



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA MECÁNICA



**#HERRAMIENTA DE CÁLCULO PARA RENDIMIENTOS ESTACIONALES
DE SISTEMAS DE CALEFACCIÓN EN EL CONTEXTO DE LA
CALIFICACIÓN ENERGÉTICA DE VIVIENDAS #**

POR

<Raúl Alfonso Otárola Aguayo>

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor Guía:
<Doctor en Ciencias Aplicadas Adelqui Fissore >

Abril 2023
Concepción (Chile)

© 2023 Raúl Alfonso Otárola Aguayo

© 2023 Raúl Alfonso Otárola Aguayo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o
procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quisiera en primer lugar, expresar mi más profundo agradecimiento a mis padres Alfonso y Yinti; igualmente a mi hermana María José por su cariño y apoyo incondicional durante toda mi vida, por alentarme y apoyarme durante estos años de estudios y especialmente durante la realización de la Memoria de Título.

También mencionar a mi pareja y madre de mi hija Patricia, quien en estos últimos años ha sido un apoyo fundamental, tanto en el ámbito de los estudios, como emocional.

Agradezco a mi profesor guía Dr. Adelqui Fissore por su constante ayuda, guía y sugerencias en el proceso de realización de este proyecto.

Agradecer a el señor Rafael Ruiz Mansilla, docente de "Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona", quien me facilito la norma europea de trabajo.

Me gustaría agradecer a los docentes y funcionarios del departamento de Ingeniería Civil Mecánica de la Universidad de Concepción por sus enseñanzas durante estos años de carrera.

Igualmente, a mis amigos de Universidad, quienes me han apoyado desde los primeros años de estudio y con quienes he compartido innumerables conversaciones, anécdotas y buenos momentos.

Esta memoria está dedicada...

A la personita más bella, la cual llegó a este mundo mientras aún era estudiante, y que desde hace un más de un año me acompaña, la niña de mis ojos, mi hija María Bertina de Jesús, quien es mi motivación para superarme día a día, cumplir mis sueños y metas. A quien busco darle el mejor de los ejemplos y que se sienta orgullosa de los logros de su padre. Es por esto, que esta memoria está dedicada a ella.

Resumen

Este proyecto aborda la problemática que representa el cálculo del rendimiento estacional para bombas de calor en el contexto de la calificación energética de viviendas. Para su desarrollo se compararán las normas actuales en las que se basa la calificación energética de viviendas (CEV) versus las normas internacionales disponibles, como resultado de esto se hará uso de la metodología de cálculo propuesta en la norma UNE-EN 14825-2016, dado que ambas tienen sus raíces en la norma ISO 5151.

Por tanto, uno de los objetivos de este trabajo es el análisis de dicha norma, considerando la tipología de bombas de calor a las cuales es aplicable y las distintas variables que influyen en el método de cálculo. Resulta de especial importancia la comprensión de los conceptos de rendimiento estacional, referentes al trabajo de la bomba de calor ya sea en modo de calefacción (en invierno) o bien modo de refrigeración (en verano).

El objetivo principal es generar una metodología aplicable a la CEV, que sea compatible con las condiciones de nuestro país (clima, equipos, información, entre otros) y a partir de esto desarrollar una herramienta de cálculo, haciendo uso del programa Excel. Esta herramienta debe permitir al usuario realizar el cálculo para cualquier bomba de calor del tipo aire/aire.

Adicionalmente, esta herramienta de cálculo resulta de uso sencillo para el usuario, es decir, que un usuario con conocimientos básicos en la temática pueda realizar los cálculos sin necesidad de un gran esfuerzo de comprensión de los procedimientos seguidos en el código de programación. Por lo tanto, al llevar a cabo la confección del programa, se debe contar con cálculos sencillos y comprensibles, y al mismo tiempo aplicables a diferentes equipos y fabricantes del sector. Asimismo, con el propósito de simplificar la labor del usuario, se minimiza el número de interacciones con el programa, sin necesidad de que el usuario intervenga, excepto a la hora de introducir los datos de la bomba de calor que se desea calcular.

Abstract

This project deals with the problem that represents the calculation of the seasonal performance for heat pumps in the context of the energy rating of homes. For its development, the current standards on which the energy rating of homes (CEV) is based will be compared versus the available international standards, because of this, the calculation methodology proposed in the UNE-EN 14825-2016 standard will be used, since both have their roots in ISO 5151.

Therefore, one of the objectives of this work is the analysis of said standard, considering the type of heat pumps to which it is applicable and the different variables that influence the calculation method. It is of special importance to understand the concepts of seasonal performance, referring to the work of the heat pump either in heating mode (in winter) or cooling mode (in summer).

The main objective is to generate a methodology applicable to the CEV, which is compatible with the conditions of our country (climate, equipment, information, among others) and from this to develop a calculation tool, using the Excel program. This tool allows the user to perform the calculation for any air/air type heat pump.

Additionally, this calculation tool is easy to use for the user, that is, a user with basic knowledge of the subject can perform the calculations without the need for a great effort to understand the procedures followed in the programming code. Therefore, when carrying out the preparation of the program, you must have simple and understandable calculations, and at the same time applicable to different equipment and manufacturers in the sector. Likewise, with the purpose of simplifying the user's work, the number of interactions with the program is minimized, without the need for the user to intervene, except when entering the data of the heat pump to be calculated.

Tabla de Contenidos

Tabla de Contenidos	iii
Lista de Tablas	v
Lista de Figuras	vi
Glosario.....	viii
1 CAPÍTULO 1: Introducción	1
1.1 Marco general	1
1.2 Objetivo General	1
1.3 Metodología.....	2
2 CAPÍTULO 2: Marco Teórico	4
2.1 Bombas de calor.....	4
2.2 Definición y funcionamiento	4
2.3 Tipologías de bombas de calor	5
2.4 Calificación energética de viviendas (CEV)	7
2.5 Selección norma base de trabajo.....	8
3 CAPÍTULO 3: Conceptos.....	11
3.1 Valores puntuales.....	11
3.2 Valores estacionales	12
3.3 Clasificación energética	15
4 Capítulo 4: Contexto Normativo	17
4.1 Calculo en modo calefacción.....	17
4.2 Cálculo en modo refrigeración	25
5 Capítulo 5: Herramienta de cálculo.....	30
5.1 Programación SCOP.	31
5.2 Programación SEER.....	31
6 Capítulo 6: Conclusiones	33
Referencias.....	34
Anexo A: Código de programación de la herramienta, proceso de cálculo del SCOP para el clima A, resolución ejemplo de la norma, para crear base de programación.	35
Anexo B: Código de programación de la herramienta, proceso de cálculo del SCOP para el clima W, seleccionado para nuestro país.	46
Anexo C: Código de programación de la herramienta, proceso de cálculo del SEER.....	57

Anexo D: Resolución ejemplo Anexo E Norma UNE 14825-2016, cálculo SEER resuelto por la herramienta desarrollada..... 62

Lista de Tablas

Tabla 1. Funcionamiento bomba de calor. (Fuente: elaboración propia).....	5
Tabla 2. Normas nacionales y normas de referencia, métricas usadas, para diferentes países para los ensayos de eficiencia energética para aires acondicionados (Fuente: CLASP, Improving Global Comparability).	9
Tabla 3. Factor de carga parcial según clima. (Fuente: Norma UNE EN 14825-2016.).....	13
Tabla 4. temperaturas según la estación de referencia. (Fuente: UNE EN 14825-2016).....	17
Tabla 5. Tabla A.4 "Número de horas utilizadas para el cálculo del SCOP". (Fuente: UNE 14825-2016).....	25
Tabla 6. Tabla A.6 "Número de horas en modo de dispositivo de calentamiento del cárter para la determinación del SCOP". (Fuente: UNE 14825-2016).....	25
Tabla 7. Factores de carga parcial y temperatura de bulbo seco del aire exterior para el caso de modo refrigeración. (Fuente: UNE 14825-2016).....	26
Tabla 8. Tabla A.3 "Número de horas utilizadas para el cálculo del SEER". (Fuente: UNE 14825-2016).....	29
Tabla 9. Tabla A.5 "Número de horas en modo de dispositivo de calentamiento del cárter para la determinación del SEER". (Fuente: UNE 14825-2016).....	29
Tabla 10. Condiciones de interpolaciones para las capacidades.	42
Tabla 11. Condiciones de interpolaciones para COP.	43
Tabla 12. Condiciones de interpolaciones para las capacidades, para T_{biv} entre T_B y T_C	53
Tabla 13. Condiciones de interpolaciones para COP, para T_{biv} entre T_B y T_C	53
Tabla 14. Condiciones de interpolaciones para las capacidades, para las temperaturas de los recipientes entre C y D.	53
Tabla 15. Condiciones de interpolaciones para COP, para las temperaturas de los recipientes entre C y D.	54
Tabla 16. Condiciones para interpolaciones/extrapolaciones de la capacidad de refrigeración.	59
Tabla 17. Condiciones para interpolaciones/extrapolaciones del EER.	60

Lista de Figuras

Figura 1. Esquema Funcionamiento bomba de calor. (Fuente: Manual CEV, modulo 4 – equipos transformadores de energía.).....	4
Figura 2. Escala CEV. (Fuente: manual CEV – 2019).....	7
Figura 3. Etiqueta de calificación energética. (Fuente: Norma UNE 14825 – 2016)	16
Figura 4. Condiciones de carga parcial para el cálculo del SCOP de referencia, el SCOPon de referencia, el SCOPnet de referencia de unidades aire/agua para aplicaciones a temperatura media para la estación de calefacción de referencia W. (Fuente: UNE EN 14825-2016).....	19
Figura 5. Tabla E.1. Datos para el SCOP del ejemplo del Anexo E de la UNE-EN 14825-2016. (Fuente: UNE EN 14825-2016).	20
Figura 6. Extracto de la tabla F.2 Cálculo del periodo para el SCOPon del Anexo F de la norma UNE-EN 14825.	23
Figura 7. Extracto de la tabla F.3 Cálculo del periodo para el SCOPon del Anexo F de la Norma UNE-EN 14825.	24
Figura 8. Datos para el SEER. (Fuente norma UNE 14825).	26
Figura 9. Extracto de la Tabla E.2. "Cálculo del periodo para el SEERon". (Fuente: UNE 14825) .	28
Figura 10. Extracto tabla previa de trabajo.....	35
Figura 11. Código programación datos de entrada.....	36
Figura 12. Código programación verificación datos de entrada.	36
Figura 13. Código programación verificación datos de rendimiento.	37
Figura 14. Código programación verificación datos de funcionamiento.	37
Figura 15. Código programación coeficiente de carga parcial y carga parcial.....	38
Figura 16. Código programación relación de capacidad CR para los puntos A a F.	39
Figura 17. Programación COP a carga parcial para los puntos A a F.	39
Figura 18. Extracto tabla cálculo de intervalo.	40
Figura 19. Programación prueba de puntos A, B, C, D, Tbiv, TOL.	41
Figura 20. Programación relación carga parcial.	41
Figura 21. Programación condición TOL=TA, para interpolación de capacidades y COP.	42
Figura 22. Programación calculo SCOPon.	43
Figura 23. Programación cálculos consumos auxiliares.....	44
Figura 24. Programación consumo anual de energía.....	44
Figura 25. Programación calculo SCOP.....	44
Figura 26. Extracto tabla previa de trabajo.....	46
Figura 27. Código programación datos de entrada.....	47
Figura 28. Código programación verificación datos de entrada.	47
Figura 29. Código programación verificación datos de rendimiento.	48
Figura 30. Código programación verificación datos de funcionamiento.	48
Figura 31. Código programación coeficiente de carga parcial y carga parcial.....	49
Figura 32. Código programación relación de capacidad CR para los puntos B a F.....	50
Figura 33. Programación COP a carga parcial para los puntos B a F.	50
Figura 34. Extracto tabla cálculo de intervalo.	51

Figura 35. Programación prueba de puntos B, C, D, T _{biv} , TOL.	52
Figura 36. Programación relación carga parcial.	52
Figura 37. Programación interpolación de capacidades y COP.	53
Figura 38. Programación demanda anual de calor y consumo de energía.	54
Figura 39. Programación calculo SCOP _{on}	54
Figura 40. Programación cálculos consumos auxiliares.	55
Figura 41. Programación consumo anual de energía.	55
Figura 42. Programación calculo SCOP.	56
Figura 43. Programación etiqueta energética.	56
Figura 44. Programación condigo para la verificación de datos de entrada.	57
Figura 45. Programación condigo para la verificación datos de rendimiento.	57
Figura 46. Programación código verificación datos modos auxiliares.	57
Figura 47. Programación código cálculo de relación de carga parcial y potencia a carga parcial.	58
Figura 48. Programación código cálculo de la relación de capacidad CR.	59
Figura 49. Programación calculo SEER _{on}	60
Figura 50. Programación cálculos de los consumos de energía auxiliar.	60
Figura 51. Programación cálculos del consumo anual de energía auxiliar.	61
Figura 52. Programación cálculo SEER.	61
Figura 53. Interfaz herramienta de cálculo.	62
Figura 54. Ingreso de datos en la interfaz de herramienta.	63
Figura 55. Ejemplo resuelto por la herramienta.	63

Glosario

A	:	Clima medio
C	:	Clima más frío
Cc	:	Factor de degradación para unidades aire/agua o agua-salmuera/agua
Cd	:	Factor de degradación para unidades aire/aire o agua-salmuera/aire
CEV	:	Calificación Energética de Viviendas
COP	:	Coefficient Of Performance (Coeficiente de rendimiento) [kW/kW]
COPd	:	COP a capacidad declarada [kW/kW]
COPbin(Tj)	:	COP específico del periodo [kW/kW]
CRu	:	Factor de potencia
EER	:	Energy Efficiency Ratio (Factor de Eficiencia Energética) [kW/kW]
EERd	:	EER a capacidad declarada [kW/kW]
EERbin(Tj)	:	EER específico del periodo [kW/kW]
Elbu	:	Potencia del calefactor eléctrico de reserva [kW]
Hj	:	Horas de funcionamiento del periodo [h]
Pd	:	Potencia declarada [kW]
Pdesignc	:	Carga completa en modo refrigeración [kW]
Pdesignh	:	Carga completa en modo calefacción [kW]
Ph(Tj)	:	Demanda de calefacción a temperatura Tj [°C]
SCOP	:	Seasonal Coefficient Of Performance (Coeficiente de rendimiento estacional) [kWh/kWh]
SCOPnet	:	SCOP en modo activo sin calefactor eléctrico de reserva [kWh/kWh]
SCOPon	:	SCOP en modo activo [kWh/kWh]
SEER	:	Seasonal Energy Efficiency Ratio (Factor de Eficiencia Energética Estacional) [kWh/kWh]
SEERon	:	SEER en modo activo [kWh/kWh]
Tvib	:	Temperatura bivalente [°C]
Tdesignc	:	Temperatura de diseño en modo refrigeración [°C]
Tdesignh	:	Temperatura de diseño en modo calefacción [°C]
TOL	:	Temperatura límite de funcionamiento [°C]
W	:	Clima cálido
CEV	:	Calificación energética de viviendas.
TO	:	Modo desactivado del termostato.
SB	:	Modo espera (Standby).
CK	:	Modo de dispositivo de calentamiento del cárter.
OFF	:	Modo desactivado.

CAPÍTULO 1: Introducción

1.1 Marco general

La eficiencia estacional es una nueva forma de medir la eficiencia energética real de las tecnologías de calefacción y refrigeración, durante todo un año. Esta nueva medición proporciona una indicación realista de la eficiencia energética e impacto medioambiental de un sistema.

La eficiencia estacional exige un nuevo sistema de clasificación para los productos de calefacción y refrigeración, que deben utilizar todos los fabricantes. Estos son:

El valor de Relación de Eficiencia Energética Estacional (SEER) en refrigeración.

El valor de Coeficiente Estacional de Rendimiento (SCOP) en calefacción.

Estas nuevas clasificaciones estacionales reflejan el consumo energético real de una bomba de calor, basado en su eficiencia energética durante todo un año. Los valores SEER y SCOP miden la eficiencia y consumo energético anuales con un uso diario normal. En un plazo más largo, tienen en cuenta las fluctuaciones de temperatura y los periodos en espera para proporcionar una indicación clara y fiable de la eficiencia energética normal en toda una temporada de calefacción o refrigeración.

A la hora de desarrollar el estudio del cálculo, se requieren una serie de conocimientos previos en la temática de estudio. Es necesario un conocimiento base sobre las bombas de calor y cálculo de su rendimiento estacional. Asimismo, se debe de realizar un estudio sobre la forma actual de cálculo de rendimientos estacionales en Chile de lo cual solo se tienen algunos indicios, además del mercado actual del sector (bombas de calor comercializadas e información técnica proporcionada por el fabricante al cliente).

1.2 Objetivo General

El proyecto aborda la problemática que representa el cálculo del rendimiento estacional para bombas de calor en el contexto de la calificación energética de viviendas (CEV), actualmente en nuestro país.

Por tanto, uno de objetivos es el análisis de dicha CEV, realizar un análisis crítico del modelo, determinación de los puntos más débiles, finalmente realizar una propuesta de los elementos a modificar.

Resulta de especial importancia la comprensión de los conceptos de rendimiento estacional, referentes al trabajo de la bomba, tanto en modo de calefacción (en invierno) o bien modo de refrigeración (en verano).

Como método para obtener el rendimiento estacional se decide tomar como base una norma internacional, que sea similar a la utilizada en la calificación energética de viviendas (CEV), a partir de esta metodología presente en la norma que será seleccionada, se desarrollará una herramienta de cálculo, para rendimientos estacionales, la herramienta debe ser programada haciendo uso del programa Excel, debido a que la actual CEV, basa sus programas de cálculos en el mismo lenguaje de programación.

Se pretende que esta herramienta permita al usuario realizar el cálculo de forma exacta para bombas de calor del tipo aire/aire (de uso más típico en viviendas), que cumpla las condiciones establecidas en la norma base que se seleccione para el trabajo.

El objetivo final es, por tanto, crear un programa capaz de calcular de forma exacta el valor del rendimiento estacional de una bomba de calor del tipo antes mencionado a partir de los datos proporcionados por el fabricante.

Además, se procura que esta herramienta de cálculo tenga una interfaz de uso sencillo para el usuario, para que este, con conocimientos básicos en el tema pueda realizar los cálculos sin necesidad de comprender las líneas del código programado. De igual manera, con el propósito de simplificar el trabajo del usuario, se buscará disminuir considerablemente el número de interacciones del programa con él, para esto el programa debe comportarse de forma automatizada sin necesidad de que el usuario intervenga, excepto a la hora de introducir los datos de la bomba de calor entregados por el fabricante.

1.2.1 Objetivos específicos

- Realizar un análisis simple del método actual de cálculo del rendimiento de las bombas de calor en el contexto de la calificación energética de viviendas (CEV).
- Crear un instrumento de cálculo de rendimiento estacional para bombas de calor, que pueda adaptarse/incluirse en el método actual de cálculo actual de eficiencia energética de viviendas (CEV).

1.3 Metodología

Se busca generar un procedimiento para el cálculo de rendimientos estacionales de sistemas de calefacción, aplicable a la actual propuesta de la CEV, mediante la creación de una herramienta, que permita obtener valores de rendimiento estacional para bombas de calor comercializadas en nuestro país. El campo de aplicación de dicho programa es muy extenso, no obstante, se establecen ciertos límites en lo que respecta al alcance de este trabajo, con el fin de simplificar el análisis, el proceso y el resultado final de este.

El trabajo se centrará en la adaptación de la metodología de cálculo propuesta por la norma europea, UNE-EN 14825-2016, la cual es aplicable a bombas de calor con compresor accionado eléctricamente, excluyendo por lo tanto del cálculo cualquier tipología de máquina térmica que no cumpla este requisito.

Adicionalmente, los datos utilizados de número de horas por periodo, necesarios para llevar a cabo los cálculos, son los correspondientes a máquinas térmicas de potencia igual o inferior a 12 kW (40.000BTU/h aproximadamente). En el caso que la potencia de la máquina térmica supere este valor, se deberá comprobar si los resultados de número de horas utilizados son los adecuados o, en cambio, se han de sustituir por otros.

En cuanto al campo de aplicación de la herramienta, se ha de confeccionar de manera que calcule el rendimiento estacional para cualquier máquina térmica del mercado, en este caso estará limitando al estudio de bombas de calor del tipo aire/aire (dado que son las bombas de calor de uso más común en viviendas).

No obstante, se ha de tener en cuenta que la diversidad de bombas de calor del mercado es extensa y la tecnología se encuentra día a día en constante avance, de manera que existe la posibilidad de que a corto plazo puedan encontrarse casos puntuales, para los cuales el programa necesite una modificación, actualización y/o reestructuración. Por lo que no se descarta que la herramienta sea dinámica y esté abierta a posibles modificaciones cuando se necesiten ampliar las funciones.

CAPÍTULO 2: Marco Teórico

2.1 Bombas de calor

Este trabajo se centra en la creación de una herramienta de cálculo para rendimientos estacionales de bombas de calor. Es por esto por lo que se considera relevante la realización de un estudio previo, analizando su definición, funcionamiento y tipología, así como otros parámetros importantes para el cálculo de rendimientos. En los siguientes apartados se presenta un breve estudio sobre las características más destacadas de las bombas de calor.

2.2 Definición y funcionamiento

Una bomba de calor se define como una máquina térmica que, siguiendo un ciclo termodinámico cerrado, transfiere calor del entorno (aire, agua o tierra) a una vivienda, edificio o bien una instalación industrial, por medio de un gas refrigerante que fluye desde una temperatura más baja a otra más alta. El calor es extraído de una fuente (renovable) de energía por medio de un evaporador, y se transmite a través de un condensador a un foco de alta temperatura. Se trata de una máquina reversible, esto es, con la posibilidad de funcionar en dos modos, modo calefacción (el correspondiente a la definición previa y también llamado modo bomba de calor), y modo refrigeración (intercambia el calor del recinto con el exterior, refrigerando el interior de este). La inversión del ciclo se consigue mediante una válvula de 4 vías, de tal forma que no es necesario cambiar los elementos (evaporador y condensador) de posición según el modo de funcionamiento, sino que tan solo es necesario modificar las conexiones mediante dicha válvula. En la figura 1 se muestra el esquema de funcionamiento de una bomba de calor.

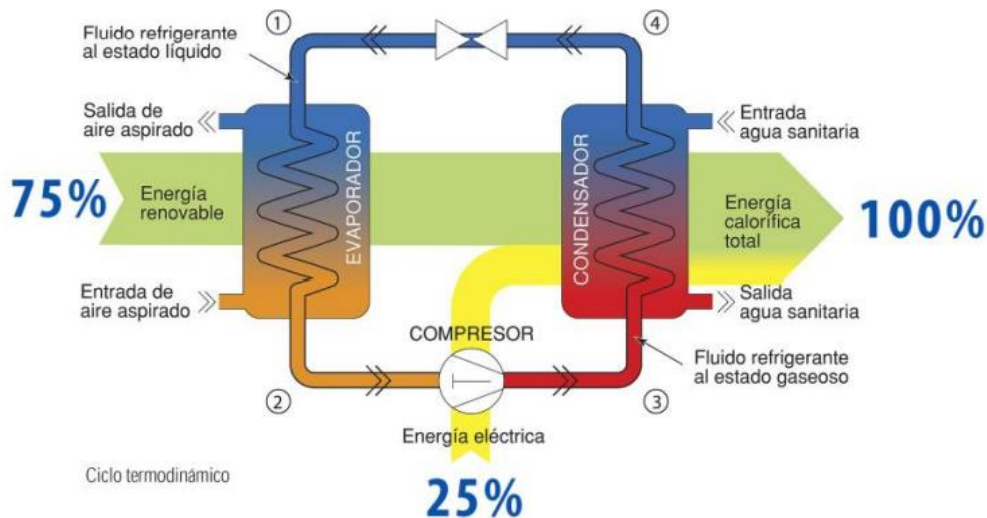


Figura 1. Esquema Funcionamiento bomba de calor. (Fuente: Manual CEV, modulo 4 – equipos transformadores de energía.)

A partir del modo de funcionamiento en el que opera la bomba de calor, el sistema actuará como unidad interior o exterior (el evaporador y el condensador), será diferente, lo cual se resume en la tabla número 1.

Tabla 1. Funcionamiento bomba de calor. (Fuente: elaboración propia)

Modo funcionamiento	Unidad exterior	Unidad interior
Modo calefacción	Evaporador	Condensador
Modo refrigeración	Condensador	Evaporador

Hay que destacar que, durante este proceso, tiene lugar un intercambio de energía (en forma de calor), pero que no existe intercambio del fluido de trabajo entre las unidades (interior y exterior), lo que se denomina un ciclo termodinámico cerrado.

2.3 Tipologías de bombas de calor

Existen diversos criterios de clasificación de las bombas de calor, donde se consideran distintos aspectos, como el medio de intercambio de calor, su construcción, entre otros. En los siguientes apartados, se abordarán brevemente algunas de las clasificaciones más relevantes.

2.3.1 Según el medio que intercambia calor con el exterior y el medio que absorbe calor

Las bombas de calor se clasifican considerando el fluido caloportador, según AFEC (Asociación de Fabricantes de Equipos de Climatización). Por lo tanto, podemos encontrar sistemas tanto de aire, como sistemas de agua.

Sistemas de aire: El medio al cual se transfiere el calor de la máquina térmica es el aire, y el intercambio de calor con el exterior puede realizarse mediante aire o agua. De esta manera podemos encontrar dos clases de sistemas de aire: aire/aire, agua/aire. Las bombas de calor aire/aire son ampliamente utilizadas, comparativamente con cualquier otra tipología de bomba de calor, el porcentaje de instalación de estas es mucho mayor (son las más utilizadas en climatización de viviendas). Existe la posibilidad de generar calefacción o aire acondicionado, de tal forma que el sistema puede aportar aire caliente o frío según sea la necesidad del usuario.

Sistemas de agua: La climatización se lleva a cabo mediante un fluido caloportador intermedio (agua caliente o fría). En este caso se diferencia entre dos clases de sistemas de agua: aire/agua o agua/agua (o también salmuera/agua, en caso de que el agua presente una cierta concentración de sal disuelta). En modo calefacción el agua alcanza una temperatura de entre 30 y 65°C, mientras que en refrigeración el rango se localiza entre 7 y 20°C. El intercambio de calor se produce en las unidades terminales, tales como ventilo convectores o fancoils, radiadores de alta o baja temperatura, suelo radiante, etcétera; a los cuales llega el agua mediante un sistema de tuberías.

2.3.2 Según proceso llevado a cabo

De acuerdo con el modo de accionamiento de la bomba de calor se diferencia entre variados tipos de máquina térmica:

Bomba de calor con compresor impulsado mecánicamente: La impulsión se lleva a cabo con un compresor accionado por un motor de tipo eléctrico (bombas con motor eléctrico), o por un motor de combustión de gas (bombas de motor de gas).

Bomba de calor de accionamiento térmico: También llamada bomba de calor por absorción. Mediante temperaturas elevadas se produce el calor que impulsará el ciclo.

Bombas de calor electrotérmicas: Funcionan mediante el efecto Peltier, el cual se basa el calentamiento y enfriamiento de dos metales soldados (uno se calienta y otro se enfría) por medio de la aplicación de una corriente eléctrica.

2.3.3 Según su construcción

Los equipos utilizados para la bomba de calor pueden ser del tipo compacto o dividido:

Sistema compacto: Dentro de una misma carcasa se encuentran todos los elementos constituyentes de la bomba de calor.

Split: El sistema se encuentra subdividido en dos partes, uno exterior y otro interior.

Multi-Split: Una única unidad exterior instalada y múltiples unidades interiores.

VRF (Variable Refrigerant Flow): Es una tecnología HVAC. Existe un número variable de unidades interiores de expansión directa conectadas a una o varias unidades exteriores. Este sistema es resultado de la evolución de los sistemas MultiSplit. Diferenciándolo de la bomba de calor convencional, tiene la capacidad de variar el caudal de refrigerante aportado. De esta manera se alcanza un control más preciso de las condiciones de temperatura. También llamados VRV (volumen de refrigerante variable), aunque este término no es tan preciso ya que el control se realiza sobre el flujo de refrigerante; esto es, el caudal, no el volumen. El funcionamiento de este tipo de sistemas se basa en la incorporación de un sistema de variación de frecuencia en el motor del compresor. De esta manera el compresor trabajará a mayor o menor potencia de acuerdo con las necesidades del local. A bajas potencias de trabajo del compresor el caudal de refrigerante suministrado será más bajo. Este sistema de control frecuencial disminuye el desgaste del compresor, ya que el número de paros y puestas en funcionamiento será menor con respecto al sistema convencional.

2.3.4 Según su funcionamiento

Reversibles: Pueden funcionar tanto para calefacción como para refrigeración, según las necesidades. En la actualidad representan la gran mayoría de bombas de calor instaladas.

No reversibles: Tienen un único modo de funcionamiento, calefacción.

Termofrigobombas: Producción simultánea de frío y calor.

2.4 Calificación energética de viviendas (CEV)

La Calificación Energética de Viviendas en Chile (CEV) es un instrumento que fue creado en el año 2012 por el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (Minvu) y el Ministerio de Energía, con el objetivo de contribuir a mejorar la calidad de vida de las familias, a través de la entrega de información precisa y estandarizada

Esta herramienta proporciona información a las familias acerca de la eficiencia energética de sus hogares, lo que les permite tomar decisiones informadas acerca de comprar una vivienda y así elegir la que tenga un mayor confort térmico o que utilice equipos eficientes o alternativas con energías no convencionales, lo que puede traducirse en un mayor ahorro en calefacción, refrigeración, iluminación y agua caliente.

La Calificación Energética de Viviendas (CEV), es un instrumento de uso voluntario y prontamente en 2024 será de uso obligatorio, el cual califica la eficiencia energética de una vivienda en su etapa de uso (un sistema similar al usado para etiquetar energéticamente refrigeradores y automóviles), que considera requerimientos de calefacción, enfriamiento, iluminación, agua caliente sanitaria y uso de energías renovables.

Las casas calificadas tienen una etiqueta con colores, porcentajes y letras (ver Figura 2), que van desde la A+ hasta la G, la última de ellas es la menos eficiente, mientras que la letra E representa el estándar actual de construcción, estipulado en el artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).

	Ahorro Energético	
	≤	>
Más eficiente		
A+	100%	85%
A	85%	70%
B	70%	55%
C	55%	40%
D	40%	20%
E	20%	-10%
F	-10%	-35%
G	-35%	-
Menos eficiente		

Figura 2. Escala CEV. (Fuente: manual CEV – 2019)

2.5 Selección norma base de trabajo

Una gran cantidad, de normas y sus estándares para medir la capacidad y eficiencia de las bombas de calor, lo hacen en referencia al estándar internacional ISO 5151. Sin embargo, no todas están basadas en la ISO 5151, existiendo así algunas diferencias entre los métodos de medición. Los países pertenecientes a Norte América siguen los estándares establecidos por la Sociedad Americana de Ingenieros para Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE por sus siglas en inglés), por lo que países como México, Costa Rica y algunos otros de América del Sur no se rigen por el ISO 5151.

El coeficiente de eficiencia energética (EER por sus siglas en inglés) y el coeficiente de eficiencia energética estacional (SEER) son los dos principales criterios que se utilizan internacionalmente para evaluar la eficiencia energética de las bombas de calor. Mientras que el EER mide la eficiencia energética del equipo a carga completa, es decir, la mide en un punto específico a la máxima capacidad de enfriamiento. El SEER se obtiene según una ponderación de eficiencias a carga parcial, esto se realiza mediante la variación de la temperatura exterior en el ensayo y por ende la variación de la carga (capacidad) de enfriamiento. El SEER fue propuesto como un índice de eficiencia representativo, ya que los equipos en la práctica se utilizan en diferentes condiciones ambientales y no en una fija. Además, la tecnología Inverter, permite variar las frecuencias de trabajo del compresor, y como consecuencia la potencia del equipo, por lo tanto, estos equipos operarán a carga parcial y completa.

Existen dos métodos para medir la eficiencia energética: el método del calorímetro y el método de la entalpía del aire. La norma ISO 5151 detalla ambos métodos. La diferencia entre ambos radica en la precisión de los resultados, la duración del ensayo y el costo de inversión que debe realizar el laboratorio.

Tabla 2. Normas nacionales y normas de referencia, métricas usadas, para diferentes países para los ensayos de eficiencia energética para aires acondicionados (Fuente: CLASP, Improving Global Comparability).

ECONOMY	NATIONAL TESTING STANDARD	REFERENCE TEST STANDARD	METRIC USED
AUSTRALIA	AS/NZS: 3823-2013	ISO 5151	AEER*
CHINA	Fixed speed: GB/T 7725-2004 Variable speed: GB/T 7725-2004, GBT 17758-2010	ISO 5151	EER for fixed speed SEER** for variable speed
EU	EN 14825	ISO 5151	EU SEER
INDIA	Fixed speed: IS 1391-1992 with all amendments Variable speed: 16358-1:2013	ISO 5151	EER*** for fixed speed Indian SEER for variable speed
JAPAN	JIS B 8616:2015 for commercial ACs JIS C 9612: 2013 for Room ACs	ISO 5151, ISO 16358*****	APF****
REPUBLIC OF KOREA	KS C 9306:2011	ISO 5151, ISO 16358*****	CSPF
US	10 CFR 430, Subpart B, Appendix F	Consistent with ASHRAE Standard 16/69	US SEER
VIET NAM	TCVN 7830:2015	ISO 5151, ISO 16358*****	CSPF

En la tabla 2, se puede observar que Europa tiene su norma EN 14825, la cual está basada en la norma internacional ISO 5151.

Se decide analizar esta norma para la realización de este trabajo, dado que el Ministerio de Energía de Chile se basa en estándares europeos para definir e implementar la normativa nacional sobre normas y protocolos de ensayo.

La norma europea EN 14825 de 2016 establece las condiciones para los ensayos a carga parcial en el modo de refrigeración y calefacción, los cuales se detallarán más adelante.

Para desarrollar una propuesta de modificación y/o actualización sobre la CEV, se deben considerar las normas actuales que rigen los protocolos de ensayo de eficiencia y que dictaminan la definición de la etiqueta energética nacional, estas son, la norma NCh2685.Of2007 y NCh3081.Of2007. Estas normas nacionales se compararán con la norma europea seleccionada, la norma EN14825-2016 de ensayo a carga parcial y la etiqueta energética de la comunidad europea.

La razón por la cual se decide trabajar con una norma perteneciente al marco regulatorio europeo y no de Estados Unidos, China o India, por ejemplo, es porque la norma europea EN 14825 del año 2016, fue facilitada por el docente antes mencionado en los agradecimientos, lo que favoreció en gran medida el acceso a ella, a diferencia de las otras, cabe destacar que las principales marcas certifican sus modelos en el continente europeo y además está basada en la norma internacional ISO 5151 como se comentó anteriormente, al igual que las normas actuales chilenas.

CAPÍTULO 3: Conceptos

En este capítulo se abordan los principales términos y conceptos relevantes para el cálculo de la eficiencia de las bombas de calor. Para una explicación adecuada se diferenciará entre dos tipologías de valores, los puntuales y los estacionarios. Los primeros hacen referencia a valores instantáneos, mientras que los segundos consideran la variación de las condiciones de cálculo en el tiempo.

3.1 Valores puntuales

3.1.1 COP (Coefficient of performance)

Uno de los parámetros de mayor relevancia, en lo que respecta a la eficiencia de las bombas de calor, es el COP, el coeficiente de eficiencia energética en modo calefacción, que se define como el cociente entre la potencia de calefacción (Q) y la potencia eléctrica absorbida a carga nominal y en unas condiciones de temperatura específicas según el tipo de bomba (W).

$$COP = \frac{Q}{W} \quad (1)$$

Para el caso de bombas de calor, el COP ideal está definido por el ciclo de Carnot, respondiendo a la expresión:

$$COP_{ideal} = \frac{T_c}{T_c - T_f} \quad (2)$$

Donde se observa que el COP ideal es determinado mediante las temperaturas de los focos, de forma que T_c representa la temperatura del foco caliente (la de cesión de calor) y T_f la del foco frío (el que absorbe calor).

Hay que destacar que el COP es mucho más alto debido a que no considera en su cálculo las irreversibilidades ni el fluido de trabajo.

3.1.2 EER (Energy Efficiency Ratio)

El factor de eficiencia energética en modo refrigeración se define como el cociente entre la potencia de refrigeración (Q) y la potencia eléctrica absorbida con la unidad a carga nominal (W) y unas condiciones de temperatura específicas según el tipo de bomba.

$$EER = \frac{Q}{W} \quad (3)$$

Ambos parámetros comentados anteriormente, el COP y el EER, son entregados por el fabricante en condiciones de plena carga nominal, esto es, cuando la máquina suministra el 100% de la potencia disponible.

Pero existen muchas situaciones en las que esto no ocurre, ya que hoy es muy común que los equipos regulen el régimen de giro del compresor con el fin de adaptarse a la demanda del usuario. Por esta razón, los dos coeficientes mencionados están siendo sustituidos por otros dos, el SCOP y el SEER, que sí consideran estas variaciones de carga.

3.2 Valores estacionales

3.2.1 Coeficiente de rendimiento estacional neto (SCOPnet), según norma UNE 14825.

La norma UNE 14825 señala los métodos de cálculo del coeficiente de rendimiento estacional SCOP, SCOPon y SCOPnet. En sus apartados define el SCOPnet como la eficiencia energética estacional de una unidad en modo activo de calefacción sin calefactores eléctricos suplementarios. La propia norma indica las condiciones obligatorias de determinación de dicho parámetro.

$$SCOP_{net} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot (Ph(T_j) - elbu(T_j))}{\sum_{j=1}^n h_j \cdot \left(\frac{Ph(T_j) - elbu(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} \right)} \quad (3)$$

Donde:

T_j es la temperatura del periodo.

j es el número del periodo.

n es la cantidad de periodos.

$Ph(T_j)$ es la demanda de calefacción del edificio para la temperatura T_j correspondiente, expresada en kW.

h_j es el número de horas del periodo que suceden a temperatura T_j correspondiente.

$COP_{bin}(T_j)$ son los valores COP de la unidad para la temperatura T_j correspondiente.

$elbu(T_j)$ es la potencia requerida de un calefactor eléctrico de reserva para la temperatura T_j correspondiente, expresada en kW.

En cuanto a la demanda de calefacción $Ph(T_j)$, se obtiene a partir del producto del valor a carga completa ($P_{designh}$) y el factor de carga parcial para cada periodo. Este factor presenta un valor que es directamente dependiente del clima, lo cual se observa en la Tabla 3.

Tabla 3. Factor de carga parcial según clima. (Fuente: Norma UNE EN 14825-2016.)

Clima	Factor de carga parcial (%)
Medio	$(T_j - 16)/(-10 - 16)$
Más cálido	$(T_j - 16)/(2 - 16)$
Más frío	$(T_j - 16)/(-22 - 16)$

Para obtener los valores de $COP_{bin}(T_j)$ y de potencia de cada periodo se ha de realizar una interpolación entre los valores de $COP_{bin}(T_j)$ para la condiciones de carga parcial A, B, C, D, E, F y G según sea necesario (interpolación entre los valores más próximos para cada caso). En el caso de que las condiciones del periodo sean superiores a D se debe realizar una extrapolación con las condiciones de C y D.

3.2.2 Coeficiente de rendimiento estacional en modo activo (SCOP_{on}), según norma UNE 14825.

A partir de la norma, se define el método de cálculo del coeficiente de rendimiento medio estacional en modo activo para la estación de calefacción designada, en base al coeficiente de rendimiento a carga parcial, el coeficiente de potencia calorífica del dispositivo de calefacción eléctrica de reserva (cuando sea necesario) y de los coeficientes de rendimiento específicos del periodo ($COP_{bin}(T_j)$). Todo esto ponderado por medio de las horas por periodo en las condiciones de dicho periodo.

$$SCOP_{on} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot Ph(T_j)}{\sum_{j=1}^n h_j \cdot \left(\frac{Ph(T_j) - elbu(T_j)}{COP_{bin}(T_j)} + elbu(T_j) \right)} \quad (4)$$

Donde todos los parámetros utilizados han sido definidos previamente para el cálculo del SCOP_{net}, en el apartado 3.2.2.

3.2.3 SCOP (Seasonal Coefficient Of Performance)

El Coeficiente de rendimiento estacional (SCOP), según norma, se define teóricamente, como la relación entre la demanda de calefacción y el consumo de electricidad, en modo calefacción, con periodo anual.

De lo anterior deriva la expresión de cálculo:

$$SCOP = \frac{Q_H}{Q_{HE}} = \frac{P_{desingnh} \cdot H_{HE}}{\frac{P_{desingnh} \cdot H_{HE}}{SCOP_{on}} + H_{TO} \cdot P_{TO} + H_{SB} \cdot P_{SB} + H_{CK} \cdot P_{CK} + H_{OFF} \cdot P_{OFF}} \quad (5)$$

Donde:

Q_H es la demanda de calefacción anual de referencia (kWh).

Q_{HE} es el consumo eléctrico anual (kWh).

$P_{desingnh}$ representa la carga completa de calefacción.

$H_{TO}, H_{SB}, H_{CK}, H_{OFF}$ son el número de horas considerado durante los cuales la unidad trabaja en modo desactivado del termostato (TO), modo de espera (SB), modo de dispositivo de calentamiento del cárter (CK) y modo desactivado (OFF).

$P_{TO}, P_{SB}, P_{CK}, P_{OFF}$ es el consumo eléctrico durante los modos antes mencionados, expresado en kW.

Se debe diferenciar el COP y el SCOP. El primer término se refiere a un cociente de potencias, y por tanto el valor del rendimiento es del tipo instantáneo, independiente del tiempo. En este caso se asume que la bomba de calor esta siempre aportando el 100% de su capacidad. No obstante, con el desarrollo de la tecnología de tipo Inverter, que permite la regulación del consumo, este parámetro de COP no define correctamente el comportamiento de la máquina, ya que considera el trabajo siempre a plena carga cuando en realidad la máquina trabajará a distintas cargas parciales.

Por otro lado, el SCOP, tal como su nombre indica, es estacional, obteniéndose a partir del consumo energético de la bomba funcionando a distintas condiciones de carga. De esta manera, con la tecnología actual de bomba de calor, el parámetro del SCOP es capaz de definir con mayor exactitud el comportamiento de las bombas de calor.

3.2.4 Factor de eficiencia energética estacional en modo activo de refrigeración (SEERon), según norma 14825.

Este parámetro, se define mediante el factor de eficiencia energética a carga parcial específico del periodo (ERRbin(Tj)) y ponderado con la ayuda de las horas por periodo en las condiciones del periodo.

$$SEER_{on} = \frac{\sum_{j=1}^n h_j \cdot Pc(T_j)}{\sum_{j=1}^n h_j \cdot \left(\frac{Pc(T_j)}{EER_{bin}(T_j)} \right)} \quad (6)$$

Los valores de j , T_j y h_j son determinados en el anexo de la norma UNE. $P_c(T_j)$, corresponde a la demanda de refrigeración, la cual es posible determinar, multiplicando el valor de carga completa ($P_{desingnc}$) por el factor de carga parcial correspondiente. De aquí se desprende la ecuación 7.

$$\text{factor de carga parcial \%} = \frac{(T_j - 16)}{(35 - 16)} \quad (7)$$

3.2.5 SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio)

Este factor de eficiencia energética estacional es definido por norma como el factor de eficiencia energética global de la unidad. Este factor representa toda la temporada de uso en modo refrigeración, y es posible calcularlo como la demanda anual de refrigeración de referencia dividida por el consumo anual de electricidad para refrigeración.

La UNE 14825 propone la siguiente expresión para su cálculo:

$$SEER = \frac{Q_C}{Q_{CE}} = \frac{P_{desingnc} \cdot H_{CE}}{\frac{Q_C}{SEER_{on}} + H_{TO} \cdot P_{TO} + H_{SB} \cdot P_{SB} + H_{CK} \cdot P_{CK} + H_{OFF} \cdot P_{OFF}} \quad (8)$$

Donde:

Q_C representa la demanda anual de refrigeración de referencia (kWh).

Q_{CE} se refiere al consumo eléctrico anual de referencia (kWh).


Los otros términos de la expresión ya han sido explicados en apartados anteriores (Modos para el número de horas y el consumo eléctrico).

De igual forma como ocurre en caso del COP y el SCOP, la diferencia más notable entre el EER y el SEER, es el carácter instantáneo del primer término, frente al temporal del segundo.

La tecnología actual de las bombas de calor, permiten el trabajo de estas en distintas condiciones de carga, y no tan solo a plena carga, el parámetro puede definir de forma más adecuada la ratio de eficiencia es aquel que tiene en cuenta dichas variaciones de carga, esto es, el SEER.

3.3 Clasificación energética

La directiva europea desde 2013, establece unos parámetros de clasificación energética de los equipos de climatización de hasta 12 kW. Se trata de un modelo más estricto de clasificación, que utiliza como valores de partida los resultados del SCOP y SEER (que fueron explicados en detalle en los apartados 3.2.3 y 3.2.5. De este modo en la figura 3 podemos observar la etiqueta de calificación, con sus diferentes rangos de eficiencia energética según su valor.



		SEER	SCOP
A+++	A+++	SEER \geq 8,50	SCOP \geq 5,10
A++	A++	6,10 \leq SEER < 8,50	4,60 \leq SCOP < 5,10
A+	A+	5,60 \leq SEER < 6,10	4,00 \leq SCOP < 4,60
A	A	5,10 \leq SEER < 5,60	3,40 \leq SCOP < 4,00
B	B	4,60 \leq SEER < 5,10	3,10 \leq SCOP < 3,40
C	C	4,10 \leq SEER < 4,60	2,80 \leq SCOP < 3,10
D	D	3,60 \leq SEER < 4,10	2,50 \leq SCOP < 2,80
E	E	3,10 \leq SEER < 3,60	2,20 \leq SCOP < 2,50
F	F	2,60 \leq SEER < 3,10	1,90 \leq SCOP < 2,20
G	G	SEER < 2,60	SCOP < 1,90

Figura 3. Etiqueta de calificación energética. (Fuente: Norma UNE 14825 – 2016)

Como ya se mencionó anteriormente se va a tomar como referencia a Europa. El etiquetado energético en Europa comenzó en el año 1994, en el año 2003 se agregan las clases “A+” y “A++”. En el año 2011 se presenta una nueva etiqueta y se agrega la clase “A+++”. (Fuente: MEPS Marcelo Padilla Ministerio de Energía de Chile, 2016).

Los fabricantes deben incluir en las fichas técnicas de sus bombas de calor la etiqueta energética correspondiente, de esta forma el usuario es informado de manera simple de la eficiencia de la máquina.

En esta clasificación de los coeficientes energéticos se tienen en consideración diversos aspectos, tales como el consumo de acuerdo con las tres zonas climáticas en la Unión Europea para la modalidad de calefacción (zona cálida, media y fría), el hecho de que el sistema pueda funcionar a carga parcial, así como el consumo cuando el sistema está desactivado.

Por ejemplo: Un equipo visto recientemente etiquetado con un EER de 2,3 (clase energética C), que con el nuevo etiquetado se rotula con un SEER de 5,73 y por lo tanto es clase A+. Se ve que esta máquina tenía una mala eficiencia al 100% de carga, pero buenos valores de rendimiento con cargar parciales, por lo tanto, aunque antes era considerada como energéticamente “mala”, realmente no lo es tanto ya que dándole un uso normal el consumo es mucho mejor de lo que parece.

Capítulo 4: Contexto Normativo

El presente trabajo busca crear una herramienta para calcular rendimientos estacionales de máquinas terminas, para aproximarse a lo solicitado por la Calificación Energética de Viviendas (CEV), a través de un estudio particular de la norma europea UNE 14825-2016 antes seleccionada, no obstante, en la actualidad existe una cierta diversidad de normativa dentro de la temática referente a las bombas de calor. Se ha considerado necesario añadir en este proyecto un apartado en el que se comente brevemente dicha normativa, ya que afecta de forma directa al estudio.

4.1 Calculo en modo calefacción

Para el cálculo del SCOP, SCOPon y SCOPnet de referencia de una bomba de calor, la norma UNE 14825 menciona una serie de parámetros o características de dicha bomba, a partir de las cuales se determinan las condiciones y los valores de temperatura interior necesarios para el cálculo. Dichos parámetros fundamentales son tres: el clima, la temperatura y el tipo de unidad.

4.1.1 Zonas climáticas

Hay definidas previamente tres zonas climáticas para el modo calefacción de referencia: A (media), W (más cálida) y C (más fría). Con estas condiciones se determinarán los valores de la temperatura de diseño ($T_{designh}$) y se delimita un rango de valores para la temperatura bivalente ($T_{bivalente}$).

Para la temperatura bivalente (temperatura a partir de la cual la máquina térmica cubre el 100% de la demanda), se definirá de acuerdo con lo presentado en la Tabla 4, donde se muestra de forma resumida el valor de estas temperaturas en función de cada zona climática.

Tabla 4. temperaturas según la estación de referencia. (Fuente: UNE EN 14825-2016)

Clima	$T_{designh}$ exterior bulbo seco(°C)	$T_{designh}$ exterior bulbo húmedo(°C)	$T_{designh}$ interior (°C)	$T_{bivalente}$ (°C)
A	-10	-11	20	$2 \text{ o } <$
W	2	1	20	$7 \text{ o } <$
C	-22	-23	20	$-7 \text{ o } <$

Para el caso climático de Chile, se selecciona la condición climática “W” (clima cálido). Como se observa en la tabla 4, se define a partir de una temperatura exterior de 2°C. Para las condiciones de “A” y “C”, se definen -10°C y -22°C de temperatura exterior respectivamente.

Por lo tanto, la condición de clima “W” (medio) es la que más se asemeja al clima de nuestro país (Chile) durante las épocas de otoño e invierno.

4.1.2 Tipo de unidad

Este criterio hace referencia a la tipología de bomba de calor utilizada, basado en el medio que intercambia calor con el exterior y el medio que absorbe calor. Así, existen distintas posibilidades:

Bomba de calor aire/aire.

Bomba de calor agua/aire.

Bomba de calor aire/agua.

Bomba de calor agua-salmuera/agua.

También hay que acotar que existen otras tecnologías, que utilizan una tipología particular de bomba de calor, tal como las geotérmicas, pero no son contempladas en nuestro estudio.

Las tipologías de bombas de calor constan de dos términos que conforman su nombre. El primero se refiere al medio a través del cual puede realizarse el intercambio de calor con el exterior. Por ejemplo, para el caso de una bomba de calor aire/agua, el intercambio de calor se realiza mediante aire. En el caso del segundo término se trata del medio al cual se transfiere el calor de la máquina térmica. Así, para el ejemplo anterior, dicho medio sería el agua.

4.2.3 Temperatura

Se definen una serie de temperaturas de funcionamiento que también son importantes para el cálculo del SCOP de referencia. Estas temperaturas son: la estándar (20°C), baja (35°C), media (45°C), alta (55°C) o muy alta (65°C).

Según la tipología de trabajo existe un rango de temperaturas dentro de los cuales la máquina térmica puede operar. Así se desprende lo siguiente:

Las unidades de tipología aire/aire o agua/aire trabajan a temperatura estándar (20°C).

Las unidades de tipología aire/agua, agua/agua o salmuera/agua, pueden trabajar a temperatura baja (35°C), media (45°C), alta (55°C) o muy alta (65°C).

Ya con los tres parámetros fundamentales definidos para cada caso de estudio, queda por definir las condiciones de carga parcial necesarias para el cálculo del SCOP de referencia, el SCOPon de referencia y el SCOPnet de referencia.

La norma UNE-EN 14825 sugiere al usuario a utilizar las tablas de condiciones de carga parcial, que abarcan, según la combinación de estos tres parámetros principales, desde la tabla 6 hasta la tabla 35 de la misma. En estas tablas se definen los factores de carga parcial a partir de las condiciones de carga A, B, C, D, E (TOL), F (Tbivalente) y G (en algunos casos particulares). Donde TOL es la temperatura límite de funcionamiento (por debajo de la cual la máquina térmica no funciona), y Tbivalente corresponde a la temperatura a partir de la cual la máquina térmica cubre el 100% de la demanda (por debajo de ella es necesario el uso de un calefactor de reserva).

Hay que recalcar que la condición de carga G necesaria en el caso de que la TOL resulte inferior a -22°C para el clima C.

A modo de ejemplo, se presenta a continuación la Figura 4, correspondiente a las condiciones de clima W (más cálido), temperatura media e instalación del tipo aire-aire:

Condición	Factor de carga parcial en %				Intercambiador exterior	Intercambiador interior
	Fórmula	A	W	C	Temperatura interior de bulbo seco (húmedo) °C	Temperatura de bulbo seco del aire interior °C
A	$(-7 - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$	88	n/a	61	-7(-8)	20
B	$(+2 - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$	54	100	37	2(1)	20
C	$(+7 - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$	35	64	24	7(6)	20
D	$(+12 - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$	15	29	11	12(11)	20
E	$(TOL - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$				TOL	20
F	$(T_{\text{bivaleto}} - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$				T_{bivaleto}	20
G	$(-15 - 16) / (T_{\text{designh}} - 16)$	n/a	n/a	82	-15	20

Figura 4. Condiciones de carga parcial para el cálculo del SCOP de referencia, el SCOPon de referencia, el SCOPnet de referencia de unidades aire/aire para aplicaciones a temperatura media para la estación de calefacción de referencia W. (Fuente: UNE EN 14825-2016).

En la tabla anterior, se observan las condiciones de carga parcial, donde los valores de factor de carga parcial dependen de la temperatura de diseño, así como de las temperaturas de bulbo seco de entrada. Las condiciones de carga parcial E y F corresponden a las temperaturas límite de funcionamiento y bivalente respectivamente. En el caso de que la salida del intercambiador de calor interior sea variable, la temperatura para estas dos condiciones se debe calcular con interpolaciones.

Luego de definir la tabla de condiciones de carga parcial (en función de los tres parámetros antes comentados), la norma UNE, propone una nueva tabla, denomina Tabla E.1, en la cual se introducen los datos de temperatura exterior, temperatura interior y coeficiente de carga parcial, los cuales son obtenidos a partir de la tabla anterior. Además de estos valores se incluyen los de Carga parcial, Potencia declarada, COPd, Cc, CRu y COPbin(Tj), tal como se observa en la Figura 5.

	Intercambiador de calor exterior	Intercambiador de calor interior	Coeficiente de carga parcial (%)	Carga parcial (kW)	Potencia declarada (kW)	COP a la potencia declarada COPd	Cc	CRu ^a	COP a carga parcial (fórmula (12)) COPbin(Tj)
	Aire exterior °C	Temperatura del agua de salida para salida variable °C							
A	- 7	34	88%	10,14	9,55	3,26	0,9	1 ^b	3,26
B	2	29	54%	6,17	11,17	4,00	0,9	0,55	3,70
C	7	27	35%	3,97	12,66	4,91	0,9	0,31	4,03
D	12	24	15%	1,76	14,3	5,5	0,9	0,12	3,21
TOL	- 10	37	100%	11,46	7,8	2,6	0,9	1 ^b	2,6
TBivalent	- 6	33	85%	9,7	9,7	3,3	0,9	1	3,3

^a CRu = carga parcial dividida por la potencia declarada.
^b Cuando la potencia declarada es inferior a la carga parcial, el valor de CR se considera igual a 1 y entonces COPbin(Tj) igual a COPd.

Figura 5. Tabla E.1. Datos para el SCOP del ejemplo del Anexo E de la UNE-EN 14825-2016. (Fuente: UNE EN 14825-2016).

El valor de carga parcial resulta del producto del coeficiente de carga parcial por la potencia a temperatura de diseño. La potencia declarada y el COP a la potencia declarada son entregados por el fabricante, bien de forma directa o bien de forma indirecta (mediante tablas, de manera que es necesario realizar cálculos intermedios o interpolaciones para la obtención de los valores de potencia y COP para condiciones de referencia necesarias).

El termino Cc representa al coeficiente de degradación, que la norma define como la medida de la pérdida de eficiencia debido al ciclo para las unidades aire/agua o agua-salmuera/agua (para el caso de unidades aire/aire o agua-salmuera/aire este factor pasa a llamarse Cd). Este término es entregado por el fabricante, en caso contrario, se tomará de forma arbitraria, con valor de 0,9 (de 0,25 en el caso de Cd).

CRu, es definido como el factor de potencia, es decir, el cociente entre la carga parcial o carga completa de calefacción entre la potencia declarada de calefacción de la unidad a igualdad de condiciones de temperatura. Este valor resulta de gran importancia para el cálculo del COP a carga parcial, también llamado COPbin(Tj).

Se define el coeficiente de rendimiento específico del periodo o COPbin(Tj), para cada periodo j con temperatura exterior Tj en una estación. Pueden ocurrir dos situaciones, para las condiciones de carga parcial A, B, C, y D, estas son:

Que la potencia declarada de la unidad coincida con las demandas de calor requeridas o sea inferior a ellas. Para tal caso, se debe utilizar el valor de COPd correspondiente a la unidad.

Que la potencia declarada resulte superior a la demanda de calefacción requerida. En tal caso debe optarse por un método de cálculo del COPbin(Tj), el cual variará según el tipo de unidad y el control de potencia de la misma.

Para bombas de calor del tipo aire/aire, agua/aire o salmuera/aire de potencia fija el $COP_{bin}(T_j)$ se calcula utilizando la expresión:

$$COP_{bin}(T_j) = COP_d * (1 - Cd * (1 - CRu)) \quad (9)$$

En caso de que se desconozca el valor de Cd , se debe tomar un valor por defecto de 0,25.

Para casos de unidades con potencia variable, se sugiere determinar el valor de potencia declarada y $COP_{bin}(T_j)$ en la etapa más próxima a la unidad a la carga de calefacción solicitada. En el caso de que esta no etapa permita obtener el valor de carga de calefacción en una aproximación del 10% (por encima y por debajo), se determinarán los valores de potencia declarada y $COP_{bin}(T_j)$ para las cargas parciales a ambos lados de la carga de calefacción objeto de estudio. Con esto es posible obtener el valor de potencia y COP mediante una simple interpolación lineal entre ambos resultados.

Para unidades del tipo aire/agua, agua/agua o salmuera/agua y la potencia es fija el $COP_{bin}(T_j)$ se pueden calcular a partir de la ecuación propuesta:

$$COP_{bin}(T_j) = \frac{CRu}{Cc * CRu + (1 - Cc)} \quad (10)$$

Para este caso si desconoce el valor de Cd , se debe tomar un valor por defecto de 0,25.

Nota: Si la potencia de dichas unidades es variable se procede de forma análoga al caso anterior.

Una vez obtenida la totalidad de los valores de esta segunda tabla E.1, se propone la creación de otra, cuyo nombre será “Cálculo del periodo del SCOPon” o “Cálculo del periodo del SCOPnet” según el término que se desee determinar, en la cual se cargarán los valores de número de periodo, con su respectiva temperatura exterior de bulbo seco (valores a partir de la TOL), y número de horas por periodo correspondientes a la estación de referencia estudiada para cada caso.

De igual forma, se obtiene para cada temperatura la carga de calefacción correspondiente:

Si la temperatura es una de las temperaturas A, B, C, D, E, F o G se introduce el valor obtenido en la Tabla E.1

Si la temperatura es otra, se calculará de la siguiente forma:

$$\frac{(T_j - 16)}{(T_{designh} - 16)} * P \text{ a } T_{designh} \quad (11)$$

La siguiente columna será la de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor. Este valor se obtiene de la siguiente manera:

Para las estaciones de calefacción A, B, C, D, E (TOL), F (Tbiv) y G (en algunos casos), será el valor de potencia declarada en el caso de que este sea inferior o igual al valor de carga de calefacción. En el caso de que sea superior, se tomará el valor de la carga de calefacción.

Para las otras temperaturas, el valor de la carga de calefacción provista por la bomba de calor será la interpolación entre las temperaturas superior e inferior correspondientes a las estaciones A, B, C, D, E (TOL) y F (Tbiv). Esto es, si la potencia buscada se corresponde con una temperatura que se encuentra en el intervalo entre A y B, la potencia resultante será la interpolación entre ambas. Si, por el contrario, la temperatura bivalente se encuentra en el intervalo entre A y B y resulta superior a T_j , la interpolación se calculará con los valores de A y Tbivalente. Si la temperatura es superior a la estación de calefacción D se ha de realizar una extrapolación entre las dos temperaturas inferiores a ella más próximas.

El siguiente parámetro a determinar es el de potencia del calefactor eléctrico de reserva ($elbu(T_j)$), que resulta de la resta entre la carga de calefacción y la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor. Este valor pone en evidencia el hecho de que la bomba de calor puede en algún caso no ser suficiente para cubrir la demanda, haciéndose necesario el uso de un sistema adicional de aporte de calor.

Adicionalmente a estos parámetros se incluyen otros que cambiarán en función de si el objetivo de cálculo es el SCOPon de referencia o el SCOPnet de referencia. A continuación, se expone individualmente el proceso para la obtención de estos dos parámetros.

4.2.4 Cálculo SCOPon de referencia

Anteriormente en el Capítulo 3, se ha definido el parámetro SCOPon, así como su fórmula matemática (Ecuación 4).

Es esta ecuación la que determina los parámetros y valores de las distintas columnas que constituyen la tabla de cálculo del SCOPon. El siguiente término por determinar es el de la resistencia al calor anual, que resulta del producto de las horas de trabajo por la potencia del calefactor eléctrico de reserva.

Posteriormente, se obtiene el $COP_{bin}(T_j)$, que previamente se ha definido para las estaciones de calefacción A, B, C, D, G (según sea el caso), E(TOL) y F(Tbiv). Para las temperaturas T_j no correspondientes a una estación de calefacción, el cálculo del $COP_{bin}(T_j)$ es análogo al de la carga de calefacción cubierta por la bomba de calor, resultando de la interpolación entre las temperaturas superior e inferior que resulten para cada caso.

A continuación, se obtiene la demanda de calefacción anual, resultante del producto de las horas de trabajo por la carga de calefacción. Finalmente, se calcula la aportación de energía anual incluyendo el calefactor eléctrico de reserva como:

$$\text{aporte de energía anual con calor resistivo} = h_j * \left[\frac{(Ph(T_j) - elbu(T_j))}{COPbin(T_j)} + elbu(T_j) \right] \quad (12)$$

Estos cálculos se pueden observar en la figura 5, la cual corresponde al extracto del ejemplo resuelto en la norma UNE, en el anexo F.

Periodo	Temperatura exterior (bulbo seco)	Horas	Carga de calefacción	Carga de calefacción cubierta por la bomba de calor	Calefactor eléctrico de reserva	Resistencia al calor anual	COPbin(Tj)	Demanda de calefacción anual	Aportación de energía anual incluyendo calefactor eléctrico de reserva*	
j	Tj	hj	Ph(Tj)		elbu(Tj)	Hj × elbu(Tj)		hj × Ph(Tj)		
–	°C	h	kW	kW	kW	kWh		kWh	kWh	
F	21	– 10	11,46	7,80	3,66	4	2,60	11	7	
	22	– 9	11,02	8,38	2,64	66	2,82	276	140	
	23	– 8	10,58	8,97	1,62	37	3,04	243	105	
A	24	– 7	10,14	9,55	0,59	14,18	3,26	243	84	
E	25	– 6	9,70	9,70	0,00	0,00	3,30	262	79	
	26	– 5	9,26	9,26	0,00	0,00	3,35	630	188	
	27	– 4	8,82	8,82	0,00	0,00	3,40	802	236	
	28	– 3	8,38	8,38	0,00	0,00	3,45	746	216	
	29	– 2	7,94	7,94	0,00	0,00	3,50	1 310	374	
	30	– 1	7,50	7,49	0,00	0,00	3,55	1 297	365	
	31	0	7,05	7,05	0,00	0,00	3,60	1 693	470	
	32	1	6,61	6,61	0,00	0,00	3,65	1 852	507	
	B	33	2	6,17	6,17	0,00	0,00	3,70	1 975	534
		34	3	5,73	5,73	0,00	0,00	3,77	2 046	543
35		4	5,29	5,29	0,00	0,00	3,83	1 884	492	
36		5	4,85	4,85	0,00	0,00	3,90	1 470	377	

Figura 6. Extracto de la tabla F.2 Cálculo del periodo para el SCOPon del Anexo F de la norma UNE-EN 14825.

El valor del SCOPon resulta del cociente entre la suma para todas las temperaturas de la demanda de calefacción anual entre la aportación de energía anual incluyendo el calefactor eléctrico de reserva.

4.2.5 Cálculo SCOPnet de referencia

En el caso del SCOPnet, definido previamente en el capítulo de conceptos básicos, donde se expone la expresión de cálculo de este parámetro (Ecuación 3). Esta expresión constituye una base para el cálculo del proceso que se explicará a continuación.

El valor de COPbin(Tj) se obtiene mediante un procedimiento análogo al caso del SCOPon. Adicionalmente se obtiene el valor de demanda de calefacción anual neta como el producto de las horas de funcionamiento y la resta de la demanda de calefacción y la carga de calefacción cubierta por el calefactor eléctrico de reserva. Así, finalmente se obtiene la aportación de energía anual neta de acuerdo con la expresión:

$$\text{aporte de energía neta anual con calor resistivo} = h_j * \left[\frac{(Ph(T_j) - elbu(T_j))}{COPbin(T_j)} \right] \quad (13)$$

De igual forma que en el caso del SCOPon, se muestra la Figura 7, un ejemplo ilustrativo del proceso de cálculo del SCOPnet.

Periodo	Temperatura exterior (bulbo seco)	Horas	Demanda de calefacción	Carga de calefacción cubierta por la bomba de calor	Calor resistivo	COPbin(Tj)	Potencia de calefacción anual neta	Aportación de energía anual neta ^a	
J	Tj	hj	Ph(Tj)		elbu(Tj)		hj × (Ph(Tj) – elbu(Tj))		
–	°C	h	kW	kW	kW		kWh	kWh	
F	21	-10	1	11,46	7,80	3,66	2,60	8	3
	22	-9	25	11,02	8,38	2,64	2,82	210	74
	23	-8	23	10,58	8,97	1,62	3,04	206	68
A	24	-7	24	10,14	9,55	0,59	3,26	229	70
E	25	-6	27	9,70	9,70	0,00	3,30	262	79
	26	-5	68	9,26	9,26	0,00	3,35	630	188
	27	-4	91	8,82	8,82	0,00	3,40	802	236
	28	-3	89	8,38	8,38	0,00	3,45	746	216
	29	-2	165	7,94	7,94	0,00	3,50	1 310	374
	30	-1	173	7,50	7,49	0,00	3,55	1 297	365
	31	0	240	7,05	7,05	0,00	3,60	1 693	470
	32	1	280	6,61	6,61	0,00	3,65	1 852	507

Figura 7. Extracto de la tabla F.3 Cálculo del periodo para el SCOPon del Anexo F de la Norma UNE-EN 14825.

De esta manera, el SCOPnet se obtiene como el cociente de la suma, para todas las temperaturas, de la potencia de calefacción anual neta entre el aporte de energía actual neta.

Una vez estudiado el procedimiento de cálculo del SCOPon y SCOPnet de la norma, el siguiente paso a seguir es el de creación de la herramienta de Excel que permita la obtención de dichos valores para cualquier bomba de calor en el contexto de la calificación energética de viviendas, es decir bombas de calor del tipo aire-aire presente en el mercado nacional. Esta herramienta ha de realizar los cálculos mencionados, de acuerdo con la normativa, de manera automatizada, y contemplando las diversas posibilidades en lo referente a tecnologías de bomba de calor.

En capítulos anterior se ha definido el concepto de SCOP de referencia, así como la expresión de cálculo de este. De esta manera, una vez obtenido el valor del SCOPon, y en caso de disponer de los valores de potencia en modo desactivado (P_{OFF}), potencia de modo en espera (P_{SB}), potencia con termostato apagado (P_{TO}), potencia de dispositivo de calentamiento de cárter (P_{CK}), es posible calcular el valor de SCOP de referencia. El cálculo se realiza de acuerdo con la ecuación definida en el anteriormente, tomando los datos del número de horas para cada modo de la Tabla A.4 y A.6 de la norma base de trabajo (Tabla 5 y 6 de este informe). Se debe prestar especial atención al modo de uso

de la bomba de calor estudiada, esto es, sólo para calefacción o reversible (en caso de que permita ser empleada también en modo refrigeración), ya que los valores de horas presentados por la norma serán diferentes según el caso.

Tabla 5. Tabla A.4 "Número de horas utilizadas para el cálculo del SCOP". (Fuente: UNE 14825-2016)

	Solo calefacción			Reversible		
	A	W	C	A	W	C
Modo desactivado (H_{OFF})	3672 h	4345 h	2189 h	0 h	0 h	0 h
Termostato apagado (H_{TO})	179 h	755 h	131 h	179 h	755 h	131 h
En espera (H_{SB})	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h	0 h
Horas activas equivalentes para calefacción (H_{HE})	1400 h	1400 h	2100 h	1400 h	1400 h	2100 h

Tabla 6. Tabla A.6 "Número de horas en modo de dispositivo de calentamiento del cárter para la determinación del SCOP". (Fuente: UNE 14825-2016)

	Solo refrigeración			Reversible		
	A	W	C	A	W	C
Dispositivo de calentamiento de cárter (H_{CK})	3851 h	4476 h	2944 h	179 h	755 h	131 h

4.2 Cálculo en modo refrigeración

En el caso de que la bomba de calor funcione en modo de refrigeración, esto es, aportando frío al recinto a acondicionar, el rendimiento a calcular será el SEERon y el SEER, definidos previamente en los apartados anteriores. La norma UNE 14825 explica el procedimiento de cálculo de dichos parámetros, adjuntando en su Anexo E un ejemplo de cálculo de estos.

La forma de proceder para el cálculo en este caso presenta ciertas similitudes al caso del SCOP, si bien el proceso se simplifica significativamente. De esta manera, el primer parámetro a definir es el de temperatura de diseño de referencia en modo refrigeración ($T_{designc}$), expresado en grados Celsius. La norma específica este valor para unas condiciones de temperatura exterior de bulbo seco de 35°C y 27°C de temperatura interior de bulbo seco. Posteriormente, se han de calcular las condiciones de carga parcial A, B, C y D, que se obtienen a partir de los factores de carga parcial, haciendo uso del valor de la temperatura de diseño y de las temperaturas de 35°C para la condición A, 30°C para el caso de la condición B, 25°C para C y 20°C para la condición de carga D. Estos factores de carga serán iguales independientemente del tipo de unidad que presente la bomba de calor de estudio. En la tabla 7 se muestran los valores de factor de carga definidos, así como las temperaturas de bulbo seco de aire exterior para cada condición de carga parcial.

Tabla 7. Factores de carga parcial y temperatura de bulbo seco del aire exterior para el caso de modo refrigeración. (Fuente: UNE 14825-2016)

	Factor de carga parcial (absoluto)	Factor de carga parcial (%)	Temperatura de bulbo seco del aire exterior (°C)
A	$(35-16)/(T_{designc}-16)$	100	35
B	$(30-16)/(T_{designc}-16)$	74	30
C	$(25-16)/(T_{designc}-16)$	47	25
D	$(20-16)/(T_{designc}-16)$	21	20

4.3.1 Cálculo SEERon de referencia

En el apartado 3.2.4 se ha definido el SEERon, presentando la ecuación de cálculo de este. A continuación, se detallará el proceso de obtención de los parámetros necesarios en dicha ecuación.

La UNE 14825 presenta, mediante el uso de variadas tablas, las condiciones de carga parcial para distintas tipologías de bomba de calor. De esta manera, las Tablas 2 a 5 de la norma presentan las mencionadas condiciones de carga para unidades del tipo aire/aire, agua/aire y salmuera/aire, aire/agua y finalmente unidades agua/agua o salmuera/agua.

Con el objeto de calcular el SEERon y el SEER, habiendo definido la temperatura de diseño y las condiciones de carga parcial, el fabricante ha de definir el valor de carga completa o $P_{designc}$, así como los valores de potencia declarada (P_{dc}) y EER a dicha potencia (EER_d). Con el dato de la potencia de diseño y los factores de carga parcial, se obtienen los valores de carga parcial (multiplicando el factor de carga para cada caso por la carga completa). Con estos valores la norma UNE propone la creación de la Tabla E.1, la cual se muestra a continuación (Figura 8), a modo de ejemplo explicativo, que ha sido extraído del anexo E de la norma.

	Aire exterior °C	Coefficiente de carga parcial %	Carga parcial kW	Potencia declarada (Pdc) kW	EER a la potencia declarada (EERd)	Cd	CRu^a	EER a carga parcial (EERbin(Tj)) (Fórmula 6)
A	35	100	3,5	3,5	3	0,25	1	3
B	30	74	2,58	2,58	3,5	0,25	1	3,5
C	25	47	1,66	1,95	4	0,25	0,85	3,85
D	20	21	0,74	2,03	4,5	0,25	0,36	3,78

^a CRu = Carga parcial dividida por la potencia declarada.

Figura 8. Datos para el SEER. (Fuente norma UNE 14825).

En la Figura 8 adicionalmente a los valores de factor de carga, carga parcial, potencia declarada y EER, se muestran los valores del coeficiente de degradación (Cd), el factor de potencia (CRu) y el

EER a la carga parcial ($EER_{bin}(T_j)$). El coeficiente de degradación, que representa la pérdida de eficiencia del ciclo ha sido explicado anteriormente en este mismo apartado de metodología de cálculo para el caso del SCOP. El valor de este puede ser igual para modo calefacción y modo refrigeración o puede ser distinto. En este segundo caso, se diferencia un valor de otro denominando C_{dc} al coeficiente de degradación para refrigeración y C_{dh} para calefacción. El factor de potencia, al igual que para el caso del SCOP, se define como el cociente entre la carga parcial y la potencia declarada, en caso de que este valor sea inferior a la unidad. En caso contrario, se toma el valor de la unidad.

El último parámetro presente en la figura anterior es el EER a carga parcial o $EER_{bin}(T_j)$. Para el caso de la condición de carga parcial A, esto es, la situación de carga completa, la carga y la potencia declarada presentan el mismo valor. Por tanto, el $EER_{bin}(T_j)$ será el valor de EER declarado por el fabricante. Para el caso de las condiciones de carga parcial B, C y D la situación es diferente. En la norma se señalan dos posibilidades, que la potencia declarada de la unidad coincida con las cargas de refrigeración requeridas o que la potencia declarada sea superior a dichas cargas. En el primer caso se ha de utilizar un valor de $EER_{bin}(T_j)$ idéntico al declarado, mientras que en el segundo caso, en el cual la unidad ha de efectuar un ciclo de encendido-apagado, ha de hacerse servir el valor del factor de degradación y del factor de potencia para obtener el $EER_{bin}(T_j)$.

En la norma se presentan diferentes métodos de cálculo del $EER_{bin}(T_j)$, diferenciando entre la tipología de bomba de calor empleada y el modo de funcionamiento de la misma (a capacidad fija o variable). A continuación se muestran las distintas posibilidades de forma breve, pues son análogas al caso del $COP_{bin}(T_j)$ y por tanto ya se han explicado.

En primer lugar, para el caso de bombas del tipo aire/aire y agua/aire de capacidad fija, el EER para las condiciones B, C y D, se calcula de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$EER_{bin}(T_j) = EER_d * (1 - C_d * (1 - CR_u)) \quad (14)$$

Donde el factor de degradación y de potencia ya han sido definidos.

Para el caso de que las unidades sean aire/agua, agua/agua o salmuera/agua y del tipo potencia fija, la ecuación tomara la forma:

$$EER_{bin}(T_j) = \frac{CR_u}{C_c * CR_u + (1 - C_c)} \quad (15)$$

Nótese que para este segundo caso el coeficiente de degradación es C_c , con un valor predeterminado (en caso de que no sea proporcionado por el fabricante), de 0,9, mientras que en el caso anterior recibía la denominación C_d , al que le corresponde un valor por defecto de 0,25.

Una vez definido este extracto de tabla de la figura 8, se ha de cargar los valores de periodo, temperatura exterior y horas extraídas de la norma. Para el caso del modo refrigeración trabajaremos siempre con los mismos valores de periodo y horas, mientras que en el caso del SCOP, como se ha comentado previamente, existía una cierta variación según el clima “A”, “W” o “C” con el cual se estuviese trabajando. Este hecho simplifica el proceso para el caso del modo de refrigeración.

Con estos datos se genera la Tabla E.2 de la norma, un extracto de la cual se muestra a continuación en la Figura 9:

Periodo	Temperatura exterior	Horas	Carga de refrigeración	EERPL	Demanda de anual de refrigeración	Aportación de energía anual
j	Tj °C	hj h	Pc(Tj) kW		hj × Pc(Tj) kWh	hj × (Pc(Tj)/ EER(Tj)) kWh
1	17	205	0,18	3,78	38	10
2	18	227	0,37	3,78	84	22
3	19	225	0,55	3,78	124	33
D	4	20	0,74	3,78	166	44
5	21	216	0,92	3,79	199	52
6	22	215	1,11	3,81	238	62
7	23	218	1,29	3,82	281	74
8	24	197	1,47	3,84	290	76
C	9	25	1,66	3,85	295	77
10	26	158	1,84	3,78	291	77
11	27	137	2,03	3,71	278	75
12	28	109	2,21	3,64	241	66
13	29	88	2,39	3,57	211	59
B	14	30	2,58	3,5	162	46
15	31	39	2,76	3,40	108	32

Figura 9. Extracto de la Tabla E.2. "Cálculo del periodo para el SEERon". (Fuente: UNE 14825)

Para cada periodo se obtienen los valores de carga de calefacción o $P_c(T_j)$, haciendo uso de los factores de carga parcial definidos en la Figura 8, pero para cada valor de temperatura. Seguidamente se obtienen los valores de EERPL, que para el caso de las condiciones de carga parcial A, B, C, D son los resultados de $EER_{bin}(T_j)$, mientras que para los demás se han de calcular como una interpolación entre las temperaturas de las condiciones A, B, C y D según el intervalo en el que se encuentren. Esto es, por ejemplo, para una temperatura de 22°C que se encuentra entre las condiciones C y D el valor del EERPL resultará de la interpolación con ambas condiciones. Para el caso de temperaturas inferiores a la temperatura D (20°C), se tomará el valor de EER de esta. Mientras que para el caso de temperaturas superiores a A (35°C), el EER será el correspondiente a dicha condición de carga.

Una vez obtenidos los valores de carga de refrigeración y EER para cada periodo se obtienen la demanda anual de refrigeración (el producto de la carga de refrigeración por las horas correspondientes a cada periodo) y la aportación de energía anual (el cociente entre la demanda anual de refrigeración y el EER). Finalmente se calcula el SEERon mediante el cociente de la suma de demanda anual de refrigeración de todos los periodos dividido entre la suma la aportación de energía anual para todos los periodos.

4.3.2 Cálculo SEER de referencia

En el Capítulo 3, “Conceptos básicos” se ha definido el concepto de SEER de referencia, así como la expresión de cálculo de este. De esta manera, una vez obtenido el valor del SEERon, y en caso de disponer de los valores de potencia en modo desactivado (P_{OFF}), potencia de modo en espera (P_{SB}), potencia con termostato apagado (P_{TO}), potencia de dispositivo de calentamiento de cárter (P_{CK}), es posible calcular el valor de SEER de referencia. El cálculo se realiza de acuerdo con la ecuación definida en el apartado 3.2.5, tomando los datos del número de horas para cada modo de la tabla A.3 y A.5 de la norma UNE 14825-2016 (Tabla 8 y 9 de este trabajo). Se ha de prestar especial atención al modo de uso de la bomba de calor, esto es, sólo para refrigeración o reversible (en caso de que permita ser empleada también en modo calefacción), ya que los valores de horas presentados por la norma serán diferentes según el caso.

De igual forma que para el caso del cálculo del SCOPon y SCOPnet, la herramienta de Excel creada debe permitir el cálculo del SEER y SEERon para las distintas bombas de calor aire/aire, con posibilidad de trabajo en modo refrigeración.

Tabla 8. Tabla A.3 "Número de horas utilizadas para el cálculo del SEER". (Fuente: UNE 14825-2016)

		Solo refrigeración	Reversible
A	Horas totales por año	8760	8760
B	Modo desactivado (H_{OFF})	5088	0
C	Diferencia (A-B) = Horas para la estación de refrigeración de referencia	3672	3672
D	Termostato apagado (H_{TO})	221	221
E	En espera (H_{SB})	2142	2142
F	Diferencia (C-D-E) = Horas en modo activo sin corrección de retroceso	1309	1309
G	Corrección de retroceso	355	355
H	Diferencia (F-G) = (o F x 73%) = Horas en modo activo corregidas para el impacto de retroceso	954	954
I	Horas activas equivalentes (H_{CE})	350	350

Tabla 9. Tabla A.5 "Número de horas en modo de dispositivo de calentamiento del cárter para la determinación del SEER". (Fuente: UNE 14825-2016)

	Solo refrigeración	Reversible
Dispositivo de calentamiento de cárter (H_{CK})	7760	2672

Capítulo 5: Herramienta de cálculo

El principal objetivo de este trabajo es la propuesta de una herramienta de cálculo para el rendimiento estacional de bombas de calor en el contexto de la calificación energética de viviendas, para esto se desarrollará una herramienta que permite calcular el SCOP y SEER de distintos equipos utilizados en la calefacción y/o refrigeración de viviendas, en particular, bombas de calor del tipo aire/aire (comúnmente más utilizadas en hogares). Esta herramienta basa su procedimiento de cálculo en la norma europea UNE-EN 14825-2016, debido a las características en común con las normas actuales de nuestro país antes comentadas.

Una de las complicaciones que surge al momento de crear la herramienta, son las fichas técnicas disponibles en Chile, por ejemplo, uno de los principales proveedores en Chile es ANWO. Ellos compran directamente en China y luego etiquetan con su marca. Por tanto, es imposible hacerle el seguimiento de los datos en otros países (que exigen certificación, como Europa), ya que no se comercializan en otros países (al menos no con el mismo nombre). Por lo tanto, hay un problema al momento de hacer los ajustes locales, ya que no es posible tomar un catálogo y hacer el cálculo del SCOP y SEER.

Es por esto por lo que se decide programar, en base a un país/continente normado (España/Europa) donde se exige más información al fabricante y mediante la cual es posible realizar cálculos de rendimientos estacionales, antes de internar los equipos al país para su comercialización. Con la idea de que nuestro país llegue a funcionar de igual manera en algún momento.

Se programa una interfaz sencilla para el usuario, de forma que este se limite a introducir solo los datos proporcionados por el fabricante, sin necesidad de realizar cálculos previos o modificar los datos o código de programación de la herramienta de cálculo, en pocas palabras, que el propio programa se encargue de realizar todas las operaciones pertinentes. Estas necesidades implican un grado elevado de complejidad a la hora de programar la herramienta, dado que fue solicitada en lenguaje de programación de Excel ya que lo que está disponible en la actualidad de la CEV está programado en el mismo lenguaje.

De esta manera, se ha considerado que el procedimiento más adecuado para la creación de la herramienta de Excel consiste en utilizar el lenguaje de programación Visual Basic, el cual está incluido en la plataforma, en modo programador y cuyo funcionamiento, es similar al lenguaje de programación de ambiente Matlab aprendido durante el periodo de estudiante de la carrera. Para su programación base, se solucionará un ejemplo de la norma (tanto para el caso del SCOP como del SEER), de los cuales se conocen todos los datos y resultados, para luego modificarlos de tal forma que este mismo archivo permita el cálculo de cualquier otra tipología de bomba de calor disponible en el mercado.

5.1 Programación SCOP.

Anteriormente se han comentado los tres parámetros principales, para la definición de las características de las bombas de calor, esto es, el clima, la temperatura y el tipo de unidad. En función de estos tres factores las condiciones de carga parcial de la máquina térmica serán unas u otras. Como buscamos abordar el contexto de la calificación energética en viviendas (CEV), nos enfocaremos en calcular estos parámetros para bombas de calor aire/aire, para el clima W, seleccionado anteriormente.

Para comenzar la creación de la herramienta, se buscará programar un código para resolver el ejemplo de la norma UNE 14825-2016, presente en el anexo F, para el clima medio (A), con el fin de tener obtener una base de programación para los demás climas, dado que son bastante similares en cuanto a programación. Dicho código se encuentra disponible en el Anexo A, de este trabajo, donde se detalla cada procedimiento.

Antes de comenzar con el código se creó la interfaz donde se trabajará (para cada clima, para SCOP y SEER), para a partir de esto, configurar las celdas que se utilizaran para los cálculos, interpolaciones y extrapolaciones, necesarias para obtener los resultados solicitados.

De esta manera se programa la herramienta de cálculo, para resolver el ejemplo del anexo F de la norma UNE 14825-2016, de una bomba aire/aire en clima A, por lo cual, con esto, se tiene una base confiable, para resolver otras bombas de calor provenientes de otros fabricantes, siempre y cuando entreguen los datos básicos para su cálculo. Con esta base es posible programar la herramienta para los otros dos tipos de climas faltantes, W que es el seleccionado para nuestro país anteriormente y que se encuentra resuelto en el Anexo B de este trabajo y el clima C que de igual forma fue agregado a la herramienta, ya que se resuelven de forma equivalente, solo que para sus condiciones de referencia correspondientes.

5.2 Programación SEER.

Tal como se ha comentado en el apartado “4.3 Cálculo en modo refrigeración”, el procedimiento para el cálculo del SEER presenta ciertas similitudes con el caso del SCOP, pero los cálculos se simplifican significativamente, dado que no se han de tener en consideración las zonas climáticas en el cálculo, de tal forma que una vez comprendido y resuelto el problema para el caso del SCOP, la elaboración de la metodología de trabajo para el caso del SEER no implica una gran complicación.

Tal como se ha procedido en el caso del modo de calefacción, para comenzar, se resolverá el ejemplo que presenta la norma UNE-EN 14825-2016 en su Anexo E (resolución y código en el anexo C y D), esto mediante la programación de una herramienta Excel y posteriormente se procederá a la búsqueda y aplicación de ejemplos comerciales, de tal forma que el programa pueda trabajar con diferentes metodologías de presentación de los datos de cálculo.

Para ello se crea una nueva hoja de Excel con el nombre de SEER aire-aire, en la cual se trabaja en Visual Basic, para resolver el ejemplo del Anexo E, y obtener un programa base, para ser utilizado para posteriores casos. Como ya se tiene la hoja de trabajo previa diseñada para el cálculo del SCOP,

la reutilizaremos para el cálculo del SEER, ya que son similares en cuanto a datos necesarios para su cálculo.

Capítulo 6: Conclusiones

El rendimiento estacional, SCOP en el caso de calefacción y SEER para refrigeración, son parámetros de gran importancia para las bombas de calor, ya que es una prueba fehaciente de la calidad de estas. Es por ello por lo que el cálculo del rendimiento estacional resulta de gran interés para cualquier instalación que contemple la utilización de bombas de calor, de manera que el desarrollo de esta herramienta de cálculo puede satisfacer una necesidad del mercado que aún no es cubierta en nuestro país.

En cuanto SCOP, es posible concluir que, para realizar su cálculo, este depende de tres parámetros principales antes mencionados: el tipo de bomba de calor, la temperatura y la zona climática. Una vez escogidos estos factores clave, el cálculo el proceso se vuelve un poco más mecánico. Mientras que, para calcular el SEER, la situación se simplifica considerablemente, ya que no se han de tener en cuenta las zonas climáticas para el cálculo de este.

Ambos términos de rendimientos estacional anteriormente comentados, son mediciones que presentan mayor precisión, lo cual beneficia al consumidor. Esto se debe, a que para su cálculo se realizan mediciones de consumo del equipo cuando está apagado (Modo desactivado u Off), cuando se encuentra desactivado por el termostato (Modo desactivado del termostato u Thermostat Off) e incluso en períodos de espera (Modo espera u Standby), los que comúnmente son llamados consumos fantasmas. Por lo tanto, al comparar la eficiencia energética de las bombas de calor, se concluye que los parámetros SEER y SCOP son definitivamente más fiables que los índices EER y COP. En pocas palabras, Los cálculos de rendimientos estacionales determinan la verdadera eficiencia de la bomba de calor. A partir de esto, el usuario puede conocer de manera confiable si realmente consume menos energía, lo que se traducirá, en un ahorro en la boleta de electricidad a fin de mes.

Se decidió utilizar como base un país/continente normado, dado las falencias en cuanto a información (fichas técnicas) que entregan los fabricantes o revendedores de bombas de calor en nuestro país, aspirando en algún momento operar de similar manera, ya que ambas se basan en la norma internacional ISO 5151.

La creación de una herramienta de Excel, con la particularidad de calcular el rendimiento estacional para distintos equipos, siguiendo la metodología propuesta por la norma UNE-EN 14825-2016, facilita al usuario el trabajo de cálculo manual, de manera que la herramienta se programó apuntando a la máxima sencillez, con el propósito de que resulte de fácil comprensión y utilización.

La herramienta, se elaboró teniendo en cuenta las diversas consideraciones en cuanto a metodologías y tipologías de bombas de calor comercializadas. La herramienta en si ha sido testada con los ejemplos disponibles en la norma que se utilizó como base, comprobando así su funcionamiento correcto. Ahora bien, se deja abierta la puerta, para posibles modificaciones futuras, en situaciones de que se encuentren casos que no fueron contemplados, además de cambios y/o mejoras en los procesos de cálculo.

Referencias

- [1] Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 14825:2016. En: Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y la refrigeración de locales. Ensayos y clasificación en condiciones de carga parcial y cálculo del rendimiento estacional.
- [2] Asociación Española de Normalización y Certificación. UNE-EN 14511:2016 En: Acondicionadores de aire, enfriadoras de líquido y bombas de calor con compresor accionado eléctricamente para la calefacción y refrigeración de locales.
- [3] División de Eficiencia Energética Ministerio de Energía. (2016). Etiquetado y Estándares Mínimos de EE en Chile. Santiago.
- [4] Fundación Chile. (2017). Recomendaciones políticas respecto a la Certificación de Eficiencia Energética de Acondicionadores de Aire.
- [5] Norma Chilena Oficial NCh2685.Of2002. (s.f.). Comportamiento de acondicionadores de aire y bombas de calor sin ductos - Métodos de ensayo y clasificación.
- [6] Norma Chilena Oficial NCh3081.Of2007. (s.f.). Eficiencia Energética - Equipos de Aire Acondicionado - Clasificación y etiquetado.
- [7] División de Eficiencia Energética Ministerio de Energía. (2016). Etiquetado y Estándares Mínimos de Eficiencia Energetica en Chile. Santiago.
- [8] CLASP. (2017). Improving Global Comparability: Annex 2, Products Fact Sheets.
- [9] <http://www.calificacionenergetica.cl>
- [10] <https://construye2025.cl/tag/calificacion-energetica-de-viviendas>
- [11] ISO 5151
- [12] Artículo 4.1.10 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones (OGUC).
- [13] Sociedad Americana de Ingenieros para Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE)
- [14] CLASP, Improving Global Comparability.

Anexo A: Código de programación de la herramienta, proceso de cálculo del SCOP para el clima A, resolución ejemplo de la norma, para crear base de programación.

Para comenzar se crea la interfaz donde se trabajará, para a partir de esto, configurar las celdas que se utilizaran para los cálculos, interpolaciones y extrapolaciones, necesarias para obtener los resultados solicitados. En la figura se aprecia un extracto de la hoja de cálculo ya definida que servirá de base, para comenzar a programar la herramienta de cálculo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Cálculo de la eficiencia energética de las bombas de calor aire/aire - clima medio (A)									
2										
3	Denominación del producto			Condiciones de referencia						
4	Fabricante			Clima	medio					
5	Referencia del producto			Tdesignh	-10	°C				
6	Tipo de bomba de calor	aire/aire		Pdesignh		kW				
7	Modo de funcionamiento	sólo calefacción		Tbiv		°C				
8	Control de la capacidad	fija		TOL		°C				
9				H _{HE}	1400	horas	Eficiencia energética			
10				Q _d		kWh	SCOPon	SCOP	Q _{HE} (kWh)	
11										
12										
13	Datos de rendimiento									
14	Condicion	Temperatura aire exterior °C	Coefficiente Carga Parcial(%)	Carga Parcial (kW)	Potencia Declarada(kW)	COP _d	C _{ch}	CR	COP _{bin}	
15	A	-7								
16	B	2								
17	C	7								
18	D	12								
19	E(TOL)									
20	F(Tbiv)									

Figura 10. Extracto tabla previa de trabajo

Para comenzar con la programación, se hace uso de Visual Basic, lenguaje de programación disponible en Excel en el apartado programador. Ya con esta propuesta de interfaz, es posible comenzar a definir, la ubicación de cada valor en su celda correspondiente para resolver el ejemplo de la norma UNE 14825-2016, disponible en el anexo F, para el clima medio (A), como se aprecia a continuación se muestra el código programado para los datos de entrada, según sus celdas correspondientes a la figura 10.

```

'datos de entrada

Mode = cells(7, 2)

Tdesignh = cells(5, 5)
Pdesignh = cells(6, 5)
Tbiv = cells(7, 5)
TOL = cells(8, 5)
HHE = cells(9, 5)
cells(10, 5) = HHE * Pdesignh
QH = cells(10, 5)

TA = cells(15, 2).Value
TB = cells(16, 2).Value
TC = cells(17, 2).Value
TD = cells(18, 2).Value
cells(19, 2) = TOL
cells(20, 2) = Tbiv

Ph_A = cells(15, 5)
Ph_B = cells(16, 5)
Ph_C = cells(17, 5)
Ph_D = cells(18, 5)
Ph_TOL = cells(19, 5)
Ph_Tbiv = cells(20, 5)

```

Figura 11. Código programación datos de entrada.

A continuación, se programa una verificación de datos de entrada, para que los valores ingresados por el usuario sean revisados previo a realizar los cálculos, esto mediante un If, con condiciones a cumplir, de no ser así se devolverá un mensaje en pantalla 'Datos de entrada no válidos' mediante un MsgBox.

```

'verificación de los datos de entrada

If Pdesignh = "" Or Pdesignh <= 0 Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : Pdesignh")
GoTo 10
End If

If Tbiv = "" Or Tbiv > 2 Or Tbiv < -10 Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : Tbiv")
GoTo 10
End If

If TOL = "" Or TOL < -10 Or TOL > -7 Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : TOL")
GoTo 10
End If

If TOL > Tbiv Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : TOL > Tbiv")
GoTo 10
End If

```

Figura 12. Código programación verificación datos de entrada.

También se deben verificar los datos ingresados de rendimiento, para esto, al igual que para la verificación de datos de entrada, mediante un If, con la condición de que los datos ingresados sean mayores o iguales a 0, de no ser así se desplegara un mensaje en pantalla mediante un MsgBox, con el texto ‘Faltan datos de rendimiento’, como se puede apreciar en la figura 13, código de programación verificación de datos de rendimiento.

```
'verificación de los datos de rendimiento
For i = 15 To 20
  For j = 5 To 7
    If cells(i, j) = "" Or cells(i, j) < 0 Then
      MsgBox ("Faltan datos de rendimiento")
      GoTo 10
    End If
  Next j
Next i
```

Figura 13. Código programación verificación datos de rendimiento.

Como tenemos dos opciones de modos de funcionamiento, solo calefacción o reversible, también se deben verificar los datos para ambos casos en cuestión, ya que sin esto generaríamos problemas durante los cálculos posteriores, por tanto, en ambos casos se debe comprobar mediante un If que los datos de entrada sean mayores o iguales a 0, en caso contrario, desplegara el mensaje ‘Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares’, según corresponda, lo que se muestra en la figura 14.

```
'verificación de los datos modos de funcionamiento

If Mode = "sólo calefacción" Then
  For i = 25 To 28
    If cells(i, 3) = "" Or cells(i, 3) < 0 Then
      MsgBox ("sólo calefacción : Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares")
      GoTo 10
    End If
  Next i
End If

If Mode = "reversible" Then
  For i = 25 To 28
    If cells(i, 8) = "" Or cells(i, 8) < 0 Then
      MsgBox ("Reversible : Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares")
      GoTo 10
    End If
  Next i
End If
```

Figura 14. Código programación verificación datos de funcionamiento.

Luego se procede con la programación, para el relleno de la tabla de rendimiento, dado que, a partir de los datos ingresados por el usuario, la herramienta debe completar las demás celdas de manera autónoma, para esto, se realiza el cálculo del coeficiente de carga parcial y carga parcial.

Parámetros que podemos definir como:

$$\text{Coeficiente carga parcial} = \frac{(\text{temperatura aire exterior} - 16)}{(T_{\text{designh}} - 16)} * 100 \quad (16)$$

$$\text{Carga parcial} = \frac{\text{Coeficiente carga parcial} * P_{\text{designh}}}{100} \quad (17)$$

Lo cual se programó de la siguiente manera, para rellenar las celdas correspondientes de manera autónoma, como se observa en la figura 15.

```
' Coeficiente de carga parcial para los puntos A a F (%)
For i = 15 To 20
    cells(i, 3) = ((cells(i, 2) - 16) / (Tdesignh - 16)) * 100
Next i

' Carga parcial para los puntos A a F (kW)
For i = 15 To 20
    cells(i, 4) = cells(i, 3) * Pdesignh / 100
Next i
```

Figura 15. Código programación coeficiente de carga parcial y carga parcial.

Luego se debe obtener el valor CR para los puntos A a F, además de la verificación del rango +/- 10% cuando es superior o igual a T_{biv} , para seguir completando de manera automatizada la tabla de datos de rendimiento, para esto, se aplica un ciclo For que va desde la celda $i= 15$ a 20, luego con un If se verifica si:

Temperatura aire exterior es mayor o igual que la T_{biv} y si la potencia declarada es mayor o igual a 0,9 por la carga parcial, además si COPd es menor o igual a 1.1 por la carga parcial. De cumplirse estas condiciones se genera una celda auxiliar $cells(i, 999)$ es igual a la carga parcial de cada celda en trabajo.

De no cumplirse lo antes mencionado a través de un Else, se dará valor a la celda auxiliar, $cells(i, 999)$ será igual a la Potencia declarada de cada celda en trabajo.

Con esto es posible obtener el CR el cual queda definido como:

$$CR = \frac{\text{Carga parcial}}{\text{Celda auxiliar (cells (i, 999))}} \quad (18)$$

Por otro lado, si CR es mayor o igual a 1, entonces CR tomara un valor igual a 1.

Lo anterior, se puede observar en forma de lenguaje de programación en la figura 16, donde se programó lo anteriormente comentado.

```
' Relación de capacidad CR para los puntos A a F y verificación del rango +/-10% cuando es superior o igual a Tbiv
For i = 15 To 20
  If cells(i, 2) >= Tbiv And cells(i, 5) >= 0.9 * cells(i, 4) And cells(i, 5) <= 1.1 * cells(i, 4) Then
    cells(i, 999) = cells(i, 4)
  Else
    cells(i, 999) = cells(i, 5)
  End If
  cells(i, 8) = cells(i, 4) / cells(i, 999)
  If cells(i, 8) >= 1 Then
    cells(i, 8) = 1
  End If
Next i
```

Figura 16. Código programación relación de capacidad CR para los puntos A a F.

Para completar el último dato que se debe calcular de forma autónoma, COP a carga parcial (COPbin) en la tabla de datos de entrada para los puntos de A a F, se programa un ciclo For que va desde la celda i = 15 a 20, luego a través de un If se tiene que sí, CR es igual a 1, entonces COPbin será igual COPd, de otro modo a través de un Else, se tendrá que hacer uso de la ecuación 10, ecuación previamente definida según norma para bombas de calor aire/aire. Lo cual se programa como se muestra en la figura 17.

```
' COP a carga parcial para los puntos A a F
For i = 15 To 20
  If cells(i, 8) = 1 Then
    cells(i, 9) = cells(i, 6)
  Else
    cells(i, 9) = cells(i, 6) * (1 - cells(i, 7) * (1 - cells(i, 8)))
  End If
Next i

COP_A = cells(15, 9)
COP_B = cells(16, 9)
COP_C = cells(17, 9)
COP_D = cells(18, 9)
COP_TOL = cells(19, 9)
COP_Tbiv = cells(20, 9)

Ph_A = cells(15, 999)
Ph_B = cells(16, 999)
Ph_C = cells(17, 999)
Ph_D = cells(18, 999)
Ph_TOL = cells(19, 999)
Ph_Tbiv = cells(20, 999)
```

Figura 17. Programación COP a carga parcial para los puntos A a F.

Para realizar el cálculo de intervalos, se deberá añadir a la hoja de cálculo base, una tabla de cálculo de intervalos, basandonos en los ejemplos disponibles en la norma UNE 14825, se agrega la tabla, como se muestra en la figura 18.

Cálculo Intervalo										
Condicion	Intervalo	Temperatura del aire exterior	Horas	Relación de carga parcial	Demanda de calefacción (kW)	Capacidad de calentamiento de la	COP(Tj)	Calentador eléctrico de apoyo	Demanda anual de calefacción	Consumo anual de electricidad con calentador eléctrico de
	j	Tj	hj		Ph(tj)			elbu(Tj)	hj * Ph(Tj)	$hj * ((Ph(Tj) - elbu(Tj)) / COP(Tj)) + elbu(Tj)$
		°C		%	kW	kW	-	kW	kWh	kWh
-	-	-10	1							
	21	-9	25							
	22	-8	23							
A	24	-7	24							
	25	-6	27							
	26	-5	68							
	27	-4	91							
	28	-3	89							
	29	-2	165							
	30	-1	173							
	31	0	240							
	32	1	280							
B	33	2	320							
	34	3	357							

Figura 18. Extracto tabla cálculo de intervalo.

Para programar el relleno de esta tabla del cálculo de intervalo, esto se realizará mediante un ciclo For que va desde la celda $i=34$ a la 59, luego a partir de un If se tiene que si la temperatura de aire exterior es igual a TA entonces la Capacidad de calentamiento de la bomba de calor sera igual a Ph_A, en tanto COP(Tj) sera igual a COP_A. De igual manera se programa para los puntos B, C, D. Exepto para Tbiv y TOL donde se agrega la condicion de que cells $(i, 1) = 'Tbiv'$ o $'TOL'$, lo cual se observa en la codigo de programación, presente en la figura 19.

```

'Pruebas de los puntos A, B, C, D, Tbiv y TOL

For i = 34 To 59
If cells(i, 3) = TA Then
    cells(i, 7) = Ph_A
    cells(i, 8) = COP_A
End If

If cells(i, 3) = TB Then
    cells(i, 7) = Ph_B
    cells(i, 8) = COP_B
End If

If cells(i, 3) = TC Then
    cells(i, 7) = Ph_C
    cells(i, 8) = COP_C
End If

If cells(i, 3) = TD Then
    cells(i, 7) = Ph_D
    cells(i, 8) = COP_D
End If

If cells(i, 3) = Tbiv Then
    cells(i, 1) = "Tbiv"
    cells(i, 7) = Ph_Tbiv
    cells(i, 8) = COP_Tbiv
End If

If cells(i, 3) = TOL Then
    cells(i, 1) = "TOL"
    cells(i, 7) = Ph_TOL
    cells(i, 8) = COP_TOL
End If

Next i

```

Figura 19. Programación prueba de puntos A, B, C, D, Tbiv, TOL.

Para realizar el cálculo de relación de carga parcial y la demanda de calefacción anual, para la tabla de cálculo del intervalo, se realiza de forma equivalente a lo antes definido en las ecuaciones 16 y 17. Lo cual se programo de la siguiente manera.

```

'Relación de carga parcial
For i = 34 To 59
    cells(i, 5) = ((cells(i, 3) - 16) / (Tdesignh - 16)) * 100
    cells(i, 6) = cells(i, 5) * Pdesignh / 100
Next i

```

Figura 20. Programación relación carga parcial.

Para realizar la interpolacion de capacidades y COP, se proponen una amplia variedad de casos, por ejemplo, cuando TOL=TA, mediante un If, si se comprueba esto, comienza un ciclo For, en las celdas i = 34 a la 37, con una redirección a la posición del código definida como 20, la cual se muestra en la figura 21.

```

'TOL=TA
If TOL = TA Then
  For i = 34 To 37
    GoTo 20
  Next i
End If

Next i

20:
For i = 34 To 37
If cells(i, 3) < TOL Then
  cells(i, 7) = "-"
  cells(i, 8) = "-"
End If

```

Figura 21. Programación condición TOL=TA, para interpolación de capacidades y COP.

Mientras que para las otras interpolaciones, tanto de capacidades como de COP, se proponen las siguientes condiciones, que se observan en la tabla 10 y 11.

Tabla 10. Condiciones de interpolaciones para las capacidades.

Condicion Si	Capacidad de calentamiento de la bomba
$T_{biv} = TOL$	$\frac{Ph_{TOL} - [(Ph_{TOL} - Ph_A) * (TOL - T_j)]}{(TOL - TA)}$
$T_A \geq T_{biv} > TOL$	$\frac{Ph_{TOL} - [(Ph_{TOL} - Ph_A) * (TOL - T_j)]}{(TOL - TA)}$
$T_A \geq T_j > T_{biv}$	$\frac{(Ph_A - Ph_{T_{biv}}) * (T_j - T_A)}{(T_A - T_{biv})} + Ph_A$
$T_{biv} > T_A$	$Ph_{TOL} - \frac{[(Ph_{TOL} - Ph_A) * (TOL - T_j)]}{(TOL - T_A)}$
$T_{biv} > T_j > T_A$	$Ph_A - \frac{[(Ph_A - Ph_{T_{biv}}) * (T_A - T_j)]}{(T_A - T_{biv})}$
$T_B > T_j > T_{biv}$	$Ph_{T_{biv}} - \frac{[(Ph_{T_{biv}} - Ph_B) * (T_{biv} - T_j)]}{(T_{biv} - T_B)}$
$T_A > T_{biv}$	$Ph_A - \frac{[(Ph_A - Ph_B) * (T_A - T_j)]}{(T_A - T_B)}$
$T_C > T_j > T_B$	$\frac{[(Ph_B - Ph_C) * (T_j - T_B)]}{(T_B - T_C) + Ph_B}$
$T_D > T_j > T_C$	$\frac{[(Ph_C - Ph_D) * (T_j - T_C)]}{(T_C - T_D) + Ph_C}$
$T_j > T_D$	$\frac{[(Ph_C - Ph_D) * (T_j - T_C)]}{(T_C - T_D) + Ph_C}$

Tabla 11. Condiciones de interpolaciones para COP.

Condicion Si	COP(Tj)
$T_{biv} = TOL$	$\frac{COP_{TOL} - [(COP_{TOL} - COP_A) * (TOL - T_j)]}{(TOL - T_A)}$
$T_A \geq T_{biv} > TOL$	$\frac{COP_{TOL} - [(COP_{TOL} - COP_{Tbiv}) * (TOL - T_j)]}{(TOL - T_{biv})}$
$T_A \geq T_j > T_{biv}$	$\frac{[(COP_A - COP_{Tbiv}) * (T_j - T_A) - T_A]}{(T_A - T_{biv}) + COP_A}$
$T_{biv} > T_A$	$COP_{TOL} - \frac{[(COP_{TOL} - COP_A) * (TOL - T_j)]}{(TOL - T_A)}$
$T_{biv} > T_j > T_A$	$COP_A - \frac{[(COP_A - COP_{Tbiv}) * (T_A - T_j)]}{(T_A - T_{biv})}$
$T_B > T_j > T_{biv}$	$COP_{Tbiv} - \frac{[(COP_{Tbiv} - COP_B) * (T_{biv} - T_j)]}{(T_{biv} - T_B)}$
$T_A > T_{biv}$	$COP_A - \frac{[(COP_A - COP_B) * (T_A - T_j)]}{(T_A - T_B)}$
$T_C > T_j > T_B$	$COP_A - \frac{[(COP_B - COP_C) * (T_j - T_B)]}{(T_B - T_C) + COP_B}$
$T_D > T_j > T_C$	$\frac{[(COP_C - COP_D) * (T_j - T_C)]}{(T_C - T_D) + COP_C}$
$T_j > T_D$	$\frac{[(COP_C - COP_D) * (T_j - T_C)]}{(T_C - T_D) + COP_C}$

Para realizar el cálculo del SCOPon solo basta con realizar la sumatoria de celdas de la demanda anual de calefacción y consumo anual de electricidad con calentador eléctrico de apoyo y luego realizar la division entre ellos tal como se definio anteriormente.

```
'cálculo de SCOPon
cells(60, 10) = "=sum(j34:j59)"
cells(60, 11) = "=sum(k34:k59)"
SCOPon = cells(60, 10) / cells(60, 11)
cells(10, 8) = SCOPon
```

Figura 22. Programación calculo SCOPon.

Se procede a realizar los cálculos de los consumos de energía auxiliar, para esto, se define en primera instancia Aux = 0, luego por medio de un ciclo For que va desde la celda i= 25 a la 28, además se agrega un If que verificará si se elige el modo solo calefacción, cuando esto sucede:

$$P * h = \frac{\text{Potencia de entrada} * \text{horas}}{1000} \quad (19)$$

Por lo tanto, Aux pasará a tener el valor de Aux + P*h, en caso contrario, mediante un Else, nos entregará el valor de P*h para las unidades en modo reversible, realizando el cálculo de igual manera que para el modo solo calefacción, solo que esta vez, con las celdas correspondientes para el modo reversible.

```
'cálculo de los consumos de energía auxiliar
Aux = 0
For i = 25 To 28
  If Mode = "sólo calefacción" Then
    cells(i, 4) = cells(i, 2) * cells(i, 3) / 1000
    Aux = Aux + cells(i, 4)
  Else
    cells(i, 9) = cells(i, 7) * cells(i, 8) / 1000
    Aux = Aux + cells(i, 9)
  End If
Next i
```

Figura 23. Programación cálculos consumos auxiliares.

Para calcular el consumo anual de energía, se realiza mediante la ecuación:

$$QHE = \frac{QH}{SCOP_{on} + Aux} \quad (20)$$

Luego la ecuación 20, se transcribe a código de programación, como se muestra a continuación en la figura 24.

```
'cálculo del consumo anual de energía
cells(10, 10) = QH / SCOPon + Aux
QHE = cells(10, 10)
```

Figura 24. Programación consumo anual de energía.

Finalmente, para realizar el cálculo del valor SCOP, solo basta con aplicar la ecuación número 5 ya definida, de tal manera que el código de programación quedaría:

```
'cálculo de SCOP
cells(10, 9) = QH / QHE
SCOP = cells(10, 9)
```

Figura 25. Programación calculo SCOP.

Para programar la etiqueta energética, se realiza una serie de If con los rangos de SCOP antes tratados en el apartado 3.3, donde dependiendo el resultado obtenido, verificara en que rango se encuentra, para así entregar la calificación (letra correspondiente) a través de un MsgBox desplegado en la pantalla.

De esta manera se programó la herramienta de cálculo, para resolver el ejemplo del anexo F de la norma UNE 14825-2016, de una bomba aire/aire en clima medio (A), por lo cual, con esto, se tiene una base confiable, para resolver otras bombas de calor provenientes de otros fabricantes, siempre y cuando entreguen los datos básicos para su cálculo. Con esta base es posible programar la herramienta para los otros dos tipos de climas faltantes, frio (W) y cálido (C), que se resuelven de forma equivalente, solo que para sus condiciones de referencia correspondientes.

Anexo B: Código de programación de la herramienta, proceso de cálculo del SCOP para el clima W, seleccionado para nuestro país.

En apartados anteriores se han comentado los tres parámetros principales, para la definición de las características de las bombas de calor, esto es, el clima, la temperatura y el tipo de unidad. En función de estos tres factores las condiciones de carga parcial de la máquina térmica serán unas u otras. Como buscamos abordar el contexto de la calificación energética en viviendas, nos enfocaremos en calcular estos parámetros para bombas de calor aire/aire y el clima W el cual se selección para nuestro país.

Para comenzar se crea la interfaz donde se trabajará, para a partir de esto, configurar las celdas que se utilizaran para los cálculos, interpolaciones y extrapolaciones, necesarias para obtener los resultados solicitados. En la Figura se aprecia un extracto de la hoja de cálculo ya definida que servirá de base, para comenzar a programar la herramienta de cálculo.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Cálculo de la eficiencia energética de las bombas de calor aire/aire - clima cálido (W)										
2											
3	Denominación del producto			Condiciones de referencia							
4	Fabricante			Clima	cálido						
5	Referencia del producto			Tdesignh	2	°C					
6	Tipo de bomba de calor	aire/aire		Pdesignh		kW					
7	Modo de funcionamiento	reversible		Tbiv		°C					
8	Control de la capacidad	fija		TOL		°C			Eficiencia energética		
9				HHE	1400	horas			SCOPon	SCOP	
10				QH		kWh			Q _{HE} (kWh)		
11											
12											
13	Datos de rendimiento										
14	Condicion	Temperatura aire exterior °C	Coficiente Carga Parcial(%)	Carga Parcial (kW)	Potencia Declarada(kW)	COP _d	C _{en}	CR	COP _{bin}		
15	A	-7									
16	B	2									
17	C	7									
18	D	12									
19	E(TOL)										
20	F(Tbiv)										

Figura 26. Extracto tabla previa de trabajo

Para comenzar con la programación, se hace uso de Visual Basic, lenguaje de programación disponible en Excel en el apartado programador. Ya con esta propuesta de interfaz, es posible comenzar a definir, la ubicación de cada valor en su celda correspondiente, para el clima cálido (W), como se aprecia a continuación se muestra el código programado para los datos de entrada, según sus celdas correspondientes a la figura 26.


```

'Datos de entrada

Mode = cells(7, 2)
Pdesignh = cells(6, 5)
Tdesignh = cells(5, 5)
Tbiv = cells(7, 5)
TOL = cells(8, 5)
HHE = cells(9, 5)
cells(10, 5) = HHE * Pdesignh
QH = cells(10, 5)

TB = cells(16, 2).Value
TC = cells(17, 2).Value
TD = cells(18, 2).Value
cells(19, 2) = TOL
cells(20, 2) = Tbiv

Ph_B = cells(16, 5)
Ph_C = cells(17, 5)
Ph_D = cells(18, 5)
Ph_TOL = cells(19, 5)
Ph_Tbiv = cells(20, 5)

```

Figura 27. Código programación datos de entrada.

A continuación, se programa una verificación de datos de entrada, para que los valores ingresados por el usuario sean revisados previo a realizar los cálculos, esto mediante un If, con condiciones a cumplir, de no ser así se devolverá un mensaje en pantalla 'Datos de entrada no válidos' mediante un MsgBox.

```

'verificación de los datos de entrada

If Pdesignh = "" Or Pdesignh <= 0 Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : Pdesignh")
GoTo 30
End If

If Tbiv = "" Or Tbiv > 7 Or Tbiv < 2 Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : Tbiv")
GoTo 30
End If

If TOL = "" Or TOL < 2 Or TOL > 2 Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : TOL")
GoTo 30
End If

If TOL > Tbiv Then
MsgBox ("Datos de entrada no válidos : TOL> Tbiv")
GoTo 30
End If

```

Figura 28. Código programación verificación datos de entrada.

También se deben verificar los datos ingresados de rendimiento, para esto, al igual que para la verificación de datos de entrada, mediante un If, con la condición de que los datos ingresados sean mayores o iguales a 0, de no ser así se desplegara un mensaje en pantalla mediante un MsgBox, con el texto ‘Faltan datos de rendimiento’, como se puede apreciar en la figura 29, código de programación verificación de datos de rendimiento.

```
'verificación de los datos de rendimiento
For i = 16 To 20
  For j = 5 To 7
    If cells(i, j) = "" Or cells(i, j) < 0 Then
      MsgBox ("Faltan datos de rendimiento")
      GoTo 30
    End If
  Next j
Next i
```

Figura 29. Código programación verificación datos de rendimiento.

Como tenemos dos opciones de modos de funcionamiento, solo calefacción o reversible, también se deben verificar los datos para ambos casos en cuestión, ya que sin esto generaríamos problemas durante los cálculos posteriores, por tanto, en ambos casos se debe comprobar mediante un If que los datos de entrada sean mayores o iguales a 0, en caso contrario, desplegara el mensaje ‘Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares’, según corresponda, lo que se muestra en la figura 30.

```
'verificacion de los modos de funcionamiento

If Mode = "sólo calefacción" Then
  For i = 25 To 28
    If cells(i, 3) = "" Then
      MsgBox ("sólo calefacción HP : Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares")
      GoTo 30
    End If
  Next i
End If

If Mode = "reversible" Then
  For i = 25 To 28
    If cells(i, 8) = "" Then
      MsgBox ("Reversible HP : Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares")
      GoTo 30
    End If
  Next i
End If
```

Figura 30. Código programación verificación datos de funcionamiento.

Luego se procede con la programación, para el relleno de la tabla de rendimiento, dado que, a partir de los datos ingresados por el usuario, la herramienta debe completar las demás celdas de manera autónoma, para esto, se realiza el cálculo del coeficiente de carga parcial y carga parcial.

Parámetros que podemos definir como:

$$\text{Coeficiente carga parcial} = \frac{(\text{temperatura aire exterior} - 16)}{(T_{\text{designh}} - 16)} * 100 \quad (16)$$

$$\text{Carga parcial} = \frac{\text{Coeficiente carga parcial} * P_{\text{designh}}}{100} \quad (17)$$

Lo cual se programó de la siguiente manera, para rellenar las celdas correspondientes de manera autónoma, como se observa en la figura 31.

```
' Relación de carga parcial para los puntos B a F (%)
For i = 16 To 20
    cells(i, 3) = ((cells(i, 2) - 16) / (Tdesignh - 16)) * 100
Next i

' Capacidades a carga parcial para los puntos B a F (kW)
For i = 16 To 20
    cells(i, 4) = cells(i, 3) * Pdesignh / 100
Next i
```

Figura 31. Código programación coeficiente de carga parcial y carga parcial.

Luego se debe obtener el valor CR para los puntos A a F, además de la verificación del rango +/- 10% cuando es superior o igual a T_{biv} , para seguir completando de manera automatizada la tabla de datos de rendimiento, para esto, se aplica un ciclo For que va desde la celda $i= 16$ a 20, luego con un If se verifica si:

Temperatura aire exterior es mayor o igual que la T_{biv} y si la potencia declarada es mayor o igual a 0,9 por la carga parcial, además si COPd es menor o igual a 1.1 por la carga parcial. De cumplirse estas condiciones se genera una celda auxiliar $cells(i, 999)$ es igual a la carga parcial de cada celda en trabajo.

De no cumplirse lo antes mencionado a través de un Else, se dará valor a la celda auxiliar, $cells(i, 999)$ será igual a la Potencia declarada de cada celda en trabajo.

Con esto es posible obtener el CR el cual queda definido como:

$$CR = \frac{\text{Carga parcial}}{\text{Celda auxiliar (cells (i, 999))}} \quad (18)$$

Por otro lado, si CR es mayor o igual a 1, entonces CR tomara un valor igual a 1.

Lo anterior, se puede observar en forma de lenguaje de programación en la figura 32, donde se programó lo anteriormente comentado.

```
' Relación de capacidad CR para los puntos B a F
For i = 16 To 20
  If cells(i, 2) >= Tbiv And cells(i, 5) >= 0.9 * cells(i, 4) And cells(i, 5) <= 1.1 * cells(i, 4) Then
    cells(i, 999) = cells(i, 4)
  Else
    cells(i, 999) = cells(i, 5)
  End If
  cells(i, 8) = cells(i, 4) / cells(i, 999)
  If cells(i, 8) >= 1 Then
    cells(i, 8) = 1
  End If
End If
Next i
```

Figura 32. Código programación relación de capacidad CR para los puntos B a F.

Para completar el último dato que se debe calcular de forma autónoma, COP a carga parcial (COPbin) en la tabla de datos de entrada para los puntos de B a F, se programa un ciclo For que va desde la celda $i = 16$ a 20, luego a través de un If se tiene que sí, CR es igual a 1, entonces COPbin será igual COPd, de otro modo a través de un Else, se tendrá que hacer uso de la ecuación 10, ecuación previamente definida según norma para bombas de calor aire/aire. Lo cual se programa como se muestra en la figura 33.

```
' COP a carga parcial para los puntos B a F
For i = 16 To 20
  If cells(i, 8) = 1 Then
    cells(i, 9) = cells(i, 6)
  Else
    cells(i, 9) = cells(i, 6) * (1 - cells(i, 7) * (1 - cells(i, 8)))
  End If
Next i

COP_B = cells(16, 9)
COP_C = cells(17, 9)
COP_D = cells(18, 9)
COP_TOL = cells(19, 9)
COP_Tbiv = cells(20, 9)

Ph_B = cells(16, 999)
Ph_C = cells(17, 999)
Ph_D = cells(18, 999)
Ph_TOL = cells(19, 999)
Ph_Tbiv = cells(20, 999)
```

Figura 33. Programación COP a carga parcial para los puntos B a F.

Para realizar el cálculo de intervalos, se deberá añadir a la hoja de cálculo base, una tabla de cálculo de intervalos, basandonos en los ejemplos disponibles en la norma, se agrega la tabla, como se muestra en la figura 34.

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
30	Cálculo Intervalo									
31	Intervalo	Temperatura del aire exterior	Horas	Relación de carga parcial	Demanda de calefacción (kW)	Carga térmica cubierta por la bomba de calor		Calentador eléctrico de apoyo	Demanda anual de calefacción	Consumo anual de electricidad con calentador eléctrico de apoyo
32	j	Tj	hj	p(Tj)	Ph(Tj)		COP _{biv} (Tj)	elbu(Tj)	h _j * Ph(Tj)	$h_j * ((P_b(T_j) - elbu(T_j)) / COP_{biv}(T_j) + elbu(T_j))$
33	-	°C	-	%	kW	kW	-	kW	kWh	kWh
34	33	2	3							
35	34	3	22							
36	35	4	63							
37	36	5	63							
38	37	6	175							
39	38	7	162							
40	39	8	259							
41	40	9	360							
42	41	10	428							
43	42	11	430							
44	43	12	503							
45	44	13	444							
46	45	14	384							
47	46	15	294							

Figura 34. Extracto tabla cálculo de intervalo.

Para programar el relleno de esta tabla del cálculo de intervalo, esto se realizará mediante un ciclo For que va desde la celda i= 34 a la 47, luego a partir de un If se tiene que si la temperatura de aire exterior es igual a TB entonces la Capacidad de calentamiento de la bomba de calor sera igual a Ph_B, en tanto COP(Tj) sera igual a COP_B. De igual manera se programa para los puntos C y D. Exepto para T_{biv} y TOL donde se agrega la condicion de que cells (i, 1) = 'T_{biv}' o 'TOL', lo cual se observa en la codigo de programación, presente en la figura 35.

```

'Pruebas de los puntos B, C, D, Tbiv y TOL

For i = 34 To 47

If cells(i, 3) = TB Then
    cells(i, 7) = Ph_B
    cells(i, 8) = COP_B
End If

If cells(i, 3) = TC Then
    cells(i, 7) = Ph_C
    cells(i, 8) = COP_C
End If

If cells(i, 3) = TD Then
    cells(i, 7) = Ph_D
    cells(i, 8) = COP_D
End If

If cells(i, 3) = TOL Then
    cells(i, 1) = "TOL"
    cells(i, 7) = Ph_TOL
    cells(i, 8) = COP_TOL
End If

If cells(i, 3) = Tbiv Then
    cells(i, 1) = "Tbiv"
    cells(i, 7) = Ph_Tbiv
    cells(i, 8) = COP_Tbiv
End If

```

Figura 35. Programación prueba de puntos B, C, D, Tbiv, TOL.

Para realizar el cálculo de relación de carga parcial y la demanda de calefacción anual, para la tabla de cálculo del intervalo, se realiza de forma equivalente a lo antes definido en las ecuaciones 16 y 17. Lo cual se programo de la siguiente manera.

```

'cálculo de la relación de carga parcial
For i = 34 To 47
    cells(i, 5) = ((cells(i, 3) - 16) / (Tdesignh - 16)) * 100
    cells(i, 6) = cells(i, 5) * Pdesignh / 100
Next i

```

Figura 36. Programación relación carga parcial.

Para realizar la interpolacion de capacidades y COP, se proponen una amplia variedad de casos. Uno de ellos es si $T_j < TOL$, el cual se muestra ya programado en la figura 37.

```

'interpolación de capacidades y COP
For i = 34 To 47

If cells(i, 3) < TOL Then
    cells(i, 7) = "-"
    cells(i, 8) = "-"
End If
Next i

```

Figura 37. Programación interpolación de capacidades y COP.

Mientras que para las otras interpolaciones, tanto de capacidades como de COP, se proponen las siguientes condiciones, que se observan en la tabla 12 y 13 para T_{biv} entre T_B y T_C .

Tabla 12. Condiciones de interpolaciones para las capacidades, para T_{biv} entre T_B y T_C .

Condicion Si	Capacidad de calentamiento de la bomba
$T_{biv} > T_j \geq T_B$	$\frac{Ph_B - [(Ph_B - Ph_{T_{biv}}) * (T_B - T_j)]}{(T_B - T_{biv})}$
$T_C > T_j > T_{biv}$	$\frac{Ph_{T_{biv}} - [(Ph_{T_{biv}} - Ph_C) * (T_{biv} - T_j)]}{(T_{biv} - T_C)}$
$T_B > T_{biv}$	$\frac{Ph_B - [(Ph_B - Ph_C) * (T_B - T_j)]}{(T_B - T_C)}$

Tabla 13. Condiciones de interpolaciones para COP, para T_{biv} entre T_B y T_C .

Condicion Si	COP(T_j)
$T_{biv} > T_j \geq T_B$	$\frac{COP_B - [(COP_B - COP_{T_{biv}}) * (T_B - T_j)]}{(T_B - T_{biv})}$
$T_C > T_j > T_{biv}$	$\frac{COP_{T_{biv}} - [(COP_{T_{biv}} - COP_C) * (T_{biv} - T_j)]}{(T_{biv} - T_C)}$
$T_B > T_{biv}$	$\frac{COP_B - [(COP_B - COP_C) * (T_B - T_j)]}{(T_B - T_C)}$

En cuanto Interpolación de las capacidades y del COP para las temperaturas de los recipientes entre C y D, se propone:

Tabla 14. Condiciones de interpolaciones para las capacidades, para las temperaturas de los recipientes entre C y D.

Condicion Si	Capacidad de calentamiento de la bomba
$T_{biv} > T_j \geq T_B$	$\frac{[(Ph_C - Ph_D) * (T_j - T_C)]}{(T_C - T_D)} + Ph_C$

Tabla 15. Condiciones de interpolaciones para COP, para las temperaturas de los recipientes entre C y D.

Condicion Si	Capacidad de calentamiento de la bomba
$T_{div} > T_j \geq T_B$	$\frac{[(COP_C - COP_D) * (T_j - T_C)]}{(T_C - T_D)} + COP_C$

Finalmente, para la extrapolación de las capacidades y del COP para las temperaturas de los contenedores superiores a D, se repetiran las condiciones antes propuestas en la tabla 16 y 17.

Mientras que el calculo de la demanda anual de calor y el consumo de energia, se programo de la siguiente manera expuesta en la figura 38.

```
'cálculo de la demanda anual de calor y del consumo de energía
For i = 34 To 47
  If cells(i, 7) = "-" Then
    cells(i, 9) = cells(i, 6)
  Else
    cells(i, 9) = cells(i, 6) - cells(i, 7)
    If cells(i, 9) < 0 Then
      cells(i, 9) = 0
    End If
  End If

  cells(i, 10) = cells(i, 4) * cells(i, 6)

  If cells(i, 8) = "-" Then
    cells(i, 11) = cells(i, 4) * cells(i, 9)
  Else
    x = cells(i, 6) - cells(i, 9)
    y = x / cells(i, 8)
    Z = y + cells(i, 9)
    cells(i, 11) = Z * cells(i, 4)
  End If

Next i
```

Figura 38. Programación demanda anual de calor y consumo de energía.

Para realizar el cálculo del SCOPon solo basta con realizar la sumatoria de celdas de la demanda anual de calefacción y consumo anual de electricidad con calentador eléctrico de apoyo y luego realizar la division entre ellos tal como se definio anteriormente.

```
'cálculo de SCOPon
cells(48, 10) = "=sum(j34:j47)"
cells(48, 11) = "=sum(k34:k47)"
SCOPon = cells(48, 10) / cells(48, 11)
cells(10, 8) = SCOPon
```

Figura 39. Programación calculo SCOPon.

Se procede a realizar los cálculos de los consumos de energía auxiliar, para esto, se define en primera instancia $Aux = 0$, luego por medio de un ciclo For que va desde la celda $i = 25$ a la 28, además se agrega un If que verificará si se elige el modo solo calefacción, cuando esto sucede:

$$P * h = \frac{\text{Potencia de entrada} * \text{horas}}{1000} \quad (19)$$

Por lo tanto, Aux pasará a tener el valor de $Aux + P*h$, en caso contrario, mediante un Else, nos entregará el valor de $P*h$ para las unidades en modo reversible, realizando el cálculo de igual manera que para el modo solo calefacción, solo que esta vez, con las celdas correspondientes para el modo reversible.

```
'cálculo de los consumos de energía auxiliar
Aux = 0
For i = 25 To 28
  If Mode = "sólo calefacción" Then
    cells(i, 4) = cells(i, 2) * cells(i, 3) / 1000
    Aux = Aux + cells(i, 4)
  Else
    cells(i, 9) = cells(i, 7) * cells(i, 8) / 1000
    Aux = Aux + cells(i, 9)
  End If
Next i
```

Figura 40. Programación cálculos consumos auxiliares.

Para calcular el consumo anual de energía, se realiza mediante la ecuación:

$$QHE = \frac{QH}{SCOP_{on} + Aux} \quad (20)$$

Luego la ecuación 20, se transcribe a código de programación, como se muestra a continuación en la figura 41.

```
'cálculo del consumo anual de energía
cells(10, 10) = QH / SCOPon + Aux
QHE = cells(10, 10)
```

Figura 41. Programación consumo anual de energía.

Finalmente, para realizar el cálculo del valor SCOP, solo basta con aplicar la ecuación número 5 ya definida, de tal manera que el código de programación quedaría:

```
'cálculo de SCOP
cells(10, 9) = QH / QHE
SCOP = cells(10, 9)
```

Figura 42. Programación calculo SCOP.

Para programar la etiqueta energética, se realiza una serie de If con los rangos de SCOP antes tratados en el apartado 3.3, donde dependiendo el resultado obtenido, verificara en que rango se encuentra, para así entregar la calificación (letra correspondiente) a través de un MsgBox desplegado en la pantalla.

```
'Calificacion etiqueta energetica

If cells(10, 9) >= 5.1 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: A+++")
End If

If cells(10, 9) < 5.1 And cells(9, 9) >= 4.6 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: A++")
End If

If cells(10, 9) < 4.6 And cells(9, 9) >= 4 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: A+")
End If

If cells(10, 9) < 4 And cells(9, 9) >= 3.4 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: A")
End If

If cells(10, 9) < 3.4 And cells(9, 9) >= 3.1 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: B")
End If

If cells(10, 9) < 3.1 And cells(9, 9) >= 2.8 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: C")
End If

If cells(10, 9) < 2.8 And cells(9, 9) >= 2.5 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: D")
End If

If cells(10, 9) < 2.5 And cells(9, 9) >= 2.2 Then
MsgBox ("Calificación Energetica: E")
End If
```

Figura 43. Programación etiqueta energética.

De esta manera se programó la herramienta de cálculo, para una bomba aire/aire en clima cálido (W), por lo cual, con esto, se tiene una base confiable, para resolver otras bombas de calor provenientes de otros fabricantes, *siempre y cuando entreguen los datos básicos para su cálculo*. Con esta base es posible programar la herramienta para los otros dos tipos de climas faltantes, frio (A) y cálido (C), que se resuelven de forma equivalente, solo que para sus condiciones de referencia correspondientes.

Anexo C: Código de programación de la herramienta, proceso de cálculo del SEER.

Para comenzar, realizamos una verificación de datos de entrada, donde a partir de un If, veremos si la Potencia de diseño (Pdesignc) es mayor que 0, en caso contrario se desplegará un mensaje en la pantalla: "Datos de entrada faltantes: Pdesignc".

```
' verificación de los datos de entrada
If Pdesignc = "" Or Pdesignc <= 0 Then
MsgBox ("Datos de entrada faltantes : Pdesignc")
GoTo 10
End If
```

Figura 44. Programación condigo para la verificación de datos de entrada.

Luego tenemos que verificar los datos de rendimiento, para lo cual a través de un ciclo For veremos si existen datos mayores o iguales a 0, en las celdas i (13 a 16) y j (5 a 7), en caso contrario se desplegará un mensaje en la pantalla través de un MsgBox: "Faltan datos de rendimiento".

```
'verificación de los datos de rendimiento
For i = 13 To 16
  For j = 5 To 7
    If cells(i, j) = "" Or cells(i, j) < 0 Then
      MsgBox ("Faltan datos de rendimiento")
      GoTo 10
    End If
  Next j
Next i
```

Figura 45. Programación condigo para la verificación datos de rendimiento.

Como tenemos dos modos de funcionamiento, solo refrigeración y reversible, los cuales se pueden seleccionar a través del menú desplegable en la celda 'modo de funcionamiento' disponible en la hoja de cálculo, también debemos corroborar que los datos de entrada sean mayores o iguales a 0, esto a través de un If para cada caso, en caso contrario desplegara el mensaje de que faltan datos de entrada, como se observa en el código presentado en la figura 46.

```
If Mode = "solo refrigeración" Then
  For i = 21 To 24
    If cells(i, 3) = "" Or cells(i, 3) < 0 Then
      MsgBox ("solo refrigeración : Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares")
      GoTo 10
    End If
  Next i
End If

If Mode = "reversible" Then
  For i = 21 To 24
    If cells(i, 8) = "" Or cells(i, 8) < 0 Then
      MsgBox ("Reversible : Faltan los datos de entrada de los modos auxiliares")
      GoTo 10
    End If
  Next i
End If
```

Figura 46. Programación código verificación datos modos auxiliares.

Con esto se procede a calcular a través de los datos ingresados, la relación de carga parcial (%), potencia en carga parcial (kW), la relación de capacidad CR y EER a carga parcial con las ecuaciones antes planteadas en este trabajo, pero esta vez con lenguaje de programación.

Luego se procede con la programación, para el relleno de la tabla de rendimiento, dado que, a partir de los datos ingresados por el usuario, la herramienta debe completar las demás celdas de manera autónoma, para esto, se realiza el cálculo del coeficiente de carga parcial y carga parcial. Parámetros que podemos definir como:

$$\text{Coeficiente carga parcial} = \frac{(\text{temperatura aire exterior} - 16)}{(T_{\text{designc}} - 16)} * 100 \quad (21)$$

$$\text{Carga parcial} = \frac{\text{Coeficiente carga parcial} * P_{\text{designc}}}{100} \quad (22)$$

Ecuaciones (21 y 22) las cuales se programan de la siguiente manera, para rellenar las celdas correspondientes de manera autónoma.

```
' cálculo de la relación de carga parcial (%)
For i = 13 To 16
    cells(i, 3) = (cells(i, 2) - 16) / (Tdesignc - 16) * 100
Next i

' cálculo de la potencia en carga parcial (kW)
For i = 13 To 16
    cells(i, 4) = cells(i, 3) * Pdesignc / 100
Next i
```

Figura 47. Programación código cálculo de relación de carga parcial y potencia a carga parcial.

Luego se debe obtener el valor CR, para seguir completando de manera automatizada la tabla de datos de rendimiento, para esto, se aplica un ciclo For que va desde la celda i= 13 a 16. Para obtener el valor de este, se procede a programar de la misma forma que para el CR en modo calefacción, por lo tanto, queda definido a partir de la ecuación número 19.

```

' cálculo de la relación de capacidad CR
For i = 13 To 16
  If cells(i, 5) >= 0.9 * cells(i, 4) And cells(i, 5) <= 1.1 * cells(i, 4) Then
    cells(i, 999) = cells(i, 4)
  Else
    cells(i, 999) = cells(i, 5)
  End If
  cells(i, 8) = cells(i, 4) / cells(i, 999)
  If cells(i, 8) >= 1 Then
    cells(i, 8) = 1
  End If
Next i

```

Figura 48. Programación código cálculo de la relación de capacidad CR.

Por otro lado, si CR es mayor o igual a 1, entonces CR tomara un valor igual a 1.

Para realizar las interpolaciones/extrapolaciones de potencia y EER, para completar nuestra tabla de cálculo de intervalos, tenemos las condiciones para la capacidad de refrigeración y EER, las cuales se encuentran planteadas en las tablas 16 y 17 respectivamente.

Tabla 16. Condiciones para interpolaciones/extrapolaciones de la capacidad de refrigeración.

Condiciones	Capacidad de refrigeración bomba de calor
i = 30 a 32	$\frac{[(P_{C_D} - P_{C_C}) * (T_j - T_D)]}{(T_D - T_C) + P_{C_D}}$
i = 34 a 37	$\frac{[(P_{C_D} - P_{C_C}) * (T_j - T_D)]}{(T_D - T_C) + P_{C_D}}$
i = 39 a 42	$\frac{[(P_{C_B} - P_{C_C}) * (T_j - T_B)]}{(T_B - T_C) + P_{C_B}}$
i = 44 a 47	$\frac{[(P_{C_A} - P_{C_B}) * (T_j - T_A)]}{(T_A - T_B) + P_{C_A}}$
i = 49 a 53	$\frac{[(P_{C_A} - P_{C_B}) * (T_j - T_A)]}{(T_A - T_B) + P_{C_A}}$

Tabla 17. Condiciones para interpolaciones/extrapolaciones del EER.

Condiciones	EER
EER antes de D	EER_D
EER entre D y C	$\frac{[(EER_D - EER_C) * (T_j - T_D)]}{(T_D - T_C) + EER_D}$
EER entre C y B	$\frac{[(EER_B - EER_C) * (T_j - T_B)]}{(T_B - T_C) + EER_B}$
EER entre B y A	$\frac{[(EER_A - EER_B) * (T_j - T_A)]}{(T_A - T_B) + EER_A}$
EER después de A	EER_A

Para realizar el cálculo del SEERon de referencia solo basta con realizar la sumatoria de celdas de la demanda anual de refrigeración y consumo anual de electricidad y luego realizar la división entre ellos tal como se planteó anteriormente para el cálculo del SCOPon.

```
'cálculo del SEERon
cells(54, 9) = "=sum(i30:i53)"
cells(54, 10) = "=sum(j30:j53)"
cells(9, 8) = cells(54, 9) / cells(54, 10)
SEERon = cells(9, 8)
```

Figura 49. Programación cálculo SEERon.

Se procede a realizar los cálculos de los consumos de energía auxiliar, para esto, se define en primera instancia $Aux = 0$, luego por medio de un ciclo For que va desde la celda $i = 21$ a la 24, además se agrega un If que verificará si se elige el modo solo refrigeración, cuando esto sucede, se hará uso de la ecuación 20, tal como se aplicó anteriormente en el cálculo del SCOP.

Por lo tanto, Aux pasará a tener el valor de $Aux + P \cdot h$, en caso contrario, mediante un Else, nos entregará el valor de $P \cdot h$ para las unidades en modo reversible, realizando el cálculo de igual manera que para el modo solo refrigeración, solo que esta vez, con las celdas y las horas correspondientes para el modo reversible.

```
'cálculo de los consumos de energía auxiliar
Aux = 0
For i = 21 To 24
  If Mode = "solo refrigeración" Then
    cells(i, 4) = cells(i, 2) * cells(i, 3) / 1000
    Aux = Aux + cells(i, 4)
  Else
    cells(i, 9) = cells(i, 7) * cells(i, 8) / 1000
    Aux = Aux + cells(i, 9)
  End If
Next i
```

Figura 50. Programación cálculos de los consumos de energía auxiliar.

Para calcular el consumo anual de energía, se realiza mediante la ecuación:

$$QCE = \frac{QC}{SEERon + Aux} \quad (23)$$

Luego se genera el código de programación a partir de la ecuación 23, como, se muestra a continuación en la figura 51.

```
'cálculo del consumo anual de energía
cells(9, 10) = (QC / SEERon) + Aux
QCE = cells(9, 10)
```

Figura 51. Programación cálculos del consumo anual de energía auxiliar.

Finalmente, para calcular el valor del SEER, solo basta con aplicar la ecuación 9, y traspasarla a lenguaje de programación, de tal manera que el código de programación queda:

```
'cálculo del SEER
cells(9, 9) = QC / QCE
SEER = cells(9, 9)
```

Figura 52. Programación cálculo SEER.

Para programar la etiqueta energética, se realizó de igual manera que en el caso del SCOP, solo que en este caso verificara los rangos del SEER, para luego entregar la calificación correspondiente a través de un mensaje en la pantalla.

Finalmente, solo queda ingresar los datos proporcionados por el fabricante, en este caso, los del ejemplo del anexo E de la norma UNE 14825-2016, el cual será resuelto en el anexo D de este trabajo. Luego de ingresados solo basta con hacer clic en calcular, para obtener de manera automática los resultados del rendimiento estacional de la bomba de calor en cuestión, además de su calificación según la etiqueta energética definida por la norma.

Anexo D: Resolución ejemplo Anexo E Norma UNE 14825-2016, cálculo SEER resuelto por la herramienta desarrollada.

En primer lugar, nos encontraremos con la interfaz mostrada en la figura 53, donde podremos seleccionar el modo de funcionamiento (solo refrigeración o reversible) y el control de capacidad (fija, etapas, variable).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Cálculo de la eficiencia energética de las bombas de calor en modo refrigeración									
2										
3	Product designation			Condiciones de referencia						
4	Fabricante	Norma UNE1485		Clima	—		Calcular		Reiniciar	
5	Referencia del producto	EJEMPLO ANEXO E		Tdesignc	35	°C				
6	Tipo de Bomba de Calor	aire/aire		Pdesignc		kW				
7	Modo Funcionamiento	reversible		H _{CE}	350	horas				
8	Control de Capacidad	variable		Q _c		kWh				
9										
10										
11	Datos de Rendimiento									
12	Condición	Temperatura aire exterior (°C)	Coefficiente Carga Parcial (%)	Carga Parcial (kW)	Potencia Declarada (kW)	EER _d	C _{oc}	CR	EER _{0,95}	
13	A	35								
14	B	30								
15	C	25								
16	D	20								
17										
18	Consumo de energía auxiliar									
19	Modos de funcionamiento									
20	Sólo refrigeración		Horas	Potencia entrada (kW)	P * h (kWh)	Reversible		Horas	Potencia entrada (kW)	P * h (kWh)
21	Termostato off		221			Termostato off		221		
22	Stand by		2142			Stand by		2142		
23	Modo apagado		5088			Modo apagado		0		
24	Crankase heater		7760			Crankase heater		2672		

Figura 53. Interfaz herramienta de cálculo.

Luego solo basta con rellenar las celdas coloreadas con los datos entregados por el fabricante (datos de rendimiento), mientras que en el apartado de consumo de energía auxiliar se completaran los datos, según seleccionemos, en este caso reversible.

En la figura 54, se observan los datos ya ingresados, ahora solo basta con presionar el botón calcular para obtener los resultados solicitados, el autocompletado de las tablas y la etiqueta de calificación energética, tal como se puede ver en la figura 55.

Cálculo de la eficiencia energética de las bombas de calor en modo refrigeración									
Product designation			Condiciones de referencia			Calcular		Reiniciar	
Fabricante	Norma UNE1485		Clima	—					
Referencia del producto	EJEMPLO ANEXO E		Tdesignc	35	°C				
Tipo de Bomba de Calor	aire/aire		Pdesignc	3,5	kW				
Modo Funcionamiento	reversible		H _{CE}	350	horas	Eficiencia energética			
Control de Capacidad	variable		Q _c		kWh	SEERon	SEER	Q _{CE} (kWh)	
Datos de Rendimiento									
Condición	Temperatura aire exterior (°C)	Coefficiente Carga Parcial (%)	Carga Parcial (kW)	Potencia Declarada (kW)	EER _d	C _{oc}	CR	EER _{bin}	
A	35			3,50	3,00	0,25			
B	30			2,58	3,50	0,25			
C	25			1,95	4,00	0,25			
D	20			2,03	4,50	0,25			
Consumo de energía auxiliar									
Modos de funcionamiento									
Sólo refrigeración		Horas	Potencia entrada (kW)	P * h (kWh)	Reversible	Horas	Potencia entrada (kW)	P * h (kWh)	
Termostato off	221				Termostato off	221	49		
Stand by	2142				Stand by	2142	13		
Modo apagado	5088				Modo apagado	0	0		
Crankcase heater	7760				Crankcase heater	2672	0		

Figura 54. Ingreso de datos en la interfaz de herramienta.

Cálculo de la eficiencia energética de las bombas de calor en modo refrigeración									
Product designation			Condiciones de referencia			Calcular		Reiniciar	
Fabricante	Norma UNE1485		Clima	—					
Referencia del producto	EJEMPLO ANEXO E		Tdesignc	35	°C				
Tipo de Bomba de Calor	aire/aire		Pdesignc	3,5	kW				
Modo Funcionamiento	reversible		H _{CE}	350	horas	Eficiencia energética			
Control de Capacidad	variable		Q _c	1225	kWh	SEERon	SEER	Q _{CE} (kWh)	
						3,67	3,29	373	
Datos de Rendimiento									
Condición	Temperatura aire exterior (°C)	Coefficiente Carga Parcial (%)	Carga Parcial (kW)	Potencia Declarada (kW)	EER _d	C _{oc}	CR	EER _{bin}	
A	35	100	3,50	3,50	3,00	0,25	1,00	3,00	
B	30	74	2,58	2,58	3,50	0,25	1,00	3,50	
C	25	47	1,66	1,95	4,00	0,25	0,85	3,85	
D	20	21	0,74	2,03	4,50	0,25	0,36	3,78	

Microsoft Excel

Calificación Energética: E

Aceptar

Figura 55. Ejemplo resuelto por la herramienta.