entre 4.5 a 20 m/s, y 10 a 18 m/s para la descarga:

#### **6.1.2.2. Criterios de abastecimiento:**

A menudo el diseñador se enfrenta a situaciones que limitan las condiciones ideales para seleccionar e instalar diámetros de tubería. Disponibilidad de inventarios, diámetros comerciales disponibles en el mercado, adaptaciones de tuberías a los diámetros nominales de algunos equipos, aspectos geométricos en aislamientos y soportes mecánicos en obra, entre otros. Aunque el diseñador debe tener en cuenta de manera estricta los cálculos de los diámetros de tubería, como garantía de una correcta selección e instalación, un buen diseñador sabe que no todas las veces se puede realizar lo que los cálculos demandan. Lo importante siempre es asumir los riesgos de acuerdo al tipo de aplicación, tipo de sistema a instalar, que capacidad tiene el sistema, teniendo en cuenta que, los sistemas más pequeños, son los que requieren más precisión de los cálculos debido a que, las variaciones mínimas en flujos máscicos, repercuten en grandes impactos en potencia y efectos físicos en las tuberías.

### 6.1.3. Metodología y paso a paso para validación de diámetros de tubería:

De acuerdo al método establecido por el Handbook 271 de la ASHRAE para determinar el diámetro de tubería adecuado, se identificaron los siguientes aspectos iniciales:

1. Determinar que tipo de tubería es la que se requiere diseñar (succión, líquido o descarga).
2. Identificar si el análisis corresponde a un tramo de tubería o a la conexión de tubería total. Este paso es importante para determinar si se siguen algunas reglas en el montaje de la tubería.
3. Conocer los datos mínimos del sistema: Capacidad, temperatura de evaporación, temperatura de condensación, longitud de la tubería, cantidad de accesorios, tipo de accesorios.

Luego de precisar los apartados anteriores, se dispone de la tabla 7 (Apéndice A) para poder determinar el diferencial de temperatura, con todas las variables obtenidas, y ser despejadas de la siguiente ecuación:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{tabla}} * Le \left( \frac{CAP_{\text{sist}}}{CAP_{\text{tabla}}} \right)^{\frac{1}{8}} \quad (1)$$

Se debe escoger un diámetro para validar si se cumple con el criterio. Si el diferencial de pérdida de temperatura es inferior a 1K, la tubería es la adecuada.

**Ejemplo 1:** Seleccionar diámetro de tubería para la línea de succión de una instalación que tiene el evaporador a 25 metros de distancia de la unidad condensadora. La longitud equivalente de la línea es de 30 metros. La capacidad del sistema es de 25 kW,

funciona en una temperatura de evaporación de  $-5^{\circ}\text{C}$ , y una temperatura de condensación de  $40^{\circ}\text{C}$ . El refrigerante de trabajo es el R507A.

**Solución:** Una vez identificado el tipo de línea de la tubería, se procede a utilizar la ecuación 1 con las variables obtenidas de la tabla (Apéndice A).

Para las temperaturas de evaporación y condensación, se escoge una tubería de 35 mm (1 3/8") para evaluar la ecuación:

$$\Delta t = \Delta t_{\text{tabla}} * Le \left( \frac{CAP_{\text{sist}}}{CAP_{\text{tabla}}} \right)^{1.8} \quad (1)$$

$$\Delta t = 0.04 * 30 \left( \frac{25}{25,28} \right)^{1.8} = 1.17 \text{ K}$$

De esta forma vemos que la tubería sobrepasa el criterio permitido de 1K. Por lo tanto procedemos a evaluar la siguiente referencia comercial 42 mm (1 5/8").

$$\Delta t = 0.04 * 30 \left( \frac{25}{41,86} \right)^{1.8} = 0.47 \text{ K}$$

El valor queda por debajo del criterio permitido, por lo tanto, la tubería seleccionada es la de 42 mm (1 5/8").

## 6.2 Objetivo Específico 2

Como diseñador y teniendo la experiencia de usuario con diferentes aplicaciones, se ha escogido como objeto de análisis, dos (2) herramientas de libre descarga, de un fabricante de equipos llamado Danfoss<sup>1</sup> y otra de una empresa

---

<sup>1</sup><https://www.danfoss.com/en/service-and-support/downloads/dcs/coolselector-2/#tab-overview>

llamada Tecnisolve<sup>2</sup>, que desarrolla varias aplicaciones de software libre del sector de la refrigeración, llamada Lisesize.

Mediante la herramienta Coolselector2 de Danfoss, es posible tomar como referencia el uso de las variables de entrada, anteriormente mencionadas, y ver de que forma se presentan los resultados obtenidos, del procesamiento de las condiciones de operación.

En la sección de cálculo de tubería (ver figura 2), el software presenta una amplia selección de refrigerantes. El primer paso, tal como se ha detallado en apartados anteriores, es determinar que tipo de tubería es la que se va a calcular.

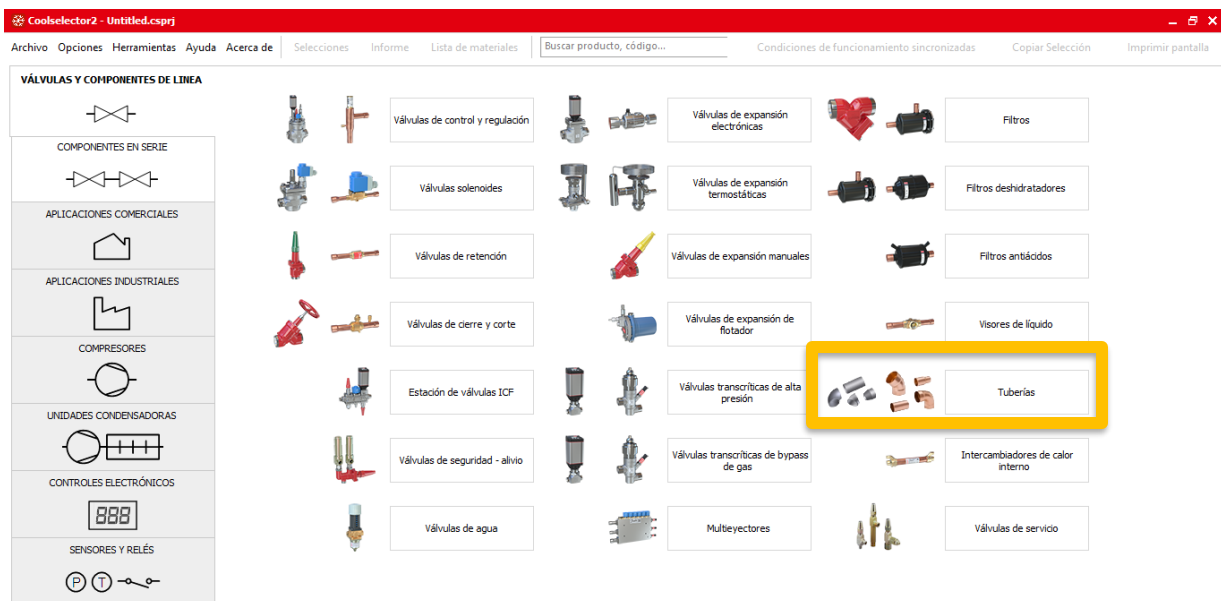


Figura 2. Interfaz general del software Coolselector2

El segundo paso es ingresar las variables del sistema. El software incorpora otras variables no mencionadas anteriormente, como recalentamiento y subenfriamiento.

<sup>2</sup> <https://www.technisolve.co.za/downloads.php>

Estas variables permiten corresponden al desfase energético y la eficiencia que puede tener un sistema, de acuerdo al efecto refrigerante, presente en la etapa de evaporación, y el subenfriamiento que puede ocurrir en el condensador y en el recorrido del refrigerante por las tuberías del sistema. Estas variables introducen dispersión del punto de operación, lo que ocurre como objeto de análisis para el siguiente objetivo.

**Condiciones de funcionamiento**

Capacidad: Capacidad de refrigeración: 34120 BTU/h, Caudal másico en la línea: 292,6 kg/h, Capacidad de calefacción: 12,71 kW

Evaporación: Temperatura: -10,0 °C, Recalentamiento útil: 8,0 K, Recalentamiento adicional: 0 K

Condensación: Temperatura: 30,0 °C, Subenfriamiento: 2,0 K, Subenfriamiento adicional: 0 K

Adicional:  Temperatura de descarga: 49,4 °C

**Criterios de selección:**

Caída de presión: Predeterm bar,  Caída de temperatura de saturación: 0,020 K/m

Velocidad: 1,00 m/s

**Criterios de selección adicionales:**

Longitud: 10,00 m, Ángulo: 0 °

Fig 3. Sección de los datos de entrada en software Coolselector2

Finalmente, el software recomienda un diámetro de 1 3/8", con un  $\Delta t$  de 1,2K (ver figura 4). Como está por encima del criterio de 1K (un 20% por encima), se recomienda el siguiente diámetro.

Línea de aspiración (Sistema de expansión seca. R507A. Tuberías).

**Selección: Tubería de cobre ANSI 1 5/8**

Seleccionado	Tipo	NS	DP [Pa]	DP [K/m]	DT_sat [K]	Velocidad, entrada [ft/s]	Velocidad, salida [ft/s]	Resultado
<input type="radio"/>	ANSI 7/8	22,23	320100	0,831	24,9	95,67	251,4	✓
<input type="radio"/>	ANSI 1 1/8	28,58	62780	0,125	3,7	56,16	64,34	✓
<input checked="" type="radio"/>	ANSI 1 3/8	34,93	21230	0,041	1,2	36,89	38,56	✓
<input checked="" type="radio"/>	ANSI 1 5/8	41,28	8893	0,017	0,5	26,04	26,52	✓
<input type="radio"/>	ANSI 2 1/8	53,98	2281	0,004	0,1	14,98	15,05	✓

Fig 4. Selección de tubería de acuerdo al software Coolselector2

Al validar los datos obtenidos, podemos evidenciar que el software también se rige por las ecuaciones descritas en el Handbook 271 de la ASHRAE.

Por otra parte, la herramienta Linesize de Tecnisolve presenta una interfaz más sencilla, con una sección de datos de entrada en la parte izquierda y una sección de datos de salida en la parte derecha (ver figura 5).

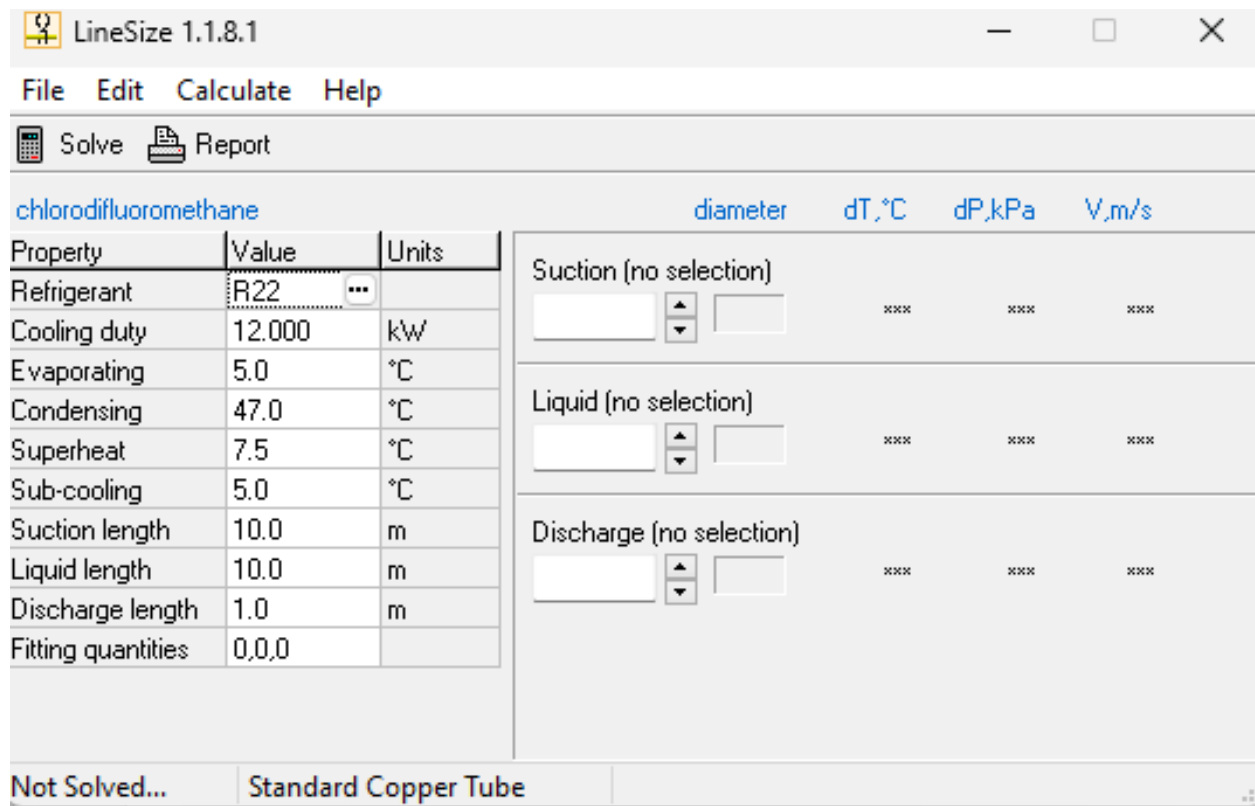


Figura 5. Interfaz general de acuerdo al software Linesize.

Para los mismos datos de entrada, se obtienen los mismos resultados, sugiriendo el mismo diámetro de tubería y teniendo en cuenta el criterio de diferencial de temperatura máximo de 1K (ver figura 6). A diferencia del Coolselector2, el Linesize permite seleccionar los tres tipos de líneas de manera simultánea.

The screenshot shows the LineSize 1.1.8.1 software interface. On the left, a table lists properties for R507A refrigerant. On the right, a summary table shows pipe selection results for Suction, Liquid, and Discharge lines. The Suction line is highlighted with a yellow box.

Property	Value	Units
Refrigerant	R507A	
Cooling duty	25.000	kW
Evaporating	-5.0	°C
Condensing	40.0	°C
Superheat	0.0	°C
Sub-cooling	0.0	°C
Suction length	30.0	m
Liquid length	30.0	m
Discharge length	1.0	m
Fitting quantities	0,0,0	

	diameter	dT, °C	dP, kPa	V, m/s	
Suction (auto)	1-5/8	42	0.5	8.5	7.9
Liquid (auto)	3/4	18	0.4	17.0	1.1
Discharge (auto)	1/2	12	1.0	41.3	27.1

Auto Solved... **Standard Copper Tube** mr=36.1 kg/kWh Td=53.3°C

Figura 6. Selección de tubería de acuerdo al software Linesize.

De acuerdo a la experiencia de usuario, y como diseñador de sistemas y redes de tubería de refrigeración, validar rápidamente y realizar cálculos integrales para sistemas con redes de tuberías en diferentes ramales tipo “espina de pescado”, se hace complejo bajo esta metodología. Se requiere una herramienta que integre el concepto y criterio de selección, para que, de manera paralela, mediante una interfaz gráfica, se puedan tomar decisiones frente a los diámetros seleccionados del sistema completo. Bajo esta premisa, se abre el panorama para trabajar sobre el siguiente objetivo.

Las dos herramientas previamente analizadas logran el objetivo específico, de poder configurar y obtener resultados precisos, pero carecen de una facilidad en la

configuración de redes de tubería aplicada a configuraciones de varios equipos simultáneamente. El entorno gráfico es muy limitado, y la obtención de datos en la selección de diámetros se presenta a manera de informe y no de dato que se pueda procesar en una hoja de cálculo.

### **6.3 Objetivo Específico 3**

Basados en los datos obtenidos en los objetivos anteriores, se plantea una herramienta desarrollada en una hoja de cálculo, que permita integrar una interfaz gráfica, cálculos y selecciones en tiempo real. Como el cálculo de los diámetros de tubería es un proceso iterativo (evaluando ecuaciones para encontrar el más valor más aproximado), se va a implementar la configuración de cálculo iterativo del Excel para poder realizar las aproximaciones correspondientes.

La herramienta debe tener las siguientes secciones dentro de su interfaz de usuario:

1. Sección de datos de entrada del sistema.
2. Sección de criterios de selección.
3. Sección gráfica e interfaz de usuario para sistemas tipo espina de pescado.
4. Sección de resultados.
5. Sección de variables físicas del sistema.
6. Sección de cálculo e iteración.

Teniendo en cuenta la experiencia de usuario en configuración de redes de tubería de refrigeración, se establece una interfaz que permita configurar un circuito de

refrigeración, con los diferentes ramales de conexión de evaporadores y que permita modificar manualmente la mejor opción posible.

### 6.3.1. Sección de datos de entrada del sistema.

Los primeros datos corresponden a los valores de funcionamiento del sistema, en cuanto a las temperaturas, diferenciales y presiones. Se incorporan también las variables de dispersión del funcionamiento del sistema (sobrecalentamiento y subenfriamiento). Los otros datos corresponden a los datos de capacidad por cada ramal configurado, la cantidad de evaporadores por cada ramal y la distancia configurada para cada ramal. Los valores consignados en rojo, son las variables que están en configuración y que son funciones de los datos suministrados. Esta regla se repite para todas las secciones de la herramienta.

**1. Datos de entrada del sistema**

T EVAP	-5 °C	Sobrecalentamiento	6 K
T COND	40 °C	Subenfriamiento	2 K

	Ramal 1	Ramal 2	Ramal 3	Ramal 4
CAP	20.000 Btu/h	20.000 Btu/h	20.000 Btu/h	20.000 Btu/h
Evap	Evap ramal 1	Evap ramal 2	Evap ramal 3	Evap ramal 4
Cant	4	4	4	4
M x ramal	30	28	29	24
M x circ	111			

Figura 7. Sección de datos de entrada del sistema de la herramienta de cálculo.

De acuerdo a la experiencia que se tiene en diseño de redes de tubería, se fija el límite de configuración de circuitos, con cuatro (4) ramales por circuito y cuatro (4)

evaporadores por ramal, lo que da un total de dieciséis (16) evaporadores por circuito como máxima cantidad. Dependiendo de la capacidad del sistema y de las temperaturas de trabajo, la recomendación del máximo de ramales de tubería puede tender a disminuir, debido a que la tubería resultante en el cálculo podría ser muy grande, lo cuál puede causar problemas en instalación.

### 6.3.2. Sección de criterios de selección.

Se conoce que este criterio debería corresponder al consignado en el Handbook 271 de la ASHRAE. Sin embargo se agrega como variable, para tener cierta flexibilidad en el criterio. La casilla deberá estar entre los valores de 1K a 1,2K. La herramienta solo permite ingresar esos rangos. También se genera criterios por separado, en la práctica, las líneas de succión son más flexible en este criterio que las líneas de líquido.

## 2. Criterios de selección

$\Delta t_{\text{succión}}$	1,2 K
$\Delta t_{\text{líquido}}$	1,0 K

Figura 8. Sección de criterios de selección de la herramienta de cálculo.

Basados en estos criterios, la herramienta va a iterar y seleccionar los diámetros de tubería que se ajusten por debajo de la evaluación de la ecuación 1.

### 6.3.3. Sección de la interfaz gráfica para sistemas tipo espina de pescado.

Definiendo la metodología gráfica que nos permita visualizar y determinar los diámetros de tubería resultantes de las iteraciones para la cantidad máxima de dieciséis



**4. Resultado de selecciones**

	M1 S	M1 L	Codo	Dis	M2 S	M2 L	Codo	Dis	M3 S	M3 L	Codo	Dis	M4 S	M4 L	Codo	Dis
entre nodos	1 1/8	1/2	15	6	7/8	3/8	4	3	N/A	N/A	0	3	N/A	N/A	0	3
ppal - 1er evap	7/8	3/8	3	3	N/A	N/A	3	3	N/A	N/A	0	3				-
1er evap	3/8	3/8	6	3	N/A	N/A	6	2	N/A	N/A	0	2	N/A	N/A	0	2
ppal - 2do evap	3/8	3/8	4	4	N/A	N/A	4	4	N/A	N/A	4	5	N/A	N/A	4	3
2do evap	N/A	N/A	6	2	N/A	N/A	0	2	N/A	N/A	0	2	N/A	N/A	0	2
ppal - 3er evap	N/A	N/A	4	5	N/A	N/A	0	6	N/A	N/A	0	5	N/A	N/A	0	5
3er evap	N/A	N/A	0	2	N/A	N/A	0	2	N/A	N/A	0	2	N/A	N/A	0	2
ppal - 4er evap	N/A	N/A	0	5	N/A	N/A	0	6	N/A	N/A	0	7	N/A	N/A	0	7

Figura 10. Sección de resultado de las selecciones de la herramienta de cálculo.

**6.3.5. Sección de variables físicas del sistema.**

De acuerdo a los datos obtenidos por los datos de entrada del sistema, la herramienta realiza cálculos basados en la tabla del apéndice B, para el refrigerante R507A. Mediante esta sección, se puede validar la termodinámica asociada al intercambio energético presente para las condiciones del sistema, de acuerdo al diagrama de mollier.

**5. Variables físicas del sistema**

p vap	27,65	p_liq_aprox	967,20
p evap psi	77,75	p cond psi	271,80
v sat @P_evap	0,58 ft <sup>3</sup> /lb	u SH @p_evap	0,60 ft <sup>3</sup> /lb
factor corr v	0,95		
h @pcond	252,01	h liq sat	259,80
dh SH @pevap	2,47	dh	109,46

Figura 11. Sección de variables físicas de la herramienta de cálculo.

### 6.3.6. Sección de cálculo e iteración.

Finalmente, la sección de cálculos comprende varios apartados, en los cuales mediante el proceso de iteración, se conjugan tablas auxiliares para llamar todas las variables de la interfaz gráfica y complementar.

**Tabla de sumatoria de accesorios de refrigeración:** En este apartado, se suman los accesorios de acuerdo a los datos consignados, para cada diámetro de tubería, y de acuerdo a la configuración de la interfaz gráfica.

	CODO 90	TEE	REDUC SUCC	REDUC LIQ
<b>Ramal sistema</b>	15	1	2	2
Tramo 1	3	1	2	0
Evap 1	6			
Tramo 2	4	0	0	0
Evap 2	6			
Tramo 3	4	0	0	0
Evap 3	0			
Evap 4	0			
<b>Ramal M2</b>	4	1	1	1
Tramo 1	3	0	0	0
Evap 1	6			
Tramo 2	4	0	0	0
Evap 2	0			
Tramo 3	0	0	0	0
Evap 3	0			
Evap 4	0			
<b>Ramal M3</b>	3	1	0	0
Tramo 1	3	1	2	0
Evap 1	6			
Tramo 2	4	1	1	0
Evap 2	6			
Tramo 3	2	1	2	0
Evap 3	6			
Evap 4	7			
Tramo 1	3	1	2	0
Evap 1	6			
Tramo 2	4	1	1	0
Evap 2	6			
Tramo 3	2	1	2	0
Evap 3	6			
Evap 4	7			

Tabla 3. Apartado del conteo de accesorios de acuerdo a la información diligenciada en los datos de entrada y la interfaz gráfica.



LONGITUD EQUIVALENTE X ACCESORIOS LÍQUIDO											1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	LIQ	v	DT
3 1/8	2 5/8	2 1/8	1 5/8	1 3/8	1 1/8	7/8	5/8	1/2	3/8	3 1/8	2 5/8	2 1/8	1 5/8	1 3/8	1 1/8	7/8	5/8	1/2	3/8				
43,9	34,5	28,5	22,6	18,9	14,7	11,2	9,0	8,1	7,2	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,04	0,10	0,67	1,99	5,14	5/8	1,47	0,67	
11,5	9,1	7,5	6,0	5,1	3,9	3,0	2,4	2,2	2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,16	3/8	1,10	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	3/8	0,55	0,00	
9,2	7,2	6,0	4,8	4,0	3,2	2,4	2,0	1,8	1,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,05	3/8	0,55	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
9,2	7,2	6,0	4,8	4,0	3,2	2,4	2,0	1,8	1,6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
16,2	12,8	10,5	8,3	7,0	5,3	4,1	3,2	2,9	2,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	0,16	0,50	1,30	1/2	1,77	0,00	
6,9	5,4	4,5	3,6	3,0	2,4	1,8	1,5	1,4	1,2	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
9,2	7,2	6,0	4,8	4,0	3,2	2,4	2,0	1,8	1,6	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	0,00	0,00	
11,5	9,1	7,5	6,0	5,1	3,9	3,0	2,4	2,2	2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,21	0,56	3/8	2,20	0,00	
11,5	9,1	7,5	6,0	5,1	3,9	3,0	2,4	2,2	2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,16	3/8	1,10	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3/8	0,27	0,00	
13,8	10,9	9,0	7,2	6,1	4,7	3,6	2,9	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,05	0,14	3/8	0,82	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3/8	0,27	0,00	
9,2	7,3	6,0	4,8	4,1	3,1	2,4	1,9	1,8	1,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,06	3/8	0,55	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3/8	0,27	0,00	
16,1	12,6	10,5	8,4	7,0	5,6	4,2	3,5	3,2	2,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	3/8	0,27	0,00	
11,5	9,1	7,5	6,0	5,1	3,9	3,0	2,4	2,2	2,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,06	0,16	3/8	1,10	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3/8	0,27	0,00	
13,8	10,9	9,0	7,2	6,1	4,7	3,6	2,9	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,04	0,10	3/8	0,82	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3/8	0,27	0,00	
9,2	7,3	6,0	4,8	4,1	3,1	2,4	1,9	1,8	1,6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,02	0,06	3/8	0,55	0,00	
13,8	10,8	9,0	7,2	6,0	4,8	3,6	3,0	2,7	2,4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	3/8	0,27	0,00	
16,1	12,6	10,5	8,4	7,0	5,6	4,2	3,5	3,2	2,8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,03	3/8	0,27	0,00	

Figura 13. Apartado de longitud equivalente por accesorios línea de líquido para cada tramo de tubería.

**6.3.7. Ejemplo comparativo de la herramienta con los otros programas del objetivo 2.**

Retomando las variables del ejemplo 1, con longitud equivalente de 30 metros, capacidad del sistema es de 25 kW, temperatura de evaporación de -5°C, y temperatura de condensación de 40°C, se obtienen los siguientes resultados:

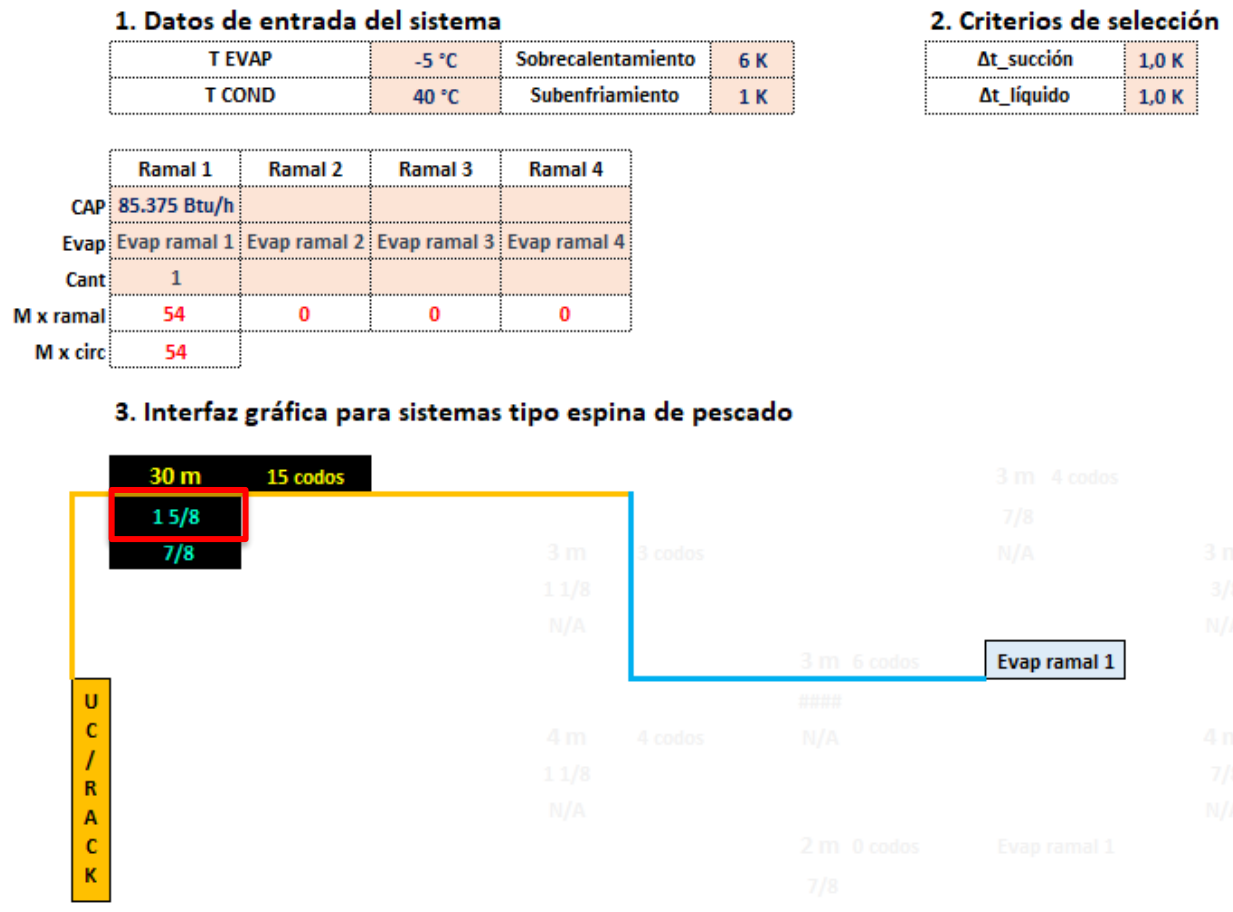


Figura 14. Resultados de selección de tubería de succión para el ejemplo 1.

Para los datos de entrada, la herramienta selecciona diámetro de tubería para la línea de succión de 1 5/8", al igual que las otros programas y la solución directa a la ecuación 1.

## 7. Conclusiones

- La ecuación 1 es la fuente matemática para evaluar las variables físicas implícitas en el cálculo, diseño y selección de tuberías de refrigeración, para distintos refrigerantes HFC.
- Las variables de dispersión del efecto refrigerante del sistema (sobrecalentamiento y subenfriamiento) no afectan sustancialmente al cálculo del diámetro de tubería para sistemas de una etapa y sin subenfriamiento de la línea de líquido. Para los otros sistemas, es fundamental tener en cuenta estas variables no solo para el cálculo del diámetro, sino también para la selección de los otros componentes de refrigeración como intercambiadores de placas, válvulas de expansión, visores de líquido, entre otros.
- Los criterios de selección planteados en el capítulo 1.3 del Handbook refrigeración 271 de 2024 pueden ser flexibles hasta un 20%, de acuerdo a la experiencia como diseñador y según la recomendación de los fabricantes de equipos de refrigeración.
- Los incrementos de temperatura de las líneas de tubería debido a las pérdidas de presión por la mala selección, puede representar alrededor del 7% de incremento de consumo de energía eléctrica.

- Las variaciones en la temperatura de condensación no representan cambios sustanciales en los resultados como las temperaturas de succión, debido a que en sistemas de una etapa, la temperatura de condensación típica, está entre 35°C y 50°C (15°C de rango), comparado con la temperatura de succión, la cuál puede ir desde -50°C hasta 5°C.
- Las herramientas más populares en el gremio de ingeniería de refrigeración en Colombia mencionadas en este documento, coinciden con los criterios de selección y la metodología mencionada en el capítulo 1.3 del Handbook refrigeración 271 de 2024.
- La herramienta desarrollada y descrita en este documento, verifica la viabilidad del método descrito en el capítulo 1.3 del Handbook refrigeración 271 de 2024, implementando mejoras en la interfaz gráfica para tomar decisiones frente a sistemas de refrigeración con varios ramales y circuitos de refrigeración. Bajo esta premisa, la herramienta desarrollada cumple cuatro pilares fundamentales en su desarrollo: Precisión, flexibilidad, entorno gráfico y experiencia de usuario.

### **Potencial para investigación futura y sus aplicaciones**

- Mediante la metodología espina de pescado, y la herramienta desarrollada en la hoja de cálculo, se puede implementar un módulo de cálculo de materiales y elementos de refrigeración, presentes en el listado de materiales para la

instalación de sistemas de refrigeración, debido a que la mayoría dependen de las variables previamente utilizadas (longitudes, cantidad de evaporadores, capacidades, temperaturas, entre otras). El diseñador podría aprovechar la construcción de esta herramienta para requerimientos futuros relacionados a la instalación mecánica y eléctrica.

- Mediante el uso del apéndice B, el diseñador podría determinar las variables de dispersión para cálculo y selección de compresores, de acuerdo a la metodología de curvas polinómicas suministradas por los fabricantes de compresores, de acuerdo al estándar AHRI 540.

### Referencias Bibliográficas

Tullie Circle, N.E., Atlanta GA 30329 (2014). 271 ASHRAE Handbook Refrigeration.

Althouse, A., Turnquist, C. Bracciano, A. (2004). Modern Refrigeration and air conditioning.

Kreider, J (2001). Handbook of Heating, Ventilation and Air Conditioning.

Whitman, B., Tomczyk, J., Johnson, B., Silberstein, E. (2012). Refrigeration & air conditioning technology.

Hundy, G., Trott, A., Welch, T. (2008). Refrigeration and air conditioning 4th edition.

Apéndices

Apéndice A. Tabla 7 Handbook refrigeración 271 de 2024

Table 7 Suction, Discharge, and Liquid Line Capacities in Kilowatts for Refrigerant 507A (Single- or High-Stage Applications)

Line Size Type L Copper, OD, mm	Suction Lines ( $\Delta t = 0.04$ K/m)						Discharge Lines ( $\Delta t = 0.02$ K/m, $\Delta p = 74.90$ )						Liquid Lines (40°C)		
	Saturated Suction Temperature, °C						Saturated Suction Temperature, °C						See note a		
	-50	-40	-30	-20	-5	5	-50	-40	-30	-20	-5	5	Velocity = 0.5 m/s	$\Delta t = 0.02$ K/m Drop $\Delta p = 896.3$	$\Delta t = 0.05$ K/m Drop $\Delta p = 2240.8$
	Corresponding $\Delta p$ , Pa/m						Corresponding $\Delta p$ , Pa/m								
	173.7	251.7	350.3	471.6	700.5	882.5	896.3	896.3	896.3	896.3	896.3	896.3			
12	0.16	0.28	0.44	0.68	1.21	1.70	1.72	1.86	2.00	2.13	2.32	2.43	4.0	7.9	13.0
15	0.31	0.53	0.85	1.30	2.31	3.24	3.27	3.54	3.80	4.05	4.41	4.63	6.5	15.0	24.7
18	0.55	0.92	1.47	2.26	4.00	5.61	5.66	6.12	6.57	7.01	7.63	8.01	9.8	26.1	42.8
22	0.97	1.63	2.60	3.98	7.02	9.85	9.93	10.73	11.52	12.29	13.37	14.04	15.0	45.9	75.1
28	1.91	3.22	5.14	7.85	13.83	19.38	19.53	21.12	22.67	24.18	26.31	27.63	25.1	90.5	147.8
35	3.52	5.91	9.42	14.37	25.28	35.40	35.68	38.58	41.42	44.17	48.07	50.47	39.7	165.6	270.0
42	5.86	9.82	15.65	23.83	41.86	58.55	59.03	63.82	68.52	73.07	79.52	83.50	58.2	274.8	447.1
54	11.68	19.55	31.07	47.24	82.83	115.76	116.74	126.22	135.51	144.51	157.26	165.12	98.0	544.0	883.9
67	20.86	34.83	55.25	84.08	147.12	205.36	206.75	223.53	239.99	255.92	278.52	292.43	151.9	967.0	1567.7
79	32.31	54.01	85.61	129.94	227.12	317.17	319.34	345.26	370.68	395.29	430.19	451.67	211.9	1497.3	2420.9
105	69.31	115.54	182.78	277.24	484.29	675.47	678.77	733.87	787.90	840.21	914.39	960.06	378.2	3189.5	5154.4
130	123.41	205.61	325.01	492.45	857.55	1194.03	1202.46	1300.07	1395.78	1488.45	1619.87	1700.76	586.7	5666.6	9129.4
156	200.86	333.77	526.96	797.36	1389.26	1935.01	1946.66	2104.68	2259.62	2409.65	2622.39	2753.36	849.9	9175.8	14793.3
206	412.07	683.01	1078.30	1631.18	2832.25	3937.64	3966.22	4288.18	4603.88	4909.55	5343.00	5609.84	1470.7	18734.6	30099.9
257	733.42	1216.78	1916.48	2891.11	5022.65	6984.91	7027.87	7598.35	8157.74	8699.37	9467.42	9940.23	2286.7	33285.5	53389.2
<b>Steel</b>															
<b>mm SCH</b>															
10	80	0.16	0.26	0.41	0.62	1.06	1.48	1.60	1.72	1.83	1.99	2.09	4.4	7.1	11.3
15	80	0.31	0.52	0.81	1.21	2.09	2.91	3.15	3.38	3.60	3.92	4.12	7.4	13.9	22.2
20	80	0.71	1.17	1.83	2.74	4.71	6.55	7.09	7.61	8.11	8.83	9.27	13.6	31.4	49.9
25	80	1.40	2.29	3.58	5.36	9.23	12.83	13.87	14.89	15.88	17.28	18.15	22.6	61.6	97.7
32	80	3.01	4.93	7.68	11.50	19.76	27.47	29.70	31.88	34.00	37.00	38.85	40.3	132.0	209.4
40	80	4.59	7.52	11.72	17.54	30.09	41.83	45.23	48.56	51.78	56.35	59.17	55.6	201.0	319.0
50	40	10.69	17.50	27.25	40.71	69.87	97.14	105.02	112.76	120.24	130.86	137.39	105.5	466.6	740.7
65	40	17.06	27.88	43.32	64.81	111.37	154.51	167.05	179.35	191.26	208.14	218.54	150.4	743.5	1178.1
80	40	30.20	49.26	76.63	114.52	196.37	273.05	295.22	316.95	338.00	367.84	386.21	232.3	1313.9	2082.0
100	40	61.60	100.39	156.20	233.20	400.40	555.50	600.59	644.81	687.62	748.33	785.70	400.3	2675.6	4235.5
125	40	111.17	181.20	281.64	421.03	721.18	1003.06	1084.49	1164.33	1241.63	1351.25	1418.74	628.6	4825.1	7638.5
150	40	179.98	292.99	455.44	680.92	1166.35	1620.28	1751.80	1880.77	2005.64	2182.72	2291.73	908.5	7803.5	12338.1
200	40	368.55	600.02	931.61	1393.04	2386.16	3310.49	3579.22	3842.72	4097.86	4459.65	4682.37	1573.2	15964.7	25241.5
250	40	666.52	1085.29	1685.18	2516.51	4316.82	5989.03	6475.19	6951.89	7413.46	8067.98	8470.90	2479.7	28840.0	45664.6
300	ID <sup>b</sup>	1067.53	1736.16	2695.93	4020.13	6896.51	9582.41	10360.26	11122.98	11861.49	12908.71	13553.39	3556.5	46140.3	72953.4
350	30	1380.23	2247.80	3485.20	5205.04	8929.47	12388.50	13394.13	14380.20	15334.97	16688.86	17522.33	4336.1	59651.3	94458.7
400	30	1991.54	3239.15	5030.17	7500.91	12848.49	17853.70	19302.97	20724.05	22100.02	24051.18	25252.33	5743.9	85963.1	136129.3

<sup>a</sup>Sizing shown is recommended where any gas generated in receiver must return up condensate line to condenser without restricting condensate flow. Water-cooled condensers, where receiver ambient temperature may be higher than refrigerant condensing temperature, fall into this category.  
<sup>b</sup>Pipe inside diameter is same as nominal pipe size.

Notes:  
1. Table capacities are in kilowatts of refrigeration.  
 $\Delta p$  = pressure drop per unit equivalent length of line, Pa/m  
 $\Delta t$  = corresponding change in saturation temperature, K/m  
2. Line capacity for other saturation temperatures  $\Delta t$  and equivalent lengths  $L_e$   
$$\text{Line capacity} = \text{Table capacity} \left( \frac{\text{Table } L_e}{\text{Actual } L_e} \times \frac{\text{Actual } \Delta t}{\text{Table } \Delta t} \right)^{0.55}$$
  
3. Saturation temperature  $\Delta t$  for other capacities and equivalent lengths  $L_e$   
$$\Delta t = \text{Table } \Delta t \left( \frac{\text{Actual } L_e}{\text{Table } L_e} \right)^{1.3} \left( \frac{\text{Actual capacity}}{\text{Table capacity}} \right)^{1.3}$$

4. Capacity (kW) based on standard refrigerant cycle of 40°C liquid and saturated evaporator outlet temperature. Liquid capacity (kW) based on -5°C evaporator temperature.  
5. Thermophysical properties and viscosity data based on calculations from NIST REFPROP program Version 6.01.  
6. For brazed Type L copper tubing larger than 28 mm OD for discharge or liquid service, see Safety Requirements section.  
7. Values are based on 40°C condensing temperature. Multiply table capacities by the following factors for other condensing temperatures.

Cond. Temp., °C	Suc-tion Line	Dis-charge Line
20	1.357	0.765
30	1.184	0.908
40	1.000	1.000
50	0.801	1.021

**Apéndice B. Tabla de propiedades de Refrigerante R507A.**

Temp (°C)	Pressure (kPa)		Density (kg/m <sup>3</sup> )		Volume (m <sup>3</sup> /kg)		Enthalpy (kJ/kg)			Entropy (kJ/K-kg)		PROM DEN [lb/ft <sup>3</sup> ]	DEN LIQ [lb/ft <sup>3</sup> ]	h LIQ [BTU/LB]
	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Vapor	Liquid	Latent	Vapor	Liquid	Vapor			
-50	88	88	1328	4,892	0,0008	0,204	135,6	197,8	333,4	0,7417	1,628	41,61	82,90	58,30
-49	92,4	92,4	1325	5,123	0,0008	0,195	136,8	197,2	334	0,7472	1,627	41,52	82,72	58,81
-48	97	97	1322	5,363	0,0008	0,187	138	196,6	334,6	0,7526	1,626	41,43	82,53	59,33
-47	101,8	101,8	1319	5,612	0,0008	0,178	139,2	196	335,2	0,758	1,625	41,35	82,34	59,85
-46	106,8	106,8	1315	5,87	0,0008	0,17	140,5	195,3	335,8	0,7634	1,623	41,23	82,09	60,40
-45	112	112	1312	6,137	0,0008	0,163	141,7	194,7	336,4	0,7687	1,622	41,14	81,91	60,92
-44	117,3	117,3	1309	6,413	0,0008	0,156	142,9	194,1	337	0,7741	1,621	41,06	81,72	61,44
-43	122,9	122,9	1306	6,699	0,0008	0,149	144,1	193,5	337,6	0,7795	1,62	40,97	81,53	61,95
-42	128,7	128,6	1303	6,995	0,0008	0,143	145,4	192,8	338,2	0,7848	1,619	40,89	81,34	62,51
-41	134,6	134,6	1300	7,301	0,0008	0,137	146,6	192,2	338,8	0,7901	1,618	40,81	81,16	63,03
-40	140,8	140,8	1297	7,618	0,0008	0,131	147,9	191,5	339,4	0,7954	1,617	40,72	80,97	63,59
-39	147,2	147,2	1293	7,945	0,0008	0,126	149,1	190,9	340	0,8007	1,616	40,61	80,72	64,10
-38	153,9	153,8	1290	8,283	0,0008	0,121	150,3	190,3	340,6	0,806	1,615	40,52	80,53	64,62
-37	160,7	160,7	1287	8,633	0,0008	0,116	151,6	189,6	341,2	0,8113	1,614	40,44	80,35	65,18
-36	167,8	167,8	1284	8,994	0,0008	0,111	152,8	189	341,8	0,8166	1,613	40,36	80,16	65,69
-35	175,2	175,1	1281	9,366	0,0008	0,107	154,1	188,2	342,3	0,8218	1,612	40,28	79,97	66,25
-34	182,8	182,7	1277	9,751	0,0008	0,103	155,4	187,5	342,9	0,8271	1,611	40,16	79,72	66,81
-33	190,6	190,5	1274	10,15	0,0008	0,099	156,6	186,9	343,5	0,8323	1,611	40,08	79,53	67,33
-32	198,7	198,6	1271	10,56	0,0008	0,095	157,9	186,2	344,1	0,8375	1,61	40,00	79,35	67,88
-31	207,1	207	1268	10,98	0,0008	0,091	159,1	185,6	344,7	0,8427	1,609	39,92	79,16	68,40
-30	215,7	215,6	1264	11,42	0,0008	0,088	160,4	184,9	345,3	0,8479	1,608	39,81	78,91	68,96
-29	224,6	224,5	1261	11,87	0,0008	0,084	161,7	184,1	345,8	0,8531	1,607	39,73	78,72	69,52
-28	233,8	233,7	1258	12,33	0,0008	0,081	163	183,4	346,4	0,8583	1,607	39,65	78,53	70,08
-27	243,2	243,1	1254	12,81	0,0008	0,078	164,2	182,8	347	0,8635	1,606	39,54	78,29	70,59
-26	253	252,9	1251	13,3	0,0008	0,075	165,5	182	347,5	0,8686	1,605	39,46	78,10	71,15

-25	263,1	262,9	1248	13,8	0,0008	0,072	166,8	181,3	348,1	0,8738	1,604	39,39	77,91	71,71
-24	273,4	273,3	1244	14,33	0,0008	0,07	168,1	180,6	348,7	0,8789	1,604	39,28	77,66	72,27
-23	284,1	283,9	1241	14,86	0,0008	0,067	169,4	179,8	349,2	0,884	1,603	39,20	77,47	72,83
-22	295,1	294,9	1237	15,42	0,0008	0,065	170,7	179,1	349,8	0,8892	1,602	39,09	77,22	73,39
-21	306,4	306,2	1234	15,99	0,0008	0,063	172	178,4	350,4	0,8943	1,602	39,02	77,04	73,95
-20	318	317,8	1231	16,57	0,0008	0,06	173,3	177,6	350,9	0,8994	1,601	38,94	76,85	74,51
-19	330	329,8	1227	17,18	0,0008	0,058	174,6	176,9	351,5	0,9045	1,601	38,84	76,60	75,06
-18	342,3	342,1	1224	17,8	0,0008	0,056	175,9	176,1	352	0,9096	1,6	38,76	76,41	75,62
-17	354,9	354,7	1220	18,43	0,0008	0,054	177,2	175,4	352,6	0,9146	1,599	38,66	76,16	76,18
-16	367,9	367,7	1217	19,09	0,0008	0,052	178,5	174,6	353,1	0,9197	1,599	38,58	75,98	76,74
-15	381,3	381	1213	19,77	0,0008	0,051	179,8	173,9	353,7	0,9248	1,598	38,48	75,73	77,30
-14	395	394,8	1209	20,46	0,0008	0,049	181,1	173,1	354,2	0,9298	1,598	38,38	75,48	77,86
-13	409,1	408,9	1206	21,17	0,0008	0,047	182,5	172,3	354,8	0,9349	1,597	38,31	75,29	78,46
-12	423,6	423,3	1202	21,91	0,0008	0,046	183,8	171,5	355,3	0,9399	1,597	38,20	75,04	79,02
-11	438,5	438,2	1199	22,66	0,0008	0,044	185,1	170,7	355,8	0,945	1,596	38,13	74,85	79,58
-10	453,7	453,4	1195	23,44	0,0008	0,043	186,4	170	356,4	0,95	1,596	38,03	74,60	80,14
-9	469,4	469	1191	24,23	0,0008	0,041	187,8	169,1	356,9	0,955	1,595	37,93	74,35	80,74
-8	485,4	485,1	1188	25,05	0,0008	0,04	189,1	168,3	357,4	0,96	1,595	37,86	74,17	81,30
-7	501,9	501,5	1184	25,89	0,0008	0,039	190,5	167,4	357,9	0,9651	1,594	37,77	73,92	81,90
-6	518,8	518,4	1180	26,76	0,0009	0,037	191,8	166,7	358,5	0,9701	1,594	37,67	73,67	82,46
-5	536,1	535,7	1176	27,65	0,0009	0,036	193,2	165,8	359	0,9751	1,593	37,57	73,42	83,06
-4	553,8	553,4	1173	28,56	0,0009	0,035	194,5	165	359,5	0,9801	1,593	37,51	73,23	83,62
-3	572	571,6	1169	29,49	0,0009	0,034	195,9	164,1	360	0,9851	1,593	37,41	72,98	84,22
-2	590,6	590,2	1165	30,46	0,0009	0,033	197,3	163,2	360,5	0,99	1,592	37,32	72,73	84,82
-1	609,7	609,2	1161	31,44	0,0009	0,032	198,6	162,4	361	0,995	1,592	37,22	72,48	85,38
0	629,3	628,7	1157	32,46	0,0009	0,031	200	161,5	361,5	1	1,591	37,13	72,23	85,98
1	649,3	648,7	1153	33,5	0,0009	0,03	201,4	160,6	362	1,005	1,591	37,04	71,98	86,59
2	669,7	669,1	1150	34,57	0,0009	0,029	202,8	159,7	362,5	1,01	1,59	36,98	71,79	87,19
3	690,7	690,1	1146	35,67	0,0009	0,028	204,1	158,9	363	1,015	1,59	36,88	71,54	87,75

4	712,1	711,5	1142	36,8	0,0009	0,027	205,5	157,9	363,4	1,02	1,59	36,80	71,29	88,35
5	734	733,4	1138	37,95	0,0009	0,026	206,9	157	363,9	1,025	1,589	36,71	71,04	88,95
6	756,5	755,8	1133	39,14	0,0009	0,026	208,3	156,1	364,4	1,03	1,589	36,59	70,73	89,55
7	779,4	778,7	1129	40,36	0,0009	0,025	209,7	155,2	364,9	1,035	1,588	36,50	70,48	90,15
8	802,9	802,2	1125	41,62	0,0009	0,024	211,2	154,1	365,3	1,04	1,588	36,42	70,23	90,80
9	826,9	826,1	1121	42,91	0,0009	0,023	212,6	153,2	365,8	1,045	1,588	36,33	69,98	91,40
10	851,4	850,6	1117	44,23	0,0009	0,023	214	152,2	366,2	1,05	1,587	36,25	69,73	92,00
11	876,4	875,6	1113	45,58	0,0009	0,022	215,4	151,3	366,7	1,055	1,587	36,16	69,48	92,61
12	902	901,2	1108	46,98	0,0009	0,021	216,9	150,2	367,1	1,06	1,586	36,05	69,17	93,25
13	928,2	927,3	1104	48,41	0,0009	0,021	218,3	149,2	367,5	1,064	1,586	35,97	68,92	93,85
14	954,9	954	1100	49,88	0,0009	0,02	219,7	148,3	368	1,069	1,586	35,89	68,67	94,45
15	982,2	981,3	1095	51,39	0,0009	0,019	221,2	147,2	368,4	1,074	1,585	35,78	68,36	95,10
16	1010	1009	1091	52,94	0,0009	0,019	222,6	146,2	368,8	1,079	1,585	35,71	68,11	95,70
17	1039	1038	1086	54,54	0,0009	0,018	224,1	145,1	369,2	1,084	1,584	35,60	67,80	96,35
18	1068	1067	1082	56,17	0,0009	0,018	225,6	144	369,6	1,089	1,584	35,53	67,55	96,99
19	1097	1096	1077	57,85	0,0009	0,017	227,1	142,9	370	1,094	1,584	35,42	67,24	97,64
20	1127	1126	1073	59,58	0,0009	0,017	228,5	141,9	370,4	1,099	1,583	35,35	66,99	98,24
21	1158	1157	1068	61,36	0,0009	0,016	230	140,8	370,8	1,104	1,583	35,25	66,67	98,88
22	1190	1189	1063	63,19	0,0009	0,016	231,5	139,7	371,2	1,109	1,582	35,15	66,36	99,53
23	1222	1221	1059	65,06	0,0009	0,015	233	138,5	371,5	1,114	1,582	35,09	66,11	100,17
24	1255	1254	1054	66,99	0,001	0,015	234,5	137,4	371,9	1,119	1,581	34,99	65,80	100,82
25	1288	1287	1049	68,98	0,001	0,015	236	136,2	372,2	1,124	1,581	34,90	65,49	101,46
26	1322	1321	1044	71,02	0,001	0,014	237,6	135	372,6	1,129	1,58	34,80	65,18	102,15
27	1357	1356	1039	73,12	0,001	0,014	239,1	133,8	372,9	1,134	1,58	34,71	64,86	102,79
28	1392	1391	1034	75,28	0,001	0,013	240,6	132,6	373,2	1,139	1,579	34,63	64,55	103,44
29	1429	1427	1029	77,51	0,001	0,013	242,2	131,3	373,5	1,144	1,579	34,54	64,24	104,13
30	1465	1464	1024	79,8	0,001	0,013	243,7	130,2	373,9	1,149	1,578	34,45	63,93	104,77
31	1503	1502	1018	82,16	0,001	0,012	245,3	128,8	374,1	1,154	1,578	34,34	63,55	105,46
32	1541	1540	1013	84,59	0,001	0,012	246,9	127,5	374,4	1,159	1,577	34,26	63,24	106,15

33	1580	1579	1008	87,09	0,001	0,011	248,5	126,2	374,7	1,164	1,577	34,18	62,93	106,84
34	1620	1618	1002	89,67	0,001	0,011	250	125	375	1,169	1,576	34,08	62,55	107,48
35	1660	1659	996,5	92,34	0,001	0,011	251,7	123,5	375,2	1,174	1,575	33,99	62,21	108,21
36	1702	1700	990,9	95,09	0,001	0,011	253,3	122,1	375,4	1,179	1,575	33,90	61,86	108,90
37	1744	1742	985,1	97,92	0,001	0,01	254,9	120,7	375,6	1,185	1,574	33,81	61,50	109,59
38	1786	1785	979,3	100,9	0,001	0,01	256,5	119,4	375,9	1,19	1,573	33,72	61,14	110,28
39	1830	1828	973,3	103,9	0,001	0,01	258,2	117,8	376	1,195	1,572	33,62	60,76	111,01
40	1874	1873	967,2	107	0,001	0,009	259,8	116,4	376,2	1,2	1,572	33,53	60,38	111,69
41	1919	1918	961,1	110,2	0,001	0,009	261,5	114,9	376,4	1,205	1,571	33,44	60,00	112,42
42	1965	1964	954,8	113,6	0,0011	0,009	263,2	113,3	376,5	1,21	1,57	33,35	59,61	113,16
43	2012	2011	948,4	117,1	0,0011	0,009	264,9	111,7	376,6	1,216	1,569	33,26	59,21	113,89
44	2060	2058	941,8	120,7	0,0011	0,008	266,6	110,1	376,7	1,221	1,568	33,17	58,80	114,62
45	2109	2107	935,2	124,4	0,0011	0,008	268,3	108,5	376,8	1,226	1,567	33,07	58,38	115,35
46	2158	2156	928,3	128,3	0,0011	0,008	270,1	106,8	376,9	1,231	1,566	32,98	57,95	116,12
47	2208	2206	921,4	132,3	0,0011	0,008	271,8	105,1	376,9	1,237	1,565	32,89	57,52	116,85
48	2259	2258	914,2	136,5	0,0011	0,007	273,6	103,3	376,9	1,242	1,564	32,80	57,07	117,63
49	2312	2310	906,9	140,9	0,0011	0,007	275,4	101,5	376,9	1,248	1,563	32,71	56,62	118,40
50	2365	2363	899,4	145,4	0,0011	0,007	277,2	99,6	376,8	1,253	1,561	32,61	56,15	119,17
51	2419	2417	891,7	150,2	0,0011	0,007	279,1	97,7	376,8	1,259	1,56	32,52	55,67	119,99
52	2474	2472	883,7	155,1	0,0011	0,006	280,9	95,7	376,6	1,264	1,558	32,43	55,17	120,77
53	2529	2528	875,5	160,4	0,0011	0,006	282,8	93,7	376,5	1,27	1,557	32,33	54,66	121,58
54	2586	2584	867,1	165,8	0,0012	0,006	284,7	91,6	376,3	1,275	1,555	32,24	54,13	122,40
55	2644	2642	858,3	171,6	0,0012	0,006	286,7	89,4	376,1	1,281	1,553	32,15	53,58	123,26
56	2703	2701	849,3	177,7	0,0012	0,006	288,7	87,1	375,8	1,287	1,552	32,06	53,02	124,12
57	2763	2761	839,8	184,1	0,0012	0,005	290,7	84,7	375,4	1,293	1,55	31,96	52,43	124,98
58	2824	2822	830	190,9	0,0012	0,005	292,7	82,3	375	1,299	1,547	31,87	51,82	125,84
59	2887	2885	819,7	198,2	0,0012	0,005	294,9	79,7	374,6	1,305	1,545	31,77	51,17	126,78
60	2950	2948	808,9	206	0,0012	0,005	297	77	374	1,311	1,542	31,68	50,50	127,69