



**UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE LAS AMÉRICAS**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTROMECÁNICA**

**DISEÑO DE SISTEMA IDÓNEO PARA EL SECADO DE  
GRANOS DE CAFÉ EN COSTA RICA, CUYO  
FUNCIONAMIENTO PARTA DE LA UTILIZACIÓN DE  
ENERGÍAS RENOVABLES**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN PARA OPTAR POR EL  
GRADO DE BACHILLERATO EN INGENIERÍA  
ELECTROMECÁNICA**

**ELABORADO POR  
FRANCISCO JAVIER VALVERDE ARAYA**

**SAN JOSÉ, JULIO, 2021.**

## Contenido general

Contenido general .....	2
Contenido de tablas.....	6
Contenido de ecuaciones .....	7
Contenido de figuras .....	8
Contenido de gráficos.....	9
Lista de Anexos (Información extraída de la bibliografía) .....	9
Lista de Apéndices (Elaboración propia).....	10
<i>Dedicatoria</i> .....	11
<i>Agradecimientos</i> .....	12
Resumen Ejecutivo .....	13
Términos importantes.....	15
Notación .....	18
Subíndices.....	19
Letras griegas.....	19
<b>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>20</b>
<b>Planteamiento del problema</b> .....	<b>20</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>20</b>
Objetivo general.....	20
Objetivos específicos.....	20
<b>Justificación</b> .....	<b>21</b>
<b>Antecedentes</b> .....	<b>24</b>
Internacionales.....	24
Nacionales.....	30
<b>Proyecciones</b> .....	<b>36</b>
<b>Limitaciones</b> .....	<b>37</b>
<b>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>38</b>
<b>Procesos de beneficio del café</b> .....	<b>38</b>
Recolección .....	38
Transporte de la fruta.....	38

Recibo de café en el beneficio .....	39
Clasificación de café fruta.....	40
Despulpado de la fruta .....	40
<b>Etapa de secado del grano de café.....</b>	<b>40</b>
Métodos de secado de café.....	44
Conceptos relevantes del secado de café.....	47
Tipos de secadores de café.....	52
<b>Termodinámica .....</b>	<b>54</b>
Primera ley de la termodinámica. ....	55
Segunda ley de la termodinámica. ....	55
<b>Gases .....</b>	<b>56</b>
Presión parcial .....	56
Ley de Dalton.....	56
Presión de vapor.....	57
Ecuación de estado para gases ideales.....	57
<b>Principios de la Psicrometría, acondicionamiento del aire y sus aplicaciones. ....</b>	<b>57</b>
Propiedades del aire.....	58
Propiedades del vapor de agua .....	58
Aire seco y aire atmosférico .....	58
Aire saturado.....	59
Humedad relativa .....	59
Humedad absoluta .....	60
Punto de rocío .....	60
Entalpía de la mezcla vapor de agua y aire.....	61
Temperatura de bulbo seco .....	61
Temperatura de bulbo húmedo .....	61
Densidad.....	62
Volumen específico .....	62
Energía estática y baja humedad <sup>3</sup> .....	62
Carta psicrométrica .....	62
Procesos de acondicionamiento del aire .....	63
Calentamiento y enfriamiento simples ( $\omega = \text{constante}$ ).....	64

Deshumidificación del aire .....	65
Enfriamiento evaporativo o humidificación adiabática .....	67
<b>Diagramas de Mollier</b> .....	69
Principios termodinámicos .....	70
Diagrama Presión-Entalpía .....	72
Utilización del diagrama presión-entalpía para circuitos de refrigeración .....	73
<b>Energía Solar (Captación Térmica)</b> .....	76
Tipos de captación .....	77
Funcionamiento de un captador solar .....	78
.....	79
Colectores solares de placa plana .....	79
Colectores solares de tubos al vacío .....	82
<b>Diferencia entre tiempo y clima</b> .....	84
Tiempo .....	85
Clima .....	86
<b>Series de tiempo</b> .....	89
Aplicaciones de series de tiempo .....	90
Componentes de una serie de tiempo: Enfoque clásico .....	91
Series climáticas .....	92
<b>Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)</b> .....	95
<b>Control automático</b> .....	96
Definiciones .....	96
Ejemplos de sistemas de control .....	100
Control en lazo cerrado en relación con control en lazo abierto .....	102
Transductores de temperatura. ....	105
Pocillos térmicos. ....	110
Lazos de control de dos y cuatro hilos .....	111
Elementos finales de control. ....	112
Equipos de proceso. ....	119
<b>Tarifas Eléctricas COOPESANTOS R.L</b> .....	121
<b>Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN)</b> .....	121
Cálculo de la TIR .....	121

La regla de la TIR.....	122
Cálculo del valor actual neto (VAN).....	123
<b>CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO .....</b>	<b>125</b>
<b>Enfoque de la investigación .....</b>	<b>125</b>
<b>Método de la investigación.....</b>	<b>126</b>
Tesis de investigación documental (teórica) .....	126
Tesis de investigación de campo (práctico) .....	126
Tesis combinada (investigación documental y de campo) .....	126
<b>Fuentes de información.....</b>	<b>127</b>
<b>VARIABLES O UNIDADES DE ANÁLISIS.....</b>	<b>129</b>
<b>Instrumentos .....</b>	<b>132</b>
<b>Proceso para la recolección y análisis de datos .....</b>	<b>133</b>
<b>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>136</b>
<b>Descripción de la empresa .....</b>	<b>136</b>
<b>Definición del diseño .....</b>	<b>137</b>
<b>Desarrollo.....</b>	<b>137</b>
Determinación de los parámetros y requerimientos del correcto secado de café. ....	137
Análisis psicométrico. ....	140
Cálculo de requerimientos energéticos y flujo de aire. ....	146
Selección de equipo (etapa de deshumidificación del aire).....	150
Selección de equipo y dimensionamiento del sistema termosolar (etapa de calentamiento del aire). .....	152
Propuestas de diseño de control automático para el sistema de secado de café. ....	163
<b>Análisis financiero .....</b>	<b>171</b>
<b>CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	<b>183</b>
<b>Conclusiones .....</b>	<b>183</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>186</b>
<b>CAPÍTULO VI: PROPUESTA .....</b>	<b>187</b>
<b>Descripción .....</b>	<b>187</b>
<b>Propuesta .....</b>	<b>187</b>
Propuesta de control .....	188
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>195</b>

ANEXOS.....	202
APÉNDICES .....	217

### Contenido de tablas

Tabla 1. Parámetros de diversos detectores de temperatura resistivos.....	107
Tabla 2. Termopares comunes y su designación de acuerdo con las normas ANSI. ....	110
Tabla 3. Ejemplo flujos de efectivo. ....	122
Tabla 4. Fuentes de información. ....	127
Tabla 5. % Humedad en base húmeda del café pergamino. ....	137
Tabla 6. Carga de café pergamino húmedo a secar. ....	138
Tabla 7. Cantidad de humedad a extraer de la carga.....	139
Tabla 8. Temperatura máxima a la cual se puede someter el grano de café.....	139
Tabla 9. Análisis psicrométrico: punto 1. ....	142
Tabla 10. Análisis psicrométrico: punto 2. ....	142
Tabla 11. Análisis psicrométrico: punto 3. ....	143
Tabla 12. Análisis psicrométrico: punto 4. ....	144
Tabla 13. Masa de aire requerida en la etapa (3-4), para el secado del café.....	146
Tabla 14. Cálculo del flujo volumétrico de aire seco requerido para un tiempo determinado de secado. ....	147
Tabla 15. Flujo másico a deshumidificar.....	148
Tabla 16. Energía requerida, etapa de enfriamiento del aire con deshumidificación (1-2). ....	149
Tabla 17. Potencia termosolar requerida, etapa de calentamiento del aire sin deshumidificación. ....	150
Tabla 18. Cálculo de la eficiencia EFF ( $\eta$ ) del colector solar y los Watts hora por metro cuadrado. ....	156
Tabla 19. Colector solar tubos de vacío, Total Q/S (Wh/m <sup>2</sup> al día) por mes. ....	157
Tabla 20. Cálculo de área del campo solar (m <sup>2</sup> ) y cantidad de colectores (unidades). ....	159
Tabla 21. Cálculo de la eficiencia EFF ( $\eta$ ) del colector solar de placa plana y los Watts hora por metro cuadrado. ....	161
Tabla 22. Colector solar de placa plana, Total Q/S (Wh/m <sup>2</sup> al día) por mes. ....	162
Tabla 23. Cálculo de área del campo solar (m <sup>2</sup> ) y cantidad de colectores (unidades). ....	163
Tabla 24. Propuesta de control 1.....	165
Tabla 25. Propuesta de control 2.....	166
Tabla 26. Propuesta de control 3.....	167
Tabla 27. Comparación de los elementos finales de control.....	169
Tabla 28. Comparación de transductores.....	170
Tabla 29. Tipo de cambio.....	172
Tabla 30. Costo y facturación promedio por temporada. ....	172
Tabla 31. Estimación costo y facturación promedio por guardiola. ....	173
Tabla 32. Inversión inicial. ....	173
Tabla 33. Mantenimiento preventivo anual.....	174

<b>Tabla 34. Potencia consumida por el equipo.</b> .....	174
<b>Tabla 35. Tarifas eléctricas Coopesantos R.L.</b> .....	175
<b>Tabla 36. Cantidad de horas valle y punta, según las 8 horas de operación</b> .....	175
<b>Tabla 37. Total de facturación por consumo eléctrico al mes</b> .....	176
<b>Tabla 38. Consumo eléctrico total por mes.</b> .....	177
<b>Tabla 39. Estimación costo y facturación por temporada, nuevo sistema de secado</b> .....	178
<b>Tabla 40. Resumen costo y facturación sistema actual y sistema nuevo</b> .....	179
<b>Tabla 41. Flujo neto de efectivo.</b> .....	180
<b>Tabla 42. VAN de ahorro, VAN de proyecto y TIR.</b> .....	181
<b>Tabla 43. Tiempo de recuperación del proyecto</b> .....	182
<b>Tabla 44. Variables del diagrama de bloques del sistema de control en cascada temperatura - flujo.</b> .....	191

### Contenido de ecuaciones

<b>Ecuación 1. Humedad en base húmeda</b> .....	41
<b>Ecuación 2. Humedad en base seca</b> .....	41
<b>Ecuación 3. Ecuación de energía</b> .....	55
<b>Ecuación 4. Ecuación de energía</b> .....	55
<b>Ecuación 5. Ley de las presiones parciales o ley de Dalton</b> .....	56
<b>Ecuación 6. Ecuación de estado para gases ideales</b> .....	57
<b>Ecuación 7. Gases ideales a presión y temperatura constante</b> .....	57
<b>Ecuación 8. Presión del aire atmosférico</b> .....	59
<b>Ecuación 9. Humedad relativa</b> .....	60
<b>Ecuación 10. Humedad absoluta</b> .....	60
<b>Ecuación 11. Temperatura o punto de rocío</b> .....	61
<b>Ecuación 12. Entalpía</b> .....	61
<b>Ecuación 13. Densidad</b> .....	62
<b>Ecuación 14. Volumen específico</b> .....	62
<b>Ecuación 15. Conservación de la masa del aire seco</b> .....	64
<b>Ecuación 16. Conservación de la masa del agua</b> .....	64
<b>Ecuación 17. Conservación de la energía calentamiento simple</b> .....	65
<b>Ecuación 18. Balance de masa del aire seco</b> .....	66
<b>Ecuación 19. Balance de masa del agua</b> .....	67
<b>Ecuación 20. Balance de energía</b> .....	67
<b>Ecuación 21. Balance de masa del aire seco</b> .....	69
<b>Ecuación 22. Incremento del flujo másico de vapor de agua en el aire seco</b> .....	69
<b>Ecuación 23. Velocidad de giro de un motor de corriente alterna.</b> .....	118
<b>Ecuación 24. Cálculo de la TIR</b> .....	121
<b>Ecuación 25. Ejemplo cálculo de la TIR</b> .....	122
<b>Ecuación 26. Valor presente (VP)</b> .....	123
<b>Ecuación 27. Valor presente neto (VPN)</b> .....	123

Ecuación 28. Valor presente (VP) para varios periodos.....	124
Ecuación 29. Eficiencia del proceso de humidificación adiabática.....	144
Ecuación 30. Cálculo de la masa de aire total requerida.....	146
Ecuación 31. Cálculo del flujo másico.....	147
Ecuación 32. Eficiencia de transferencia térmica de un colector termosolar.....	153
Ecuación 33. Cálculo de Watts hora por metro cuadrado.....	155
Ecuación 34. Cálculo área del campo solar.....	158
Ecuación 35. Cálculo cantidad de colectores (unidades).....	158
Ecuación 36 %Área disponible utilizada.....	159
Ecuación 37. Total kW/h/día.....	176
Ecuación 38. Total kW/h/mes.....	176
Ecuación 39. Facturación al mes, horas valle (¢).....	177
Ecuación 40. Facturación al mes, horas punta (¢).....	177
Ecuación 41. Total de facturación al mes (¢).....	177

### Contenido de figuras

Figura 1 Alternativas de secamiento del café.....	44
Figura 2 Sistemas de secado utilizados en Costa Rica.....	47
Figura 3. Límites seguros, según temperatura y tiempo.....	51
Figura 4 Dirección de los procesos de acondicionamiento del aire en la carta psicrométrica.....	63
Figura 5 Calentamiento simple.....	64
Figura 6 Enfriamiento con deshumidificación.....	66
Figura 7. Enfriamiento evaporativo.....	68
Figura 8. Diagrama de presión-temperatura del fluido refrigerante R-744.....	71
Figura 9 Diagrama de Mollier presión-entalpía del fluido refrigerante R-744.....	72
Figura 10 Diagrama presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744 (Adaptada de Coolpack® Software).....	73
Figura 11. Circuito de refrigeración cuyos puntos se representan en el diagrama de Mollier presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744.....	76
Figura 12. Efecto invernadero.....	78
Figura 13. Efecto invernadero dentro del captador solar.....	79
Figura 14. Colector solar de placa plana.....	80
Figura 15. Corte transversal de un colector de placa plana.....	81
Figura 16. Colector Solar de tubos al vacío.....	83
Figura 17. Funcionamiento de un colector de tubos de vacío.....	84
Figura 18. Ejemplo de fenómeno de tiempo meteorológico: huracán Newton (categoría 1).....	86
Figura 19. Ejemplo de fenómeno en la escala de clima, mapa de los cambios de temperatura de la superficie terrestre de 1901 a 2012.....	87
Figura 20. Ejemplo de variabilidad interanual: Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur.....	88
Figura 21. Componentes de una serie de tiempo (Demanda vs Tiempo).....	92
Figura 22. Temperatura media registrada en Madrid-Retiro (Enero 1989 – Diciembre 2001).....	94
Figura 23. Volumen de flujo anual del río Nilo en Asuán (1871 – 1970).....	94
Figura 24. Sistema de control de velocidad.....	101

Figura 25. Sistema de control de temperatura .....	102
Figura 26. Comparación entre distintos transductores de temperatura. ....	108
Figura 27. Diagrama de instalación de un detector en un pocillo térmico. ....	110
Figura 28. Curva de respuesta del detector con y sin pocillo. ....	111
Figura 29. Lazo de 2 hilos con transmisor de presión diferencial e indicador. ....	112
Figura 30. Cuerpo de una válvula y sus parte principales. ....	113
Figura 31. Cuerpos de válvulas con movimiento lineal. ....	114
Figura 32. Tipos de obturadores para válvulas de doble y simple asiento. ....	115
Figura 33. Curvas características de las válvulas más utilizadas. ....	116
Figura 34. Diagrama de bloques de un sistema de control en cascada. ....	117
Figura 35. Diagrama de bloques de un variador. ....	118
Figura 36. Curvas de la bomba y del circuito. ....	120
Figura 37. Instalación de un variador de velocidad. ....	121
Figura 38. Captura satelital: Ubicación Beneficio de Palmichal CECA S.A. ....	136
Figura 39. Área disponible de la nave industrial (m <sup>2</sup> ). ....	160
Figura 40. Horas valle y punta de operación del sistema. ....	175
Figura 42. Diagrama de bloques, sistema de control en cascada temperatura-flujo. ....	191
Figura 43. Esquema: lógica de funcionamiento del sistema de control. ....	193
Figura 44. Elementos del esquema de control. ....	194

### Contenido de gráficos

Gráfico 1 Temperatura del aire de secado (70° C) vs temperatura del café, en relación con el tiempo .....	49
Gráfico 2. Temperatura del aire de secado (90° C) vs temperatura del café, en relación con el tiempo .....	50
Gráfico 3. Carta psicrométrica: funcionamiento del sistema de secado. ....	141
Gráfico 4. Colector solar tubos de vacío (Wh/m <sup>2</sup> al día) según el mes. ....	157
Gráfico 5. Colector solar de placa plana (Wh/m <sup>2</sup> al día) según el mes. ....	162

### Lista de Anexos (Información extraída de la bibliografía)

Anexo A. Comportamiento de las Tarifas Eléctricas en cada país .....	202
Anexo B. Carta psicrométrica a 1 atm de presión total. ....	203
Anexo C. Diagrama de Mollier para el agua. ....	204
Anexo D. Interfaz de interacción, herramienta de radiación solar (PVGIS) .....	205
Anexo E. Tarifas eléctricas Coopesantos R.L .....	206
Anexo F Ficha técnica deshumidificador industrial, fabricante Alto .....	207
Anexo G Representación gráfica del equipo, fabricante Alto .....	208
Anexo H Deshumidificador industrial, fabricante Alto .....	209
Anexo I Deshumidificador industrial, fabricante Fisair, modelo IT 1900 .....	210
Anexo J Precios en (euros), modelos Fisair .....	211
Anexo K Funcionamiento deshumidificador industrial, fabricante Fisair .....	211

<b>Anexo L Vida útil, modelos del fabricante Fisair</b> .....	212
<b>Anexo M Esquema de funcionamiento deshumidificador industrial por rotor desecante, fabricante Fisair, modelo DFLEX2900V</b> .....	212
<b>Anexo N Principio operativo rotor desecante, fabricante Fisair</b> .....	213
<b>Anexo O Temperatura ambiente en °C (perfil de temperatura media diaria) e irradiancia global sobre plano fijo [W/m<sup>2</sup>]. Obtenidos a través de la base de datos PVGIS</b> .....	214
<b>Anexo P Colector solar tubos de vacío, modelo vitosol 300-TM</b> .....	215
<b>Anexo Q Colector solar de placa plana, modelo SACLIMA L-21</b> .....	216

### **Lista de Apéndices (Elaboración propia)**

<b>Apéndice A Valores del cálculo energético del sistema termosolar (Modelo Vitosol)</b> .....	217
<b>Apéndice B Valores del cálculo energético del sistema termosolar (Modelo Saclima)</b> .....	218

### ***Dedicatoria***

*Primeramente, a Dios, el cual sin duda alguna debe ser parte de este espacio, quien al final del día está y estuvo presente en cada una de las incontables experiencias vividas a lo largo de este proceso que muchas veces parecía interminable.*

*A mi madre, Rosaura Araya Ureña, quien me enseñó con su amor por la cosas simples y por la familia, el espíritu luchador, que aquellas cosas buenas que soñamos no van a llegar por sí solas a nuestras vidas, sino que debemos salir a luchar por ellas, con constancia y disciplina, sin temor alguno y teniendo la confianza en que todo va a andar bien.*

*A mi Padre, Manuel Alberto Valverde Fallas, quien me ha marcado y demostrado con su honradez, sencillez y humildad que el dinero no lo es todo en la vida y que la verdadera felicidad se encuentra al tener a las personas queridas.*

*A mis hermanos, José Manuel y Luis Ángel, quienes, aún con nuestras diferencias, han demostrado su lealtad en un sin fin de ocasiones, en cada uno los buenos momentos vividos y no menos importante, aquellos en tiempo de confusión e incertidumbre.*

## ***Agradecimientos***

*Le doy gracias a Dios, porque fue el quien me dio la fuerza, capacidad y las condiciones necesarias que permitieron llegar hasta aquí.*

*Doy infinitas gracias a mis padres, quienes siempre creyeron, confiaron en cada una de las decisiones tomadas y me apoyaron en todas las formas humanamente posibles para poder concluir esta etapa de mi vida e iniciar otras más.*

*El profundo agradecimiento a mis hermanos, quienes fueron en gran parte el motor para salir adelante, disfrutando y afrontando las diferentes experiencias y retos encontrados durante este proceso, dando siempre sus mejores consejos para darme aliento.*

*Mis sinceros agradecimientos a cada uno de los Profesores que formaron parte de esta experiencia, en especial quienes adicional a la enseñanza académica, al compartir con humildad y dedicación sus conocimientos, instruyeron carácter, humanidad y, lo más importante, a disfrutar lo que hacemos.*

*Asimismo, a personas queridas que ya no están en esta vida, pero sí estuvieron lo suficiente para cumplir el propósito que tenían en esta y dejaron una enseñanza o consejo que me servirán a lo largo de mi vida.*

*Por último, a toda mi familia, amigos, compañeros y aquellas personas que de forma directa o indirecta se hicieron parte de este proceso, ya que sería injusto no reconocerlo, porque algo así no se logra si marchamos solos.*

## Resumen Ejecutivo

En el presente trabajo final de graduación se desarrolla una propuesta de diseño de un sistema idóneo para el secado de café en Costa Rica, cuyo funcionamiento parte de la utilización de energías renovables. El proceso de secado de granos tales como café, arroz o cacao implican para los productores grandes cantidades de tiempo y dinero, por lo tanto, la adaptación de sistemas de nuevas tecnologías basadas en energías renovables podría potenciar la competitividad de los sectores productivos agrícolas en el país.

El diseño tendrá como fundamento los parámetros y requerimientos que se deben cumplir para un correcto secado del grano de café según los lineamientos exigidos en el mercado actual para su comercialización, con el cual se busca el resguardo de una buena calidad en el producto final. También así se analizarán las necesidades, o bien debilidades, que presentan los procesos y sistemas actualmente implementados, con el fin de lograr un diseño con características más favorables en esta etapa del beneficio del café. El proyecto tomará como objeto de estudio parte de las características de la nave industrial, recolección de datos y los sistemas de secado ya implementados en el Beneficio de Palmichal CECA S.A ubicado en Palmichal de Acosta, San José, el cual pertenece a Neumann Kaffee Gruppe de Alemania.

Una vez investigado y determinado tanto los parámetros como requerimientos se realizará un estudio de la interacción entre la energía y las variables que mayor efecto tienen en esta etapa del procesado de café. Esta parte del proyecto es fundamental en el diseño del secador, ya que por el tipo de clima tropical que presenta el país, hay una clara dependencia de las condiciones climatológicas en el proceso de secado, esto al utilizar el aire atmosférico como elemento fundamental para la deshumidificación de los granos de café.

Según lo expuesto en el párrafo anterior, se utilizará en el diseño un tipo de cámara de enfriamiento, esto con el propósito de purificar el aire atmosférico, ya que este, tendrá variaciones tanto en su humedad relativa como en la temperatura según las condiciones del clima que presenta el día en el cual se está operando el secador. De dicha forma, se buscará obtener un aire seco a partir de la deshumidificación de este, al someterlo a bajas temperaturas, a tal extremo de alcanzar el punto de rocío y se dé la condensación.

Acá es necesario mencionar que se tiene un punto a favor, debido a que el proceso de producción y beneficio del café en la zona de estudio se da durante la estación seca del país, favoreciendo la implementación de tecnologías limpias como los colectores solares. Estos últimos serán los encargados de proporcionar la energía termosolar dando la temperatura necesaria al aire seco, por consiguiente, aumentando su capacidad de absorción o arrastre de la humedad, siendo el objetivo principal un secador de café.

Una de las principales características de un correcto secado de granos de café, es la homogeneidad con la cual se da la deshumidificación en la totalidad de los granos o masa de café, por este motivo se incluirá en el diseño el uso de un ventilador que, a partir del flujo forzado, alcanzará esta condición y agregado a esto, la utilización de una cámara de secado rotatoria tipo

guardiola que se encarga del constante movimiento de los granos sin la necesidad del factor humano para dicha acción.

Por otra parte, se dimensionará el sistema de tal modo que se logre un ambiente controlado de acuerdo con el análisis realizado y que, eventualmente, permita su adaptación a otros procesos de secado. También así se seleccionarán equipos que favorezcan un máximo aprovechamiento de la energía termosolar durante el proceso, así como el correcto ajuste según las condiciones en las cuales se va a operar el sistema. Una vez seleccionado los equipos según requerimientos, se procederá a proponer un diseño para el sistema de control automático.

Para dar punto final al proyecto, se llevará acabo el análisis financiero, con el propósito de determinar desde el punto de vista económico la viabilidad de implementar el secador de café.

### Términos importantes

Término	Definición
ICAFFE	Instituto del café de Costa Rica
Cenicafé	Centro Nacional de Investigación del Café (Colombia)
Camas africanas	Estas mantienen las cerezas de café alejadas del suelo y permiten la circulación del aire de una forma más fácil.
Café oro	Nombre que recibe el grano de café posterior a que se le haya separado las distintas envolturas a través del proceso de descascarillado. Este es el tipo de café que se encuentra listo para ser tostado y posteriormente molido.
Catimor	Planta de producción precoz y alto rendimiento; resistente a la roya de la hoja del cafeto. Bien adaptada a altitudes bajas y medianas. Se encuentra principalmente en Puerto Rico.
Criba	Máquina para clasificar el café pergamino húmedo después de pasar los despulpadores.
Hitos	Poste de piedra o cualquier señal clavada en el suelo que sirve para marcar el límite de un territorio o de una propiedad, o para indicar las distancias o la dirección en un camino.
Istmo	Franja alargada y estrecha de terreno que une dos continentes, dos partes diferenciadas de un continente, o una península y un continente.
Monzón	Viento que sopla en Asia meridional los meses de invierno, del continente hacia el océano con

	dirección nordeste y, los de verano, del océano al continente con dirección sudoeste.
Parámetro	Elemento o dato importante desde el que se examina un tema, cuestión o asunto.
Parihuelas	Bandejas utilizadas en fincas pequeñas de América y África para secar el café, las cuales se exponen al sol y al atardecer se guardan bajo techo.
Proceso batch	También conocido como proceso por lotes.
Requerimiento	Petición de una cosa que se considera necesaria, especialmente el que hace una autoridad.
Secado con oreado	Es un método de secado del agua retenida entre los granos y en la superficie del pergamino, la cual es removida por la acción de un secado superficial muy rápido, en el que el grano es llevado a un contenido de humedad del orden del 48 %.
Título de vapor o calidad	Es la fracción másica del vapor en la mezcla líquido-vapor, de tal forma que el vapor seco equivale a un título igual a 1, es decir, 100% vapor. Mientras que valores entre 0 y 1 indican un contenido de agua en la mezcla, siendo el valor de 0 para el líquido saturado.
Trillado de café fruta	La trilla es uno de los procesos industriales más importantes que se le aplican al café. Consiste en remover la cáscara del grano en pergamino o cereza seca hasta transformarlo

---

	a café oro, listo para tostarlo, molerlo y finalmente consumirlo.
Bericos	Equipo utilizado para el secado de café, el cual funciona siguiendo el mismo principio de la secadora vertical, donde la diferencia se encuentra en la técnica empleada para la generación del aire caliente, en el caso de las bericos, cuentan con un horno de biomasa independiente para cada una de ellas.
Precio FOB	Valor en dinero de una mercancía en el puerto de salida de su país de origen. Es el valor en que se vende la mercancía en la fábrica más los gastos (transporte interno, impuestos de salida, carga, entre otros) para llevarlo al puerto de salida, según la definición vigente establecida por la Cámara de Comercio Internacional para los Incoterms. (Procuraduría General de la república, 2005)
Precio CIF	Valor en dinero de una mercancía en el puerto de ingreso en Costa Rica, este precio se compone del valor FOB más el transporte desde el país de origen a Costa Rica, más gastos (seguros, descarga, entre otros) para ponerlo en el puerto de entrada en Costa Rica según la definición vigente establecida por la Cámara de Comercio Internacional para los Incoterms. (Procuraduría General de la república, 2005)

---

### Notación

Símbolo	Definición
$\dot{Q}$	Tasa de transferencia de calor (kW)
$\dot{m}$	Tasa de flujo de masa (kg/s)
E	Energía (J)
h	Entalpía específica, $u + Pv$ , (kJ/kg)
m	Masa (kg)
P	Presión absoluta (KPa)
$P_v$	Presión de vapor (kPa)
R	Constante del gas ( $\text{kJ kg}^{-1}\cdot\text{k}^{-1}$ )
T	Temperatura absoluta ( $^{\circ}\text{K}$ )
$T_{bh}$	Temperatura de bulbo húmedo ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{bs}$	Temperatura de bulbo seco ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_n$	Tonelada
$T_{pr}$	Temperatura de punto de rocío
v	Volumen específico ( $\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ )
V	Volumen total ( $\text{m}^3$ )
Q	Transferencia de calor (kJ)
W	Trabajo realizado desde o sobre el sistema (J)
n	Número de moles de gas
q	Transferencia de calor por unidad de masa (kJ/kg)

### Subíndices

Subíndice	Definición
1	estado inicial o a la entrada
2	estado final o a la salida
a	aire
g	vapor saturado
masa	masa transferida del sólido al aire
sal	condiciones de salida
sat	saturado
$v$	vapor de agua

### Letras griegas

Letra griega	Definición
$\Delta$	Cambio finito de cantidad
$\omega$	Humedad específica o absoluta (kg H <sub>2</sub> O/kg de aire seco)
$\phi$	Humedad relativa (%)
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta$	Eficiencia (%)

## CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

### Planteamiento del problema

¿Será viable diseñar una nueva propuesta de sistema para el secado de granos, bajo la implementación de las energías renovables para la etapa de secado en el proceso de beneficio de café, con el cual se potencie la competitividad del sector agrícola en Costa Rica?

### Objetivos

#### Objetivo general.

Diseñar un sistema idóneo para el secado de granos de café, cuyo funcionamiento parta de la utilización de energías renovables.

#### Objetivos específicos.

1. Investigar los parámetros y requerimientos necesarios para un adecuado secado del grano de café según las exigencias del mercado.
2. Realizar un estudio de la interacción entre la energía y las variables que mayor efecto tienen en esta etapa del beneficio del café.
3. Dimensionar el sistema de tal modo que se logre un ambiente controlado de acuerdo con el análisis realizado y que eventualmente permita su adaptación a otros procesos de secado.
4. Emplear tecnologías que favorezcan un máximo aprovechamiento de la energía termosolar durante el proceso, así como el correcto ajuste según las condiciones en las cuales se va a operar el sistema.

## Justificación

Actualmente la producción del café da un aporte importante al crecimiento económico de Costa Rica, gracias al consumo o demanda en el territorio nacional y con una mayor parte a nivel internacional, que ha permitido el desarrollo año tras año de este sector agrícola, como se demuestra en el Informe Sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica, preparado por el Instituto del Café de Costa Rica (Icafe) y el cual dice que, según datos proporcionados por la Promotora de Comercio Exterior de Costa Rica (PROCOMER), el subsector café generó en el año cafetalero 2019-2020 (Oct-Set) el valor de USD 322 539 696 en divisas para el país, un 2.8% superior respecto al periodo anterior (p.33).

Visto de otra forma, como parte del Producto Interno Bruto (PIB), el café aportó durante el año calendario 2019: un 7.97% del PIB Agrícola, un 5.73% del PIB Agropecuario y un 0.27% del PIB Nacional. (Icafe, 2020, p.34). Por otra parte, de acuerdo con el periódico La Nación (2018), que publicó una serie de datos divulgados en un Informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el cual, esta comparó los precios de energía en Costa Rica con respecto a tarifas en Honduras, Guatemala, Nicaragua, Panamá y el Salvador, señalando como resultado, que los precios de la energía en Costa Rica son los más altos para todo tipo de consumo: residencial, comercial e industrial y casi todo segmento de demanda según necesidad de voltaje y potencia. (párr. 2-3).

Como complemento a lo anterior, según Cepal para el 2016, el costo promedio en Centroamérica de un Kilovatio hora (kWh) fue de 13,48 centavos de dólar, mientras que en Costa Rica fue 18,47 centavos de dólar; 37% más para consumos industriales de 100.000 kWh. En El Salvador y Guatemala, dicho costo fue de 11,03 y 11,54 respectivamente. En Panamá, 10,92 centavos de dólar. (Ver **Anexo A. Comportamiento de las Tarifas Eléctricas en cada país**). (La Nación, 2018, párr. 5). Tocando otro tema, Costa Rica se ha comprometido a alcanzar la meta como País Carbono Neutralidad, esto al oficializar el nuevo Programa País de Carbono Neutralidad 2.0 con una visión de largo plazo y rigor científico. (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019, párr. 2).

En esta ocasión como se dijo anteriormente, dicho Programa comparte una visión de más largo plazo, tomando como base los avances que se alcanzarán en tres distintos hitos de la Contribución Nacionalmente Determinada (NDC) de Costa Rica: uno al 2030; otro al 2050; y, por último, al 2100. (Presidencia de la República de Costa Rica, 2019, párr. 3-4).

Asimismo, Siles (2007), expone en su proyecto de graduación: *Investigación sobre el efecto de la humedad, la temperatura y el caudal de aire en el tiempo de secado del café en guardiola*, que uno de los motivos del desarrollo de su proyecto, corresponde a que la etapa de secado del grano de café en guardiola en la empresa F.J. Orlich & Hnos. Ltda. representaba un “cuello de botella”, durando este más tiempo que el resto del proceso (p.4).

Se añade lo expresado por el señor Víctor Umaña, que indicó en su artículo “El sesgo antiagrícola” publicado en el diario La Nación: “Pese a que representa el 24 % de las exportaciones, la agricultura dejó de ser prioritaria para los gobiernos”. Dicho lo anterior, afirma que la agricultura significa el 24% de las exportaciones de bienes y, junto con el sector alimentario, aporta el 38% del total. Adicionalmente, el 13% de la población económicamente activa trabaja en agricultura y esta provee el 35% de los empleos en la zona rural. Por otra parte, resalta que se da un desempeño sobresaliente incluso cuando existe un sesgo antiagrícola que impera en Costa Rica. (La Nación, 2021, párr. 1-23).

De acuerdo con lo anterior se plantea la siguiente interrogante: “¿Cuál debe ser la ruta para una agricultura más competitiva, que provea mayor bienestar a las zonas rurales y atienda las necesidades de seguridad alimentarias del país?”, y menciona cuatro elementos como respuesta. Para el cuarto, Umaña manifiesta que es preciso el incremento de los programas de triple hélice (sector privado, gobierno y academia), a fin de proveer tecnología, capacitación y conocimiento a las zonas rurales (La Nación, 2021, párr. 1-23).

Debido a lo antes expuesto, existen suficientes argumentos que respaldan el invertir recursos en investigaciones donde se busca la mejora de las tecnologías ya implementadas en el beneficiado del café o bien nuevas alternativas, siendo específicos para este trabajo final de graduación, que se enfoca en la etapa de secado del grano. Se pretende diseñar un secador de café con la implementación de energías renovables, que mejore la competitividad del sector agrícola en el país, el cual se encuentra en crecimiento tanto en el mercado nacional como internacional, y

representa calidad de vida para una parte de la población costarricense como a su vez aporta a la economía general del país.

Por otra parte, se ha evidenciado el aumento en el precio por kWh de energía eléctrica en los últimos años a nivel país, por consiguiente, apostar por nuevas tecnologías para el beneficiado de café que utilicen energías renovables se vuelve indispensable para lograr disminuir tanto el tiempo, como a la vez el costo de producción y operación, ya que los equipos implementados actualmente son operados por largas y continuas jornadas durante el tiempo de cosecha. Ahora bien, desde el punto de vista ambiental, al ser Costa Rica un país que busca alcanzar la carbono neutralidad en los próximos años, se deben desarrollar tecnologías limpias bajo criterios ingenieriles o científicos que permitan mitigar el impacto del beneficiado de café en el medio ambiente, con las emisiones de efecto invernadero (GEI), dado al consumo considerable de energía eléctrica y. adicional a esto, la utilización de hornos que son alimentados con biomasa (leña o cascarilla) como combustible, proceso que permite llevar el aire a la temperatura requerida para el secado de café.

La etapa de secado es una de las más importantes en el beneficiado del café, siendo aquí donde se resguardan una serie lineamientos o estándares exigidos en el café mundialmente, por lo que, lograr el desarrollo de esta de una manera sostenible a nivel ambiente y sociedad. podría significar también así un valor agregado para el perfil de la empresa beneficiadora y para el país, al colocar un producto verde en el mercado, manteniendo las características diferenciadoras del café de Costa Rica a nivel mundial.

## **Antecedentes**

### **Internacionales**

Tesis n.º 1.

Institución: Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Tema: Sistema automático de secado de granos de café accionado con energía solar.

Autor: Gilberth André Loja Acuña

Fecha: agosto del 2019

El principal objetivo que planteó el Sr. Gilberth André Loja Acuña para este trabajo fue diseñar una secadora de granos de café especial que sea capaz de conseguir una humedad final del 11%, trabajando a una temperatura de secado no mayor a 35°C. Adicionalmente, que funcionara empleando energías renovables, puesto que en el lugar donde se desarrolló no existe el servicio eléctrico.

Se explicaron los tipos de tecnologías renovables, tanto la fotovoltaica como la eólica. Además, se detalló las formas de generar calor para calentar el aire. Luego, se plantearon los requerimientos mecánicos, eléctricos y de control del sistema para alcanzar el objetivo principal. Para satisfacerlos, se detallaron las funciones a realizar, se propusieron 3 conceptos de solución mediante la matriz morfológica, luego se eligió la óptima a través de una evaluación técnica/económica.

Después se diseñó el sistema mecatrónico teniendo en cuenta los cálculos necesarios (termodinámicos y electrónicos) para el dimensionamiento del sistema. Para ello, se estimó el tiempo de secado de manera analítica utilizando las ecuaciones propuestas por Robert E. Treybal y papers sobre del secado de granos según SECAFÉ (revista agrícola brasilera). Además, se calcula la cantidad de paneles solares, baterías y reguladores, detallándose las partes del sistema especificándose su función, como su fabricación.

Se seleccionaron los componentes mecánicos, electrónicos y de control que satisfacen el diseño propuesto. Posteriormente, se presenta la integración que existe entre los sistemas mecánico-electrónico y eléctrico-electrónico-control. Asimismo, se observa la lógica y estrategia de control empleada en el sistema las cuales garantizan que el aire no exceda los 35°C. Finalmente, se desarrolló una evaluación económica para analizar la rentabilidad del diseño.

El Sr. Gilberth estima que será rentable desde el primer año, en comparación al uso de las tecnologías actuales para secar café en dicha zona. También concluyó que empleando un monitoreo constante de la temperatura y humedad relativa y debido a la estrategia de control se logró calcular un tiempo de secado aproximado de 8 horas. De esta manera, se obtuvo un café especial al 11% de humedad cuya temperatura no sobrepasó de los 35°C y con un secado homogéneo. (Loja, 2019)

Tesis n.º 2.

Institución: Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México.

Tema: “Diseño, construcción y evaluación de un secador solar rotatorio”.

Autor: Weimar Alberto Grajales Morales

Fecha: mayo de 2019.

El objetivo principal de este trabajo de investigación según lo expone el Sr. Weimar fue el desarrollo de un prototipo de secador solar rotatorio el cual utilice la energía solar térmica de una forma eficiente, para la obtención de granos deshidratados de café, además se logren reducir los tiempos de secado y con esto aportar una mejora en la técnica de secado del café. Bajo este objetivo, Weimar Alberto Grajales Morales propuso lograr el diseño, la construcción y la evaluación, de un prototipo de secador solar rotatorio para el deshidratado de granos de café.

El diseño del prototipo se fundamentó en las siguientes tres características principales: el área de captación solar donde se emplearon tubos al vacío, una cámara de secado capaz de soportar 50 kg de café pergamino y por último implementación de un mecanismo autónomo durante el proceso de secado. Con evaluación del prototipo se comprobó que, el colector solar es capaz de alcanzar una temperatura promedio de 85.25 °C, el sistema de control de humedad y temperatura puede mantener la humedad relativa del aire al interior de la cámara de secado por debajo del 90% y la temperatura del aire en un rango de entre 40 °C y 55 °C durante las operaciones de secado.

Con este trabajo se demostró la efectividad del prototipo con muestras de café de la variedad catimor, logrando reducir su contenido de humedad hasta un 7.16 %, también redujeron los tiempos de secado hasta un 45.46 %, comparado con el método tradicional de secado en plazoletas. Este prototipo brinda información valiosa, que puede ser aplicada en trabajos futuros para escalamiento de este tipo de tecnologías o para su implementación en distintos procesos de secado solar. (Grajales, 2019).

Tesis n.º 3.

Institución: Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú.

Tema: Diseño de una secadora de cacao para almacenaje con capacidad de 2 T/DIA.

Autor: José Arturo Caballero Cava.

Fecha: junio del 2016.

En esta ocasión el proyecto surgió a raíz de la necesidad de conservar el cacao almacenado durante los periodos fuera de la temporada de cultivo y cosecha, evitando que sus características se vean afectadas por la proliferación de bacterias y hongos. Según lo anterior, con el fin de cubrir dicha necesidad, se propuso el diseño de una máquina secadora capaz de procesar 2 Tn/día de cacao seco con una alimentación por batch y que redujera su humedad hasta un promedio de entre 10% - 15% sin afectar la calidad del producto utilizando aire precalentado.

Se estudiaron métodos para realizar esta tarea de manera que el producto no se vea afectado por agentes contaminantes, por ejemplo, no utilizar directamente combustibles fósiles que pueden contaminar el aire precalentado; que su tránsito sea tal que no dañe físicamente el producto a la entrada, durante y a la salida de la máquina. Se analizó variables como temperatura adecuada y la dirección del flujo con el objetivo de encontrar las condiciones ideales para un buen proceso lo cual contribuirá a mantener la calidad de la almendra, y se calculó los elementos de transmisión necesarios para conseguir un secado uniforme.

El trabajo utilizó para su desarrollo los parámetros climáticos de la región de Pisco, Ica, siendo esta una zona con gran humedad relativa en el aire (85%) y alcanzando temperaturas medias de 20°C, teniendo en cuenta que el proceso deberá poder adaptarse a los diferentes climas de la costa peruana. También así para su estudio se utilizó información de libros sobre ingeniería del secado, tesis de secado de diferentes tipos de granos y frutos, así como papers sobre el secado de cacao como los expuestos en el análisis del proceso de deshidratación de cacao en la revista *Agricultural Engineering International*, por otra parte se reforzó estos estudios con los de secado de café, perteneciente a la misma familia de frutos sub-tropicales, como los expuestos por SECAFÉ, para así lograr una adecuada modelación del proceso de deshidratación del cacao.

Finalmente se logró el objetivo principal del diseño de la secadora propuesta, con la cual se obtuvieron condiciones de secado adecuadas, se habla de temperaturas menores o iguales 65°C,

con velocidad menor a 3.7 m/s (3 m/s específicamente), permitiendo reducir la humedad a un 13% siendo adecuada para su almacenaje. También se disminuyó el tiempo de secado, esto con el diseño desarrollado bajo la combinación de sistemas de secado de grano estático y rotativo. Se utilizaron resistencias eléctricas para el calentamiento, puesto que el cacao tiende a absorber los olores, deteriorando su aroma y sabor.

Una de las recomendaciones planteadas es realizar un control automático para la humedad en el grano durante el secado, facilitando determinar el tiempo adecuado de permanencia de los granos en el secador y así evitar que la humedad del grano alcance un 7%, punto donde este se vuelve quebradizo. (Caballero, 2016, pp.94-95).

Tesis n.º 4.

Institución: Universidad del Salvador, El Salvador.

Tema: Diseño, construcción y caracterización de secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos.

Autor: Vladimir Alberto Espinoza Martínez, Amílcar Gerardo Menjívar Morales, Ángel Ulises Najarro Salinas.

Fecha: marzo 2018.

Bajo el título *Diseño, construcción y caracterización de secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos*, el grupo investigador de la Universidad del Salvador propuso desarrollar un secador de granos de café mecánico que supliera la demanda en un periodo de tiempo mucho más corto y que además utilizara la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos para llevar a la temperatura de secado el aire ambiente tomado por el equipo, con el objetivo de reemplazar los combustibles tradicionales.

Este proyecto se basó específicamente en la propuesta o solución a la problemática que presentaba FundaGeo en el secado de los granos de Café, su generalidades y los distintos tipos de secado que se pueden aplicar, sobre conceptos básicos de estaciones geotérmicas, sobre fundamentos de termodinámica y transferencia de calor, diseño del equipo de secado, una evaluación económica y por último en la construcción y caracterización de un prototipo de secado de café utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos.

De los resultados más importantes es el tiempo de secado obtenido de 29 horas, con temperaturas que oscilaban entre 39.3 °C hasta 50.5 °C, por otra parte, se demostró que la temperatura del aire de secado se ve afectada por la temperatura del aire ambiente y por la humedad relativa y adicional a esto la recomendación de hacer un movimiento del café cada hora desde que se inicia la operación de secado, esto con el fin de uniformizar el secado en toda la masa del café. (Espinoza, Menjívar y Najarro, 2018, p. 195)

Una vez analizado el proyecto desarrollado por Alberto Espinoza Martínez, Amílcar Gerardo Menjívar Morales y Ángel Ulises Najarro Salinas, es valioso interpretar el estudio energético y las características del secador diseñado, ya que incluso en ausencia de un abanico que favoreciera el flujo de aire y por consiguiente la disminución de humedad de la masa de café, se obtuvieron buenos resultados en el secado. También así la necesidad de diseñar el secador de manera que el movimiento constante del café no dependa del factor humano.

Es importante aclarar que este proyecto aportará conocimiento en la parte energética del secado y las características del secador, y no así el tipo de fuente de energía térmica implementada, puesto que es distinta a la que se utilizará.

Tesis n.º 5.

Institución: Universidad Ricardo Palma, Perú.

Tema: Diseño e implementación de un prototipo de secador de café automatizado.

Autor: Luis Orlando Huamán Sayán, Ernesto Domingo Mamani Arroyo.

Fecha: 2019.

Esta tesis ha tenido como objetivo el diseño y desarrollo de un prototipo de sistema de secado para granos de café el cual conlleva un sistema de control realimentado para el proceso de calefacción estable y con la finalidad de que, los granos de café que ingresan húmedos lleguen a la temperatura deseada tal como se ha realizado en las pruebas logrando una estabilidad de 45 °C en la cámara de secado para un secado uniforme.

Se realizó el diseño y simulación mecánica del sistema mediante el programa Catia V5, el cual incluyó el dimensionado previo de los componentes eléctricos y electrónicos, las dimensiones del contenedor para 500 g de granos de café y la temperatura y el tiempo de secado para cada tipo de grano de café para cumplir con los estándares de seguridad utilizados en el campo de la

automatización resultando el acero inoxidable 304 como material a utilizar para la construcción del prototipo por su excelente resistencia a la corrosión y adicionalmente puede ser soldado utilizando la mayoría de las técnicas de soldadura.

Una vez finalizado el diseño se llevaron a cabo cálculos que validaran que el diseño propuesto cumpliera con los requerimientos establecidos para un correcto funcionamiento tales como tensiones de Von Mises para una temperatura de 55 °C para calcular la resistencia térmica de las tres cámaras (calefacción, secado y de control). Para finalizar se realizaron las diferentes pruebas con el fin de corroborar el resultado de la simulación y el control realimentado obteniendo un tiempo de secado de 20 hrs y logrando el 11% de humedad en los granos secos.

Se realizaron cálculos de costo de implementación mecánica, eléctrica y electrónica, así como el presupuesto total del prototipo y, adicionalmente a ello se realizó el cálculo del consumo energético, demostrando una reducción significativa en este. (Huamán y Mamani, 2019, p. xvi).

#### Tesis n.º 6

Institución: Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Tema: Diseño de un secador geotérmico de café

Autor: Edgar Ricardo Pacheco Mendoza.

Fecha: 2019

El desarrollo de este proyecto tenía como objetivo principal diseñar un secador geotérmico de café, con el fin de mejorar el proceso de secado de café acortando el tiempo de secado que se tienen en las zonas de “Mesillas-Nayarit” en México, donde se basaron en documentos que proporcionan datos idóneos para un diseño óptimo de secado. Se dio inicio con el diseño de los equipos necesarios para el funcionamiento de un secador geotérmico (El intercambiador de calor, el ventilador y cámara de secado).

Seguidamente con las características correctas se aseguró un secado homogéneo en la cámara de secado, mediante la circulación homogénea del aire caliente, lo cual produce una calidad y tiempo de secado óptimo en el café. Finalmente, con base en las normas alimenticias realizaron la selección tanto de los materiales como de la forma de manufactura, esto de manera adecuada, procurando un diseño higiénico de maquinaria para obtener un secador de café eficiente y funcional.

Hoy en día el uso de software es de vital importancia para el diseño de estos equipos, ya que ayudan a agilizar el proceso de diseño, permitiendo así revisar diferentes aspectos tanto mecánicos como térmicos, usando los módulos de simulaciones mediante análisis de elemento finito como de simulación de flujo para obtener resultados satisfactorios y así saber con mayor fiabilidad la funcionalidad del prototipo diseñado en cuestión. Además de representar de una mejor forma la propuesta del proyecto, ya que antes de empezar la construcción es necesario obtener diferentes vistas para así saber cuál será la manera ideal para la realización del proyecto. (Pacheco, 2019, p. 162).

El equipo desarrollado en este trabajo puede ser utilizado para secar diferentes tipos de semillas, frutas o alimentos, si lo requieren, ya que el rango de temperaturas en cual puede trabajar el equipo favorece el secado y deshidratado de diferentes alimentos con el fin de utilizar la mayor cantidad de energía durante del día, logrando un área de oportunidad mayor en el mercado, teniendo productos tanto secos como deshidratados en poco tiempo. (Pacheco, 2019, p. 163)

### **Nacionales.**

Tesis n.º 1

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares

Autor: Allan Gerardo Mora Vindas

Fecha: 2014

Dimensionar, construir y poner en poner en marcha un sistema de secado de granos de café con el uso de colectores solares en un beneficio de café en la Zona de los Santos, fue el objetivo principal del Proyecto de Graduación del Sr. Allan Gerardo Mora Vindas.

Un dato relevante de este proyecto fue que la conceptualización y dimensionamiento del sistema de secado de colectores solares se basó en la utilización de latas de aluminio recicladas como material para transformar la radiación solar en energía térmica, de esta forma se logró mantener el diseño con un bajo costo, y así ayudar a los pequeños productores de café a mejorar su rendimiento de secado y mejorar su producción.

En este proyecto se comprobó que, conforme la radiación solar aumenta durante el día, se obtiene una diferencia de temperatura mayor entre la entrada y salida del colector solar, lo que lleva a una mejor eficiencia térmica del equipo. Adicionalmente se obtuvo una eficiencia térmica máxima del colector solar de un 18% con un flujo de aire de 0.013 kg/s y una radiación solar 1138 W/m<sup>2</sup> (Mora, 2014, p.84).

Mora (2014) indica que, las eficiencias térmicas máximas para cada día de experimentación se obtuvieron entre las 12:00 p.m. y la 1:00 p.m., como era de esperar con respecto a los máximos de radiación y de temperatura alcanzadas en esa franja horaria. En relación con esto afirma que el flujo de aire influye de manera notoria en la eficiencia térmica del colector solar, ya que, para los días con menos flujo de aire neto disponible, se obtuvieron las eficiencias más bajas. Y conforme el flujo aumentó también se incrementó la eficiencia térmica del aparato (p.85).

El Sr. Allan recomienda controlar el flujo de aire con el fin de mejorar tanto la eficiencia térmica y de secado del equipo dimensionado, con la implementación de sopladores, ventiladores o una chimenea de tiro inducido.

## Tesis n.º 2

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: Diseño de un secador para café mediante el calentamiento del aire en dos etapas utilizando energía solar.

Autor: Stanley Camacho Fonseca, Oscar Ramírez Hernández.

Fecha: abril del 2015.

El objetivo principal del proyecto fue diseñar un sistema de secado de café que afecte lo menos posible la calidad del grano y que partiera de energías renovables para reducir la huella ecológica y destacarse en el mercado internacional del café gourmet. El fundamento técnico fue aprovechar la energía solar disponible para aumentar la temperatura del aire de secado y reducir su humedad relativa, esto en dos etapas: primero en un colector solar de aire y luego en una cámara de secado para deshumidificar el grano de café y reducir su contenido de humedad en base húmeda desde un 53 % hasta un 12 %, valor establecido por el Instituto Costarricense del Café (ICAFFE).

Con el diseño de la cámara de secado se logró no maltratar el grano ni exponerlo a la contaminación del medio. Además, su velocidad de deshumidificación no se ve forzada ni

acelerada. Los principales resultados fueron una disminución del 60 % del espacio requerido para secar el café en comparación con el método en patios de concreto, pasando de 322 m<sup>2</sup> a 132 m<sup>2</sup>, y un aumento del 58 % de la disponibilidad energética para el secado (entalpía del aire), que aumentó de 62,4 kJ/kg a 98,5 kJ/kg.

En el análisis económico para la viabilidad del proyecto se consideró un aumento de 60 % de la producción con un precio de venta de \$225,00/quintal de café y una utilidad del 25 %, una inversión de \$40 000,00 y un período de depreciación lineal de 10 años sin valor de rescate, dando como resultado una tasa interna de retorno (TIR) de 86,8 % y un valor actual neto (VAN) de \$131 337,10. (Camacho y Ramírez, 2016, p. X)

### Tesis n.º 3

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: Evaluación de un sistema de flujo forzado para secado de granos de café con uso de colectores solares elaborados con latas de aluminio.

Autor: Julián Molina Gutiérrez

Fecha: 2015

El objetivo general que planteó Julián Molina Gutiérrez para este proyecto fue evaluar un sistema de flujo forzado para secado de granos de café con uso de colectores solares elaborados con latas de aluminio. Se tiene como punto de partida 2 secadores solares de convección natural. Al inicio del documento se plantea un marco teórico que se utiliza como referencia sobre los distintos tipos de secadores y se definen características específicas de estos, haciendo énfasis en los utilizados para secar café. Se cuenta con la ventaja de experiencia previa de un secador de convección natural, se utiliza como punto de partida del desarrollo del proyecto. (Julián, 2015, p.ii)

En el marco teórico se plantearon una serie de modificaciones al sistema de secado, para modificar el secador de convección natural y transformarlo en uno de flujo forzado, con una mejor distribución de aire y un sistema de control automático que permita facilitar la operación del mismo. Se dimensionó el flujo de aire para un secado adecuado y se seleccionó equipo para lograr un bajo consumo energético. Se cotizaron los materiales, equipos y recursos para la modificación y una vez adquiridos se comenzó con la ejecución de las modificaciones respectivas. (Julián, 2015, p.ii)

Por otra parte, se construyó una cámara de presión para distribuir el aire uniformemente en la cama de granos y se instaló un sistema de control automático, cuya variable controlada es la temperatura del aire, por medio de 2 ventiladores de 182 m<sup>3</sup>/h. Completada esta etapa, se procedió a realizar un plan experimental donde se plantean una serie de experimentos para estudiar y cuantificar el desempeño del secador. Por medio los gráficos y ecuaciones se representan eficiencias de secado de hasta 77% con una remoción de humedad de 4,89 x 10<sup>-4</sup> kg/s y una radiación promedio de 702 W/m<sup>2</sup>. (Julián, 2015, p.ii)

Se trataron de realizar las pruebas lo más similarmente posible a las realizadas con el secador de convección natural, para su posterior comparación. Por lo que en cada prueba se cargó el secador con 45 kg de café pergamino recién chancado. Se alcanzaron valores de velocidad de aire de hasta 1,12 m/s, la temperatura del aire llegó hasta 65,5 °C. Se logró realizar 3 pruebas de aproximadamente 4 días cada una, donde se alcanzaron valores satisfactorios de humedad en el café para su almacenamiento y buena calidad en el café obtenido. Se recomienda implementar un sistema nuevo con movimiento de secado de granos, y mayor capacidad de secado. (Julián, 2015, p.ii)

Tesis n.º 4

Institución: Universidad de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: Diseño de un sistema de energía solar para agua de reposición de calderas

Autor: Andrés Cambronero Espinoza

Fecha: 2019

El Sr. Andrés indica que ante la crisis energética que se ha agudizado en las últimas décadas, es imperativo buscar nuevas formas de energías renovables que sean sustentables en el tiempo. Conforme los recursos se vuelven más limitados y escasos, la optimización en el uso eficiente de la energía y la utilización de energías renovables ha pasado a tener un papel preponderante en el escenario mundial. La energía solar es un claro estandarte de esta renovación de paradigmas que suscita un nuevo interés a nivel de ingeniería. (Cambronero, 2019, p. xii)

Desde este contexto, se aborda una situación común en las industrias del país, que reside en el aprovechamiento de la energía solar para las aplicaciones térmicas que se derivan de los procesos de manufactura. Se piensa en la industria pues se sabe que requiere energía térmica en diversas etapas de sus procesos, pero bien se podría hablar acerca de otro fin que pueda hacer un uso del

vapor como la generación eléctrica. El trabajo detalla el diseño de un sistema de agua de reposición a la sala de calderas de una industria de bebidas mediante el uso de colectores solares para aprovechar la energía térmica solar mediante concentración parabólica.

El diseño expuesto se basa en un análisis técnico-económico que permitió seleccionar una alternativa de transferencia de calor indirecta mediante un fluido térmico con concentradores solares de la marca SkyFuel para sustituir parcialmente la energía de combustión de la caldera pirotubular. Para el agua de reposición de la caldera se utilizó en el diseño, agua de un proceso de lavado de botellas que cuenta con características físico-químicas favorables para su uso en el proceso de generación de vapor.

Se determinó una disminución promedio en el consumo de agua de 150 m<sup>3</sup> semanales y una sustitución del 12% de la energía térmica de la caldera. Al valorar la viabilidad económica del proyecto se determina que se tiene una TIR del 9,4%, un VAN de \$ (69.645,31) y un periodo de recuperación de la inversión de 8,9 años. (Cambroner, 2019, p. xii).

Tesis n.º 5

Institución: Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: Investigación sobre el efecto de la humedad, la temperatura y el caudal de aire en el tiempo de secado del café en guardiola.

Autor: Donal Siles Granados.

Fecha: marzo 2007.

En esta ocasión, el proyecto fue desarrollado en la empresa F.J. Orlich & Hnos. Ltda, la cual se dedica al beneficiado de café. Entre su maquinaria cuenta con 8 guardiolas para el secado del grano, etapa que constituye el “cuello de botella” del beneficio por requerir más tiempo que el resto del proceso. El tiempo de secado difiere, algunas veces, en más de un 50%, tanto para una misma guardiola como de una guardiola a otra. A partir de lo anterior nació como objetivo principal determinar el efecto del caudal y temperatura del aire que ingresa a la guardiola y de la humedad y temperatura del grano, en el tiempo de secado del café de calidad especial, primera y segunda, en la planta de Santa María de dicha empresa. (Siles, 2017, p. 4)

Por lo tanto, en este documento se justifica el motivo de las diferencias en la humedad de entrada y salida de la etapa de secado son las principales causantes de la discrepancia en el tiempo.

También así, se explica la metodología de medición y características del hardware y software utilizados. Además, se muestra el análisis de las mediciones realizadas en el procedimiento seguido para determinar un modelo matemático que explica el comportamiento de la humedad en función de las variables medidas a lo largo del tiempo. (Siles, 2017, p. 4)

Se concluye que las variaciones en el tiempo de secado del café en las guardiolas se deben principalmente a las diferencias tanto en la humedad de entrada del café a la etapa de secado como la humedad del grano al descargar la guardiola. Por otra parte, en las guardiolas 2,6 y 8 las condiciones promedio de temperatura y caudal del aire varían, como máximo, un 2.29% de una carga a otra. De ahí que su aporte a la diferencia en el tiempo de secado sea menor de 1.25 horas.

Para finalizar se dan las siguientes recomendaciones: medir las variables que tienen mayor efecto en el proceso de secado de café, como a su vez buscar la forma de medir la humedad del café cuando esta es mayor a 45.2% y de ser posible o viable, medir la humedad dentro de la guardiola para lograr que no dependa del factor humano la medición de esta variable, logrando un mayor control del sistema. (Siles, 2007, p.75)

#### Tesis n.º 6

Institución: Instituto tecnológico de Costa Rica, Costa Rica.

Tema: Diseño e implementación de un sistema de control automático de temperatura y sensado de humedad para una secadora de granos y semillas.

Autor: Alonso De la O Vargas.

Fecha: 2006.

Alonso de la O Vargas, plantea como objetivo principal del proyecto diseñar e implementar un sistema de control automático de temperatura y sensado de humedad relativa para una secadora de granos y semillas con el fin de cubrir la necesidad que se presentaba en el Centro de Investigación de Granos y Semillas (CIGRAS) de la Universidad de Costa Rica, para ser específicos, en el Laboratorio de Procesamiento Agrícola, puesto que no se contaba con un sistema tecnológicamente apropiado para la medición y registro de variables, como temperatura y humedad relativa, en el proceso de secado de semillas y granos.

El proceso de toma de datos durante un experimento con la secadora de granos se llevaba a cabo totalmente manual, siendo este lento y tedioso para los operarios. Por consiguiente, se vio la

necesidad de automatizar el registro de mediciones, utilizando la tecnología disponible en su momento. El dispositivo implementado, consta básicamente de un circuito, que sensa variables de temperatura y humedad relativa a lo largo de todo el proceso de secado, así como el control de la temperatura del aire en la entrada de la secadora. Se desarrolló un programa para controlar el dispositivo, así como el registro de las variables en la computadora a través del puerto de comunicaciones serie.

El proyecto del Sr. Alonso dará un aporte significativo en la parte de control del secador, con el análisis y ubicaciones estratégicas dadas a los sensores que miden las distintas variables de interés, también la recomendación de implementar un sistema de control para regular la velocidad del ventilador, y obtener diferentes caudales de aire en la secadora, ya que el caudal del aire es una variable que afecta directamente la duración en el secado. (De la O, 2006, p. 92)

### **Proyecciones**

- Se pretende realizar una recopilación de datos confiables sobre requerimientos del correcto secado del café, que consoliden una base como punto de partida del proyecto y así lograr un respaldo sobre el resultado final.
- Desarrollar una memoria de cálculo sobre las distintas etapas del proyecto que involucran la interacción de la energía en sus diferentes formas, esto con argumentos ingenieriles que evidencien y avalen las decisiones tomadas para el diseño del secador de café.
- Se busca motivar la incorporación o utilización de las energías renovables en los diversos procesos del beneficiado de café e indirectamente influir sobre otros sectores de producción agrícola en el país.
- Se espera que la propuesta de diseño del secador permita una fácil adaptación de este para distintos procesos de secado de granos, de forma que no se encuentre limitado al secado de granos de café, ampliando la viabilidad de uso en otras aplicaciones.
- Seleccionar adecuadamente los equipos, logrando un máximo aprovechamiento de la energía solar durante el proceso, también así un correcto ajuste según las condiciones en las cuales se vaya a operar el sistema, de forma que signifique en una disminución de los cuellos de botella que en muchas ocasiones representa la etapa de secado en el proceso de

beneficio del café, simultáneamente una reducción en los costos de operación y del producto final.

- Contribuir con la implementación de la energía termosolar en la disminución de la contaminación ambiental generada por la cantidad de emisiones producidas en los procesos industriales como lo es en este caso, donde se utiliza leña o madera para la combustión en los hornos como fuente de energía térmica, durante el proceso de secado.
- Impulsar la competitividad del sector agrícola del país con la propuesta de una nueva alternativa o sistema para el secado de granos de café, que sea accesible tanto para pequeños, como grandes productores.

### **Limitaciones**

- En el beneficio de Palmichal de Acosta no cuentan con un sistema de medición que permita la detección de la humedad en el café antes de la entrada a las guardiolas, el cual es fundamental para la investigación, por lo tanto, se hizo uso de datos ya investigados en literaturas relacionadas al tema.
- Carencia de investigaciones de carácter público a nivel nacional, con respecto al tema propuesto, que aporten conocimiento para el desarrollo del proyecto.
- Falta de recursos económicos para desarrollar en totalidad un prototipo, incluso a pequeña escala, que permita evidenciar el funcionamiento a partir de la puesta en marcha de este.
- Poca oferta en el mercado nacional de equipos de deshumidificación de aire para aplicaciones industriales de alta exigencia, esto al haber consultado con grandes empresas a nivel nacional que tienen relación con dichas aplicaciones y no contaban con una solución del equipo requerido. De acuerdo con lo anterior se dificultó la búsqueda del equipo deshumidificador de aire e incluso a nivel internacional ocasionando atraso en el avance de la investigación.

## CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

### Procesos de beneficio del café

En este apartado se van a explicar algunas de las etapas del beneficio del café.

#### Recolección

Como bien lo dice su nombre, es la recolección manual de los granos o frutas de la cosecha de café, esta es llevada a cabo por un grupo de personas (peones), a los cuales se les debe brindar las indicaciones y condiciones idóneas para realizar o desempeñar su labor como recolectores de café. El Instituto Interamericano de Cooperación para la agricultura [IICA] (2010), explica que en esta etapa se deben cumplir ciertas condiciones, por ejemplo:

- Evitar que los sacos que contienen la fruta tengan contacto con lodo o bien algún factor que pueda contaminar el mismo.
- Los sacos utilizados para el almacenaje momentáneo deben estar en buen estado, limpios, sin residuos de agroquímicos, gallinaza u otro elemento contaminante.
- No se deben utilizar detergentes ni químicos para la limpieza de implementos de recolección.
- Los sacos con café fruta deberán manejarse protegidos bajo la sombra, evitando la radicación solar directa sobre ellos.
- Una buena práctica es mantener el café fruta fresco por reducción de su temperatura.

Existen múltiples argumentos para justificar debidamente que el café sea cosechado solamente cuando haya alcanzado plenitud su desarrollo y madurez. Lo anterior está directamente relacionado con la calidad de la bebida que se obtiene cuando el grano utilizado para su preparación proviene de frutos de café maduro y sano. Las malas prácticas pueden traer consigo incluso la contaminación con ocratoxinas. (pp. 13-14)

#### Transporte de la fruta

Esta etapa básicamente es el traslado de la fruta recolectada a los distintos puntos de acopio o bien directamente a la entidad encargada del beneficiado de este.

Los medios de transporte deberán ser robustos y dotados de las características necesarias para el traslado de la fruta, también así, el personal responsable de esta actividad deberá garantizar que el vehículo de transporte estará completamente limpio y libre de olores extraños y sustancias contaminantes, es decir, algún tipo de material o sustancia química u orgánica. El transporte del fruto de café debe hacerse el mismo día de su recolección, esta y las anteriormente pautas mencionadas, se deben cumplir de igual forma al punto anterior, con el fin de evitar daños en la fruta. (IICA, 2010, pp. 19-20)

### **Recibo de café en el beneficio**

Durante el recibo de café cada lote es debidamente identificado con un código, este irá acompañado de la fecha de ingreso del café al beneficio y otros datos adicionales, con el fin de ser registrados en la base de datos de cada temporada. No queda de más mencionar que en este punto es requisito efectuar la medición de la cantidad de café fruta para todo lote que recibe en la planta beneficiadora. Rendimiento, es un concepto importante en el beneficio del café, este se refiere a la conversión de café fruta a café oro. (IICA, 2010, pp. 20-21)

Dicho de otra manera, la cantidad de café fruta y la cantidad de café oro que se obtiene producto del beneficiado es a lo que se le denomina factor “Rendimiento” y se debe aplicar idóneamente este factor de conversión unitario. Como una referencia podemos decir que 250 kg de café fruta maduros beneficiados por vía húmeda producen 46 kg de café oro. La experiencia ha demostrado que el rendimiento es un parámetro variable pues depende de muchos factores agroecológicos, incluyendo la variedad cultivada. (IICA, 2010, pp. 21)

Por ello, si se decide su aplicabilidad, lo correcto es establecer un mecanismo y su procedimiento de rutina para determinar el rendimiento; así como aplicarlo para cada región productora en particular. Por otra parte, también se deben hacer análisis de calidad y calificación del café fruta, dentro los análisis que se deben realizar se encuentra la prueba de cantidad de grano verde en el lote recibido, en este caso se realiza un muestreo de forma aleatoria. Donde se pueden implementar tres métodos para medir la contaminación: porcentaje por volumen, porcentaje aritmético (por conteo de grano) y por último porcentaje por peso. Una vez indicado lo anterior, según las normas de calidad (vigentes en varios países) estipulan o permiten un máximo de 2% café verde. (IICA, 2010, pp. 21-23)

### **Clasificación de café fruta**

Según IICA (2010), la clasificación del café fruta debe realizarse antes de efectuar el despulpado y esta consiste en la separación de frutos defectuosos, y de ser posible, uniformizar el tamaño mediante la separación de los frutos pequeños. Los defectuosos son aquellos frutos inmaduros y/o sobre maduros, secos en fruta o atacados por enfermedades y/o insectos. (p. 27)

La técnica más tradicional para clasificación es la inmersión de la masa de café fruta en agua para promover la flotación de una parte del café la cual es separada del resto. La inmersión se efectúa en un tanque lleno de agua. También se han desarrollado canaletas para efectuar la inmersión y provocar la flotación, luego los frutos flotantes separados por arrastre superficial se conducen para su proceso separado. La mayor parte del café se sumerge y es succionado para conducirse por una tubería con descarga separada. (IICA, 2010, p. 30)

### **Despulpado de la fruta**

Consiste en la remoción del exocarpio (pulpa o cáscara) del fruto de café, por lo tanto, la operación de trillado de café en fruta. Este trillado se produce mediante el estrujamiento del fruto entre dos superficies metálicas (en movimiento relativo), las cuales están graduadas con un espacio libre igual al tamaño del grano, obligando de esta forma que la pulpa se separe, funcionando como un tipo de criba. (IICA, 2010, p. 38)

### **Etapas de secado del grano de café**

¿Cuál es la razón del secado? La etapa de secado en el procesado de café se realiza básicamente para llevar el grano desde una humedad inicial del rango (45-70) % aproximadamente, a condiciones entre 10-12% (base húmeda), que es el contenido de humedad aceptado para su comercialización.

El proceso de secado de café se puede definir de la siguiente manera: El secamiento es la remoción de la humedad del producto hasta alcanzar un contenido de humedad en equilibrio con el aire atmosférico normal, o hasta un nivel de humedad adecuado de manera que, durante el almacenamiento la disminución de la calidad del producto por microorganismos u otros agentes sea prácticamente despreciable. (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica [MAG], 2010, p. 13).

La humedad de un producto se expresa en forma porcentual en base húmeda (bh) o en base seca (bs), como la cantidad de agua contenida en el producto húmedo o seco respectivamente, de la siguiente forma. (Cenicafé, 2006, p. 1).:

**Ecuación 1. Humedad en base húmeda**

$$\text{Humedad en base húmeda (bh)} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de producto}} \cdot 100 \quad (1)$$

o,

$$\text{Humedad en base húmeda (bh)} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{kg}_{\text{bio-seca}} + \text{peso de agua}} \cdot 100 \quad (1)$$

**Fuente:** (Cenicafé, 2006)

**Ecuación 2. Humedad en base seca**

$$\text{Humedad en base seca (bs)} = \frac{\text{peso de agua}}{(\text{peso de producto} - \text{peso de agua})} \cdot 100 \quad (2)$$

**Fuente:** (Cenicafé, 2006)

Esta etapa del procesado del café se logra a partir de patios de secado o bien con equipos como lo son secadoras cilíndricas horizontales de tipo guardiola, camas africanas, invernaderos, secadoras estáticas entre otros, para posteriormente almacenarlo, venderlo o trillarlo. Por otra parte, en algunos casos también se realiza una etapa de pre-secado, con la cual se busca conseguir que la humedad inicial sufra una disminución desde un 70% aproximadamente hasta un 30 % o 20 % antes de dar comienzo al secado, empleando secadoras verticales, bericos o incluso solo en patios siendo expuesto al sol.

El proceso de secado es el más crítico de todos en el beneficiado de café, debido a que cumple un papel fundamental en el producto final, pues está presente el grado de humedad, el cual depende de este, por su proliferación de hongos por exceso de humedad dejada en el grano y, por otra parte, se puede dar deterioro de la calidad del grano por exceso de secado. Además, esta etapa podría alargarse por varias semanas según el proceso específico que se esté aplicando y no está de más enfatizar que es aquí donde “se resguarda” la calidad de la taza, evitando daños irremediabes en esta.

Dicha etapa trae otros beneficios en las características que logre alcanzar en el grano, tales como la buena apariencia en oro, homogeneidad de color, el peso justo, entre otros. Es importante comprender que los granos de café son seres vivos y deben mantenerse vivos durante el almacenamiento, por lo tanto, en la etapa de secado no debe ponerse en riesgo esta condición del grano, principalmente cuando se aplican altas temperaturas. (MAG, 2010, p. 13)

Como respaldo a lo anteriormente dicho, sobre la importancia del grado de humedad en los granos de café, se tiene la resolución N.º407 de enero del 2002 de la Organización Internacional del Café (OIC), donde solicitó a sus países miembros NO comercializar café cuyo contenido de humedad se halle fuera del rango del 8% al 12%. Además, se estipula la utilización de una norma internacionalmente aceptada para la determinación del contenido de humedad, el cual se expresa “en base húmeda”. (IICA, 2010, p. 101) citando a (Consejo Internacional del Café, 2002). A continuación, se mencionan algunas partes concernientes del documento respectivo:

El manejo inadecuado de esta variable provoca enmohecimiento del café, causando así el deterioro de su calidad de taza, pero los problemas que acarrea esta práctica son mucho mayores, porque los mohos que crecen en los granos almacenados húmedos producen toxinas altamente peligrosas para el organismo humano si están presentes en alimentos y/o bebidas del consumo diario. (IICA, 2010, p. 103)

Algunos hongos que se desarrollan en los granos tienen la capacidad de producir sustancias químicas que son tóxicas para el ser humano y para los animales. Estos venenos químicos reciben el nombre de micotoxinas, específicamente un grupo de ellas, las aflatoxinas, el cual ha sido considerado de gran peligro para los seres humanos y animales. (IICA, 2010, p. 103)

La aflatoxina es producida por los hongos del género *Aspergillus* (particularmente *Aspergillus flavus*) cuyas esporas se encuentran muy diseminadas en la naturaleza. Cantidades muy pequeñas de aflotoxinas pueden causar graves enfermedades y a veces, hasta la muerte. En el caso del café se ha identificado la Ocratoxina A, la cual es producida por *Aspergillus*. También se sabe que este hongo se desarrolla en condiciones ambientales cuando el café tiene contenido de humedad mayor a 16%, pero cuando el café se rehumedece en ambientes húmedos un contenido de humedad del 13% basta para que el hongo se desarrolle”. (IICA, 2010, p. 103, citando a Rodríguez & Solís, 2004)

Aunque hay otros factores que pueden ejercer influencia sobre la conservación de los granos almacenados, el contenido de humedad es el principal factor que influye en la calidad del producto almacenado. La prevención del crecimiento de los hongos sin emplear productos químicos se puede llevar a cabo controlando el contenido de humedad de los granos, la temperatura y el medio ambiente del almacenamiento. (IICA, 2010, p. 103, citando a Arias, 1993).

Durante el almacenamiento, la calidad del café no se mejora a lo sumo se mantiene, por un periodo limitado de tiempo. Para obtener un almacenamiento seguro, el café pergamino debe tener el contenido de humedad de comercialización (11-12%), ya que a un contenido de humedad mayor se constituye en un medio ideal para el desarrollo de hongos y mohos. (IICA, 2010, p. 103, citando a Puerta Q, Prevenga, 2003). “Se evitarán las mezclas de lotes de café pertenecientes a diferentes partidas y que no hayan completado su secamiento”. (IICA, 2010, p. 104)

IICA (2010), expone lo siguiente:

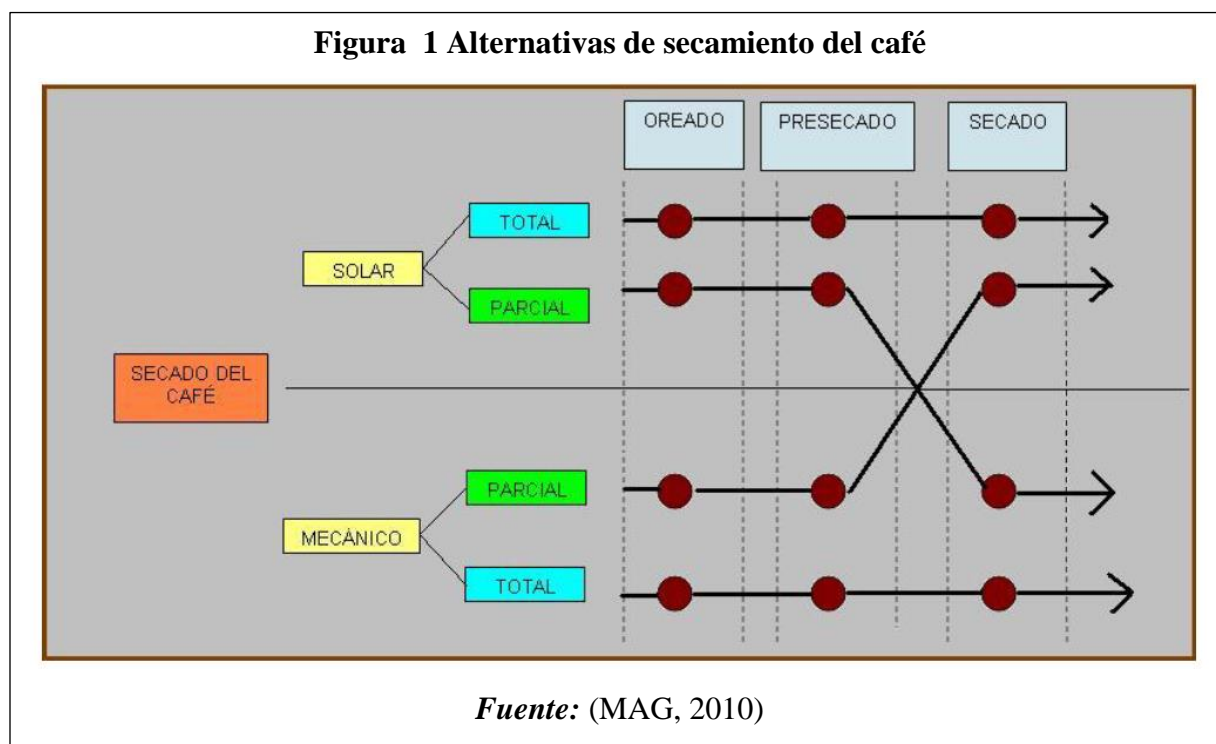
Al principio del secamiento cuando la humedad del café es muy elevada, los detectores de humedad electrónicos no pueden efectuar mediciones. Pero en las etapas avanzadas del secamiento, cuando el contenido de humedad desciende del 30%, muchos equipos electrónicos pueden medirla. En todo caso, el monitoreo tiene sentido para lograr una buena aproximación y control de la humedad justo en la etapa final; el objetivo es ajustar adecuadamente el control del proceso de secado para dar acertada finalización de este. (p.112)

Según IICA (2010):

El grano de café está vivo después de su beneficiado por vía húmeda. El café beneficiado correctamente conserva su capacidad de germinación, hecho que prueba su estado vital. Pero cuando el grano es sometido a un secado violento, durante el cual su temperatura se eleva por encima de los límites que puede tolerar, entonces el grano muere. Y el grano muerto tiene mala apariencia, pierde su color y se torna pálido y blanqueado. El grano blanqueado sufre rápidamente la oxidación y se suaviza, para luego tornarse blando y de color pardo, perdiendo, simultáneamente, todos los atributos de su calidad de taza. (p.115)

### Métodos de secado de café

El secamiento del café puede realizarse de dos maneras alternativas: el secado natural al sol o el secado mecánico. Estas pueden realizarse de manera independiente o combinada, como se muestra en la **Figura 1**. Según sea la alternativa seleccionada, se obtendrá un café con características de calidad diferentes. Así, con el secado solar total se obtiene el clásico café secado al sol. Con el secado mecánico total se obtendrá el café convencional. El café oreado y presecado al sol y secado mecánicamente tiene características similares al convencional. El oreado y presecado mecánico y secado al sol tiene características similares al secado al sol sin ser exactamente igual, pero su punto y color son mejores que el convencional. (MAG, 2010, p. 15)



Un sistema de secado de café debe corresponder con las etapas que lo componen, de manera que optimice el uso de los equipos y asegure un producto de calidad. Para esto es muy importante la selección de equipos, el uso de bajas temperaturas y el control del avance del secado mediante la determinación del contenido de humedad. (MAG, 2010, p. 15)

***Secado en forma natural (secado al solar).***

El secado al sol ha sido tradicionalmente valorado como el mejor método para el secado a punto del café, por una serie de ventajas que se le atribuyen en términos de la calidad que adquiere el grano. Entre estos atributos sobresalen el característico color verde azulado de algunas variedades de café, el olor característico del café en verde, las características de taza en las que se aprecia una mayor definición del perfil. Sin embargo, los tiempos de secado son muy prolongados, oscilando entre los 5 y 7 días, lo cual puede ser un problema dependiendo de las cantidades de café por secar y la disponibilidad de patios que se tenga. (MAG, 2010, p. 15)

Para este sistema se hace el uso de camas africanas, parihuelas o patios, que son alternativas más económicas y prácticas para aprovechar los beneficios del secado al sol. Por estas razones, esta práctica de secado a punto puede ser utilizada por los microbeneficios, siempre que esto signifique una ventaja en la calidad y la comercialización del café, destinándose solamente para algunos cafés especiales que se comercializan en mercados exclusivos. (MAG, 2010, p. 15)

Por otra parte, realizar el secado en el menor tiempo posible no significa que el proceso se deba acelerar de manera indiscriminada. En efecto, el secamiento puede acelerarse, por ejemplo, mediante el uso de altas temperaturas (70° C o más), lo cual puede acortar los tiempos de secado de manera significativa; sin embargo, esta práctica tendría consecuencias negativas en la calidad, por el daño que sufre el grano en cuanto a su apariencia y en la calidad de taza. (MAG, 2010, p. 15)

En este sistema de secado el café se coloca formando una capa de poco espesor. La masa de grano es removida y volteada frecuentemente para uniformar la humedad y la temperatura de los granos. Se recomienda voltear la masa de café seis veces al día, con frecuencia de una hora. Para efectuar el volteo se utilizan rastrillos especialmente contruidos a este propósito. El rastrillo es un instrumento de pala cuadrangular, ordinariamente de 20 a 25 cm de lado. Sea cual sea el método que se use (en patios, camas africanas o parihuelas), lo importante es la remoción constante del café para propiciar el secado parejo de los granos y la capa de grano no debe exceder los 5 cm (2 pulgadas) de espesor. (MAG, 2010)

***Secado artificial o mecánico (uso de aire caliente).***

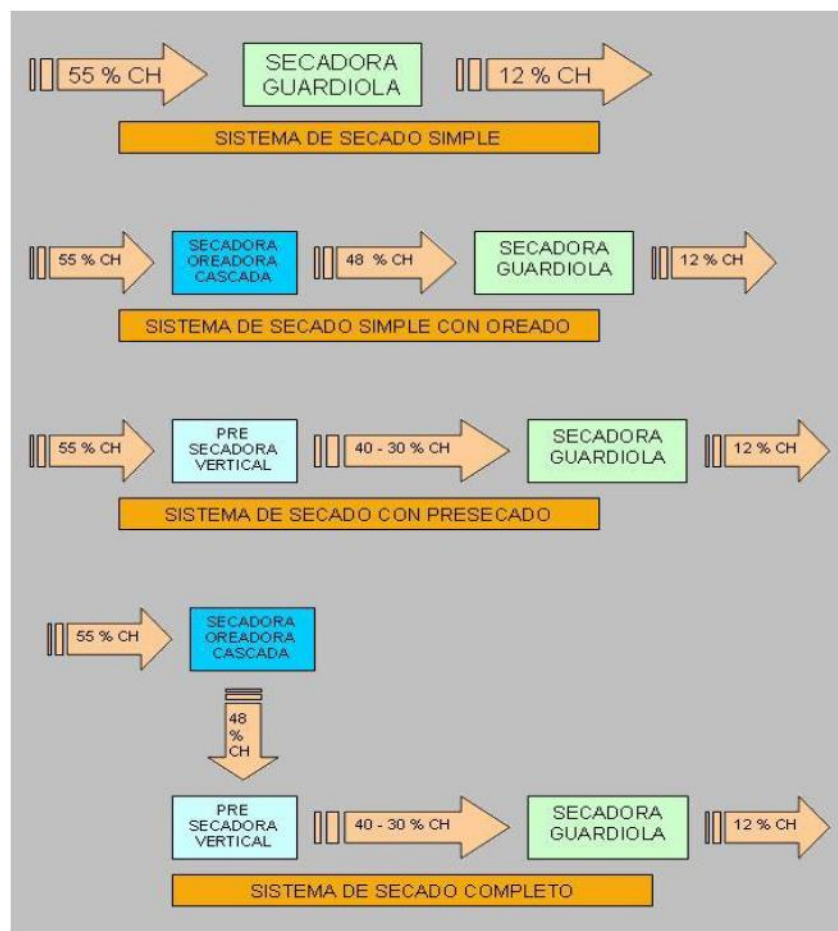
El secado mecánico consiste en hacer pasar una corriente de aire impulsada por un abanico a través de la masa de grano. El aire puede ser a temperatura ambiente o puede ser calentado de manera que la temperatura sea mayor al ambiente y así tener mayor capacidad de secado. En nuestro medio el uso de temperatura ambiente no es muy recomendable pues el aire no tiene mucha capacidad para remover humedad ya que la humedad relativa del ambiente es por lo general alta, lo que es propio de un país tropical como el nuestro. Por esta razón lo recomendable es calentar el aire a una temperatura que no ponga en riesgo la calidad del grano, como máximo 60°C. (MAG, 2010, p. 16)

La mayor ventaja del secado mecánico es que se tiene un mayor control de las condiciones de secado y no se depende de las condiciones del ambiente, pudiéndose secar tanto de día como de noche, con lo que se asegura que el grano puede secarse oportunamente sin poner en riesgo su calidad. Como referencia importante para explicar esta técnica de secamiento del café, se presentan los principales sistemas que pueden utilizarse de acuerdo con el equipo disponible en cada planta (Ver **Figura 2**). (MAG, 2010, p. 17)

Sistema de Secado Simple: Es el sistema más elemental, es el uso de una sola secadora para completar todo el secado del grano. La secadora más utilizada en este caso es la secadora guardiola, aunque puede utilizarse otro tipo de secadora como la estática. La eficiencia lograda es baja y los tiempos de secado son muy prolongados. Este sistema es el más utilizado en los microbeneficios debido a que, por lo general, se cuenta con un solo tipo de secadora y se desconoce los beneficios de realizar el secamiento por etapas. (MAG, 2010, p. 17)

Sistema de Secado Simple con Oreado: Consiste en practicar primero el oreado del café antes de ser secado en la secadora guardiola o estática. Este sistema permite acortar en algunas horas el tiempo de secado, aunque la eficiencia lograda es baja, sobre todo en la etapa correspondiente al presecado, pues las secadoras guardiola y estática no están diseñadas para el secamiento a velocidad constante. (MAG, 2010, p. 17)

**Figura 2 Sistemas de secado utilizados en Costa Rica**



*Fuente:* (MAG, 2010)

### Conceptos relevantes del secado de café.

#### *El grano de café está vivo después de su beneficiado por vía húmeda.*

El café beneficiado correctamente conserva su capacidad de germinación, hecho que prueba su estado vital. Pero, cuando el grano es sometido a un secado violento, durante el cual su temperatura se eleva por encima de los límites que puede tolerar, entonces el grano muere. Y el grano muerto tiene mala apariencia, pierde su color y se torna pálido y blanqueado. El grano blanqueado sufre rápidamente la oxidación y se suaviza, para luego tornarse blando y de color pardo, perdiendo, simultáneamente, todos los atributos de su calidad de taza. (IICA, 2010, p. 115)

### ***El mito de la tolerancia de alta temperatura al inicio del secamiento del café.***

Hay tendencia de los operadores a pensar que al inicio del secamiento el café puede tolerar el uso de temperaturas elevadas. Este mito se sustenta en que el grano está muy húmedo y que no se calentará o erróneamente, se induce a creer que no se deteriorará. Ambas suposiciones son muy equivocadas. Para aclarar este tema, IICA (2010, pp. 115-116) cita textualmente el resumen de una investigación específica realizada en CENICAFE, Colombia.

Seminario ilustrado con datos tendientes a la fijación de normas prácticas de secado y almacenamiento de café, según las condiciones ambientales, para no demeritar su peso ni su calidad. El sabor y el aroma pueden perderse en parte con un secado incorrecto. A mayor cantidad de agua libre en los granos la temperatura debe ser más baja, debido a que la expulsión de agua por evaporación está en razón directa con la cantidad de calor dado al sistema de secado. El agua en el grano está ejerciendo una acción disolvente de las sustancias fácilmente solubles del mismo; al aplicarle calor a un grano demasiado húmedo, la temperatura del agua aumenta considerablemente y su acción de disolución se hace mayor; esta agua por translación sale hacia afuera con las sustancias disueltas en ella. A medida que el café va perdiendo su agua de capilaridad, el arrastre de sustancias fácilmente solubles en agua caliente va siendo menor, pudiéndose entonces elevar lentamente la temperatura de secado. (López, 1952).

### ***Temperatura de secamiento y temperatura de grano.***

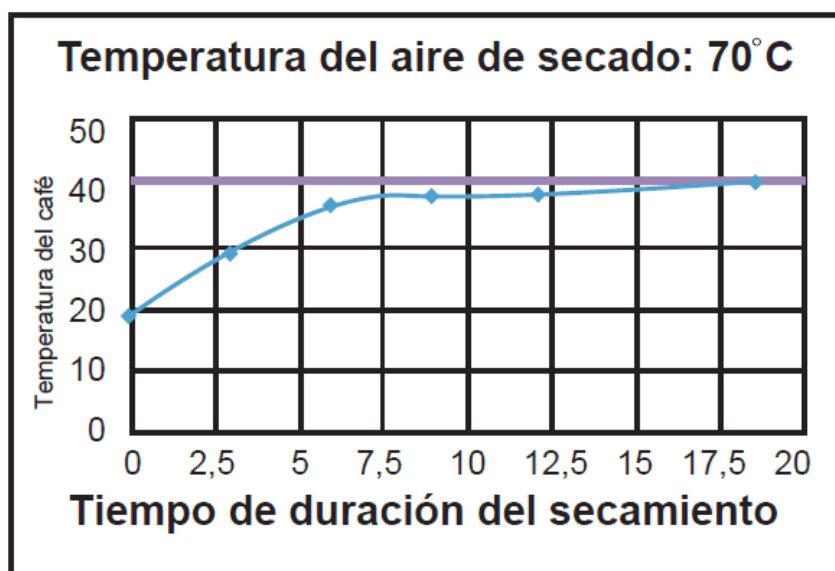
Es importante tener muy claro que la temperatura utilizada para secado es muy diferente a la temperatura del café. Según IICA (2010):

- La temperatura de secado (en secadoras mecánicas) es la temperatura del aire caliente que está ingresando a la secadora y atraviesa la masa de café (que está siendo secada). Esta es la temperatura que el operador de la secadora puede gobernar mediante mecanismos propios de su sistema de secado mecanizado.
- La temperatura del café es la temperatura que alcanzan los granos de café, en sí mismos. Una forma muy sencilla de medir la temperatura del café es utilizando el detector de humedad electrónico. Los detectores requieren una corrección por temperatura del café, lo

cual, de paso, permite chequear la temperatura de la muestra de café que se tomó de la secadora, cuando se monitorea el avance del secamiento.

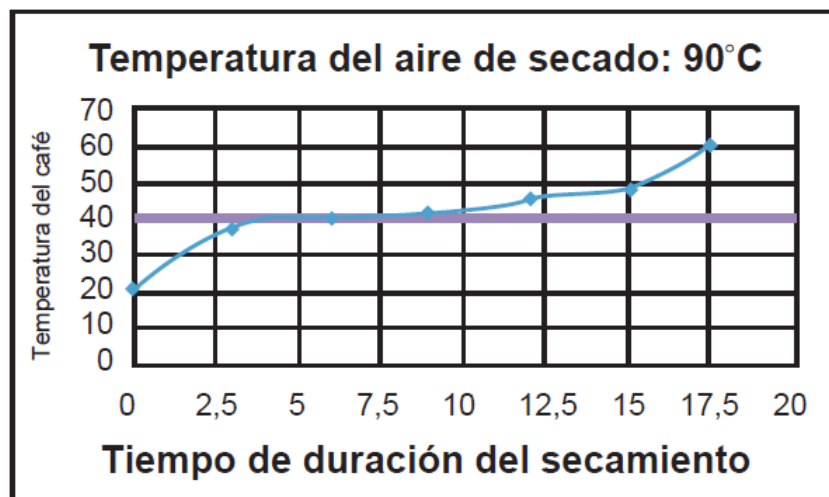
Pero hay que desarrollar la capacidad para relacionar la temperatura de secado con la correspondiente temperatura que el café alcanza producto del paso de aire caliente. Y la temperatura del café varía para los diferentes tipos de secadoras, aunque se aplique la misma temperatura de secado. A continuación, se muestran dos gráficos (**Gráfico 1** y **Gráfico 2**), que ilustran este concepto. (Cleves S., 1995, p. 116)

**Gráfico 1** Temperatura del aire de secado (70° C) vs temperatura del café, en relación con el tiempo



*Fuente:* (IICA, 2010)

**Gráfico 2. Temperatura del aire de secado (90° C) vs temperatura del café, en relación con el tiempo**



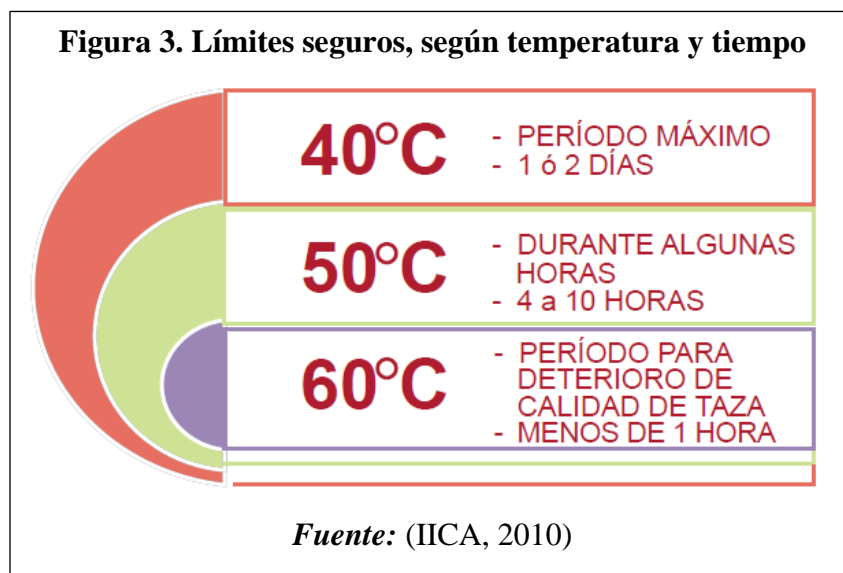
*Fuente:* (IICA, 2010)

Para mejorar el concepto de temperatura del grano y su límite de tolerancia, a continuación, se citan textualmente los siguientes párrafos: (IICA,2010, p.117-118, citando a Sivetz & Michael & Foote, 1963). Las mejores generalizaciones que se pueden hacer son:

- La temperatura del café, en sí mismo, para que pueda ser comparable debe determinarse aparte de la corriente de aire. Un método consiste en remover una muestra de la secadora, colocarla rápidamente en un contenedor aislante, como un “termo”, colocar un termómetro y tomar la lectura más alta de temperatura a pocos minutos de la toma. El resultado será ligeramente inferior al promedio dentro de la secadora. Aún con este método los diferenciales internos de temperatura de la secadora permanecerán.
- Como una guía aproximada, puede definirse que:
  - El café tolerará 40°C por un día o dos
  - El café tolerará 50°C por pocas horas: 4 a 10 horas
  - La tolerancia a 60°C es por un período menor a 1 hora.

En la **Figura 3**, se muestra este concepto.

- De Hecho: Café seco (12%bh) sufre pérdida perceptible de sabor en aproximadamente una semana a 32°C. Es mejor almacenarlo bajo refrigeración.



Vale la pena subrayar que la temperatura del café varía para los diferentes tipos de secadoras, aunque se aplique la misma temperatura de secado. Límite seguro de temperatura:

- “Debe entenderse claramente que no es suficiente con establecer solamente un límite de temperatura.
- El tiempo durante el cual se mantiene el café a una temperatura dada es lo que resulta importante para el mantenimiento de la calidad.
- Dado que las condiciones en los diferentes tipos de secadoras varían grandemente y dado que las temperaturas del café constantemente se mueven hacia abajo y hacia arriba, el programa de temperaturas, aún con el mismo secador varía con los diferentes operadores.
- Además, el avance del secado puede ser interrumpido por períodos de reposo para equilibrar el contenido de humedad.
- Por estas razones es imposible especificar niveles seguros de temperatura del café o aún combinaciones seguras de tiempo y temperatura.
- Es aún menos significativo especificar temperaturas del aire de secado porque la temperatura del café variará con respecto a la temperatura del aire especialmente al inicio del secado cuando el café fresco ha entrado a la secadora y está perdiendo humedad rápidamente debido al enfriamiento por evaporización.

- A veces, la superficie de los granos estará considerablemente más caliente que su centro. Sobrecalentamiento durante el secado produce sabores agrios o “cocinados” en la bebida de café.” (Sivetz & Michael & Foote, 1963)

La temperatura del café es diferente para diferentes tipos de secadoras, aunque en toda comparación se utilice la misma temperatura de secado. Insistiendo nuevamente en que la temperatura que alcanza el café durante el secamiento no debe sobrepasar 40°C. (IICA, 2010, p. 120).

El MAG (2010), indica que un efecto negativo que genera la aplicación de altas temperaturas poco controladas para aligerar el proceso de secado es el llamado “springer”, que es cuando por alta temperatura se daña el embrión y el grano muere. Este daño es fácilmente reconocible pues presenta un punto negro en el embrión y con el tiempo el grano adquiere una coloración grisácea. Es importante anotar que, este daño, se presentará siempre que el grano sea expuesto a altas temperaturas.

Durante el oreado y el presecado mecánico con temperaturas superiores a 65°C. Durante el secado con temperaturas superiores a 60°C y aún en el secado solar, cuando un grano se rezaga en el patio y es expuesto de forma individual a altas temperaturas del medio día, puede provocarse este daño. (p. 14)

### **Tipos de secadores de café.**

Existe gran variedad de sistemas de secado de café, ya sea por secado solar o secado mecánico. Lo anterior depende del país donde se produce la fruta, ya que los diferentes equipos o métodos han sido adaptados o diseñados de acuerdo con los niveles de producción, necesidades geográficas, condiciones climáticas, propias de cada región o país o bien a partir de las capacidades de inversión disponibles. Por lo tanto, se podrán encontrar secadores o técnicas de la misma naturaleza, pero con ciertas variaciones en su funcionamiento o características físicas. Dicho lo anterior se mencionará algunos de los sistemas más comunes en Costa Rica.

#### ***En secado solar.***

- Camas Africanas: Consiste en depositar los granos húmedos en camas africanas, que por lo general son de fabricación casera, construidas con marcos de madera o metálicos, con poca inclinación del centro hacia los lados, la base donde se deposita los granos está formado

por malla plástica y zarán, estas camas son desmontables, para ser guardadas bajo techo, una vez terminada la cosecha, lo que permite alargar la vida útil de las mismas. Se diseñan de 6 m de largo cuando el marco es metálico, aprovechando el largo de la pieza, y se da un ancho de 2 m, teniendo un área de 12 m<sup>2</sup>, que permite secar entre 2,5 y 3 fanegas. Los sobres se colocan en postes de madera a una altura de 75 cm, lo que permite que el aire circule por debajo. El tiempo de secado es relativo; sin embargo, con buen tiempo en ocho días se puede obtener un secado para almacenamiento. Una de las ventajas de las camas africanas sobre los patios cementados es su costo, el productor puede usar madera de la finca. Otra alternativa a las camas africanas son las parijuelas, que tienen diferentes dimensiones, es común que se construyan de 90 cm de ancho por 2 m de largo, son de madera y la base donde se deposita el café húmedo es de sarán. Tienen una capacidad de medio quintal de café pergamino húmedo. (MAG, 2014, pp. 23-24)

- Patios cementados: Es parte de la infraestructura complementaria del secado mecánico, que generalmente se usa para pre-secar el café. Disminuye la humedad del grano para facilitar el secado mecánico, y reducir costos. El tamaño del patio es una cuestión de disponibilidad de espacio, de recursos económicos y de clientes que prefieren el café secado al sol. Este tipo de inversión debe valorarse por su alto costo. Se recomienda iniciar con un patio pequeño para diferenciar lotes o calidades. Una vez el café en el patio, debe moverse varias veces al día para facilitar el secado. En las tardes se recoge formando montículos que se tapan con plástico para evitar que se humedezca con el sereno o la lluvia. Hay que tener ciertos cuidados a la hora de construirlos, por ejemplo: el piso no debe lujarse, más bien debe quedar áspero; cuando se luja (afina) este pierde porosidad y retiene la humedad. Lo que se persigue es que esta se disipe por los poros. Se recomienda que en la base se coloque malla electrosoldada para facilitar el amarre del cemento y evitar que se hagan huecos en el corto tiempo. Se estima que por cada metro cuadrado se puede secar media fanega. Por lo general se observa, que en los micro beneficios el patio cementado y las camas africanas son complementarios. (MAG, 2014, pp. 25-26)
- Secado en invernaderos: En este sistema de secado, se aprovecha la radiación solar y la temperatura interna del invernadero, la decisión de esta forma de secar café va a depender del tamaño del beneficio, la capacidad de inversión, la época de cosecha. La infraestructura

puede ser básica, en madera y techo de plástico; o más acabados, simulando los invernaderos para producción vegetal, diseñados en tubo metálico. (MAG, 2014, p. 26)

### ***En secado mecánico.***

- Secado con estática: La estática es un recipiente rectangular donde se deposita el grano para ser secado; puede ser construido en metal, en block de cemento, con un sobre piso metálico perforado, por donde circula el aire caliente hacia arriba donde se encuentra el café. La recomendación es siempre usar hornos de fuego indirecto, que tenga la capacidad de secar eficientemente el café, a una temperatura constante de 55 °C; que use cascarilla del mismo café como material de combustión y que todos sus componentes estén diseñados para secar el volumen de café pergamino que se proyecta. (MAG, 2014, p. 28)
- Secado con guardiola: A diferencia de sistema de secado con estática, se presenta el sistema de secado con tambor rotatorio o “guardiola”, en este caso el café pergamino puede pasar por un proceso de pre-secado o bien de forma directa a la guardiola, donde el café se mueve constantemente en sentido rotatorio, a medida que se va secando. Tanto en las guardiolas como en las estáticas, se pueden hacer divisiones que permiten secar diferentes micro lotes a la vez. Una desventaja que tiene el secado con guardiola con respecto a la estática es el costo, el sistema de guardiola lleva más accesorios, motores, elevadores, por lo que la inversión inicial es alta. Sin embargo, las dos cumplen la misma función, que es secar el café. (MAG, 2014, p. 31)

### **Termodinámica**

Jiménez, Gutiérrez y Barbosa (2014, p. 44) afirman que “La termodinámica se define básicamente como una ciencia que se encarga del estudio de las leyes que gobiernan la transformación de energía, la dirección en la cual fluye el calor y la disponibilidad (exergía) de la energía para hacer un trabajo”. Es importante señalar que estos procesos de transformación de energía pueden estar acompañados de cambios físicos y químicos.

Dicho lo anterior, el proceso de secado de café es posible analizarlo, comprenderlo, describirlo e incluso demostrarlo a partir de leyes, conceptos, fenómenos y ecuaciones que rigen en el mundo de la termodinámica.

### **Primera ley de la termodinámica.**

Apuy y Belhumeur (2015), mencionan que la primera ley de la Termodinámica es aquella que define de manera sencilla el balance que existe entre la energía inicial total de un proceso y la energía final total de este. Dicho en otras palabras, esta ley responde al principio que describe, de manera matemática, que el cambio que se da en la energía total de un proceso es igual a cero, o sea, asegura que la energía no se crea, ni se destruye, sino que se transforma.

#### **Ecuación 3. Ecuación de energía**

$$\Delta E_{1-2} = E_1 - E_2 = 0 \quad (3)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*, (2015)

#### **Ecuación 4. Ecuación de energía**

$$\Delta E_{1-2} = \Delta W + \Delta Q + \Delta E_{masa} \quad (4)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*, (2015)

Es importante mencionar que para el análisis que implica el diseño de un secador es necesario hacer uso de la primera ley en más de una ocasión, por lo tanto, mostrar el desarrollo de esta en cada oportunidad que es aplicada es poco funcional y no es la finalidad de este proyecto, pero de ser necesario se demostrará (p. 17).

### **Segunda ley de la termodinámica.**

La segunda ley de la Termodinámica viene a determinar la dirección en la que se da un proceso, de esta forma demuestra si el mismo es posible que se lleve a cabo en la realidad, ya que, teóricamente los balances energéticos que establece la primera ley de la Termodinámica no restringen de forma alguna la dirección en la cual se da dicho proceso. La segunda ley introduce un concepto más, este se explica de forma clara en el libro *Termodinámica* de Yunus Cengel, donde se afirma que la energía tiene tanto cantidad como calidad, por consiguiente, es de suma importancia para los ingenieros conservarla.

Básicamente la segunda ley da las herramientas necesarias para determinar la calidad de la energía. La Segunda ley de la Termodinámica se comprende por medio de dos enunciados clásicos desde el punto de vista físico, el primero es el enunciado de Kelvin-Planck y dice lo siguiente “Es imposible que un dispositivo que opera en un ciclo reciba calor de un solo depósito y produzca una

cantidad neta de trabajo”. De esta forma el enunciado afirma que ninguna máquina térmica puede convertir todo el calor que recibe en trabajo útil o bien tener una eficiencia térmica del 100%.

Dicho lo anterior se concluye que, todas las máquinas térmicas funcionan en ciclos y para que dicho ciclo se complete siempre es necesario desperdiciar cierta cantidad de energía para volver al punto inicial, incluso en condiciones idealizadas. (Cengel & Boles, 2006)

El segundo es el enunciado de Clausius que afirma: “Es imposible construir un dispositivo que opere en un ciclo sin que produzca ningún otro efecto que la transferencia de calor de un cuerpo de menor temperatura a otro de mayor temperatura”. El enunciado de Clausius expone que no es posible que se transfiera el calor por sí solo de un medio frío a un medio más caliente, dicho de otra forma, sin que se dé un trabajo de por medio. (Cengel & Boles, 2006)

## Gases

### Presión parcial

Apuy *et al.* (2015), indican que, en una mezcla de gases que no reaccionan químicamente entre sí, cada uno de los gases se distribuye de manera uniforme a través del recipiente que los contiene y cada molécula se mueve independientemente de las demás. Es decir, cada gas actúa como lo haría en ausencia de los otros gases. Por esta razón la presión que ejerce un gas en una mezcla es igual a la que ejercería si estuviera solo en el recipiente y recibe el nombre de presión parcial. Conforme a lo anterior, la Ley de Dalton es la encargada de regir la presión de la mezcla (p. 18).

### Ley de Dalton

De acuerdo con Apuy *et al.* (2015), esta ley es también conocida como la ley de las presiones parciales y establece que la presión total ejercida por una mezcla de gases es igual a la suma de las presiones parciales de los gases que la componen (p. 19). Por lo tanto:

#### Ecuación 5. Ley de las presiones parciales o ley de Dalton

$$P_{total} = P_A + P_B + P_C + \dots \quad (5)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*, (2015)

### **Presión de vapor**

“A una temperatura determinada, es la presión que ejerce la fase gaseosa o vapor sobre la fase líquida cuando es alcanzado el equilibrio dinámico entre ambas fases. Este valor es independiente de la cantidad de líquido y vapor existentes” (Apuy *et al.*, 2015, p.19).

### **Ecuación de estado para gases ideales**

Las propiedades de un gas ideal para diferentes condiciones están dadas por la siguiente ecuación de estado:

#### **Ecuación 6. Ecuación de estado para gases ideales**

$$PV = nRT \quad (6)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*, (2015)

Es posible observar que esta depende de la presión P, del volumen V y de la temperatura T. Donde R es la constante universal de los gases ideales, esta es igual a 8.314510 J/Kmol, mientras que n es el número de moles del gas.

De esta forma, se logra definir que, para el caso de una presión y temperatura constante se cumple la siguiente relación:

#### **Ecuación 7. Gases ideales a presión y temperatura constante**

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{n_1}{n_2} \quad (7)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*, (2015)

### **Principios de la Psicrometría, acondicionamiento del aire y sus aplicaciones.**

Según (Cárdenas y Hernández, 2003), la Psicrometría es el estudio de las mezclas de aire y vapor de agua. Puesto que el control de temperatura y humedad son las dos funciones más importantes de un sistema de aire acondicionado, es importante que entendamos cómo se comporta el aire y vapor de agua y cómo podemos utilizar su comportamiento para alcanzar nuestros objetivos en aire acondicionado. Esto es fundamental, no solo en el diseño de un nuevo sistema de acondicionamiento de aire, sino también en el diagnóstico de fallas en un sistema existente (p. 44). En pocas palabras, Cahuana (2014) afirma que “La Psicrometría es la ciencia que estudia las propiedades termodinámicas de la mezcla de aire-vapor de agua, y el efecto de la humedad atmosférica” (p. 19).

### **Propiedades del aire**

El aire está conformado por una mezcla de gases (nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, etc.) que se comportan de acuerdo con la ley de Dalton, es decir, cada uno actúa independientemente de los otros como si estos no estuvieran. A pesar de este comportamiento, se ha considerado, para efectos prácticos, tratar al aire como un solo compuesto que sigue la ley de los gases ideales. Puede considerarse entonces que tiene peso, densidad, temperatura, calor específico, entre otros. (Apuy *et al.*, 2015, p. 20).

### **Propiedades del vapor de agua**

El vapor de agua contenido en el aire, comúnmente conocido como humedad, se refiere en realidad al vapor de agua que existe junto al aire en un espacio dado. Verdaderamente este no se encuentra contenido dentro del aire, sino que comparte el volumen de un mismo espacio. La presión de vapor es la presión parcial que ejerce el vapor agua y es equivalente a la presión que ejercería el vapor de agua si estuviera solo a la misma temperatura y volumen del aire. (Apuy *et al.*, 2015, p. 20).

### **Aire seco y aire atmosférico**

Normalmente, el aire en la atmósfera contiene cierta cantidad de vapor de agua (o humedad) y se conoce como aire atmosférico. Por otra parte, el aire que no contiene vapor de agua es llamado como aire seco. Para el estudio del aire es conveniente tratarlo como una mezcla de vapor de agua y aire seco, ya que la composición del aire seco permanece relativamente constante, pero la cantidad de vapor de agua varía por la condensación y evaporación de los océanos, lagos, ríos, regaderas e incluso del agua del cuerpo humano.

Es común que la temperatura del aire en aplicaciones de acondicionamiento de aire varíe entre -10 a cerca de 50 °C, donde permite, en este intervalo de temperaturas, ser tratado como un gas ideal. También, en este caso, sería ventajoso tratar de igual forma al vapor de agua en el aire como un gas ideal, considerando que se sacrifica un poco de exactitud por tal ventaja. Dicho lo anterior, a 50 °C la presión de saturación del agua es de 12.3 kPa y a presiones por debajo de este valor, es posible tratar el vapor de agua como gas ideal con un error menor a 0.2 % e incluso cuando se trata de un vapor saturado.

En resumen, según lo anterior el vapor de agua en el aire obedece a la relación de gas ideal  $Pv = RT$ . De esta forma, el aire atmosférico es posible tratarlo como una mezcla de gases ideales y, por consiguiente, su presión es la suma de la presión parcial del aire seco  $P_a$  y la del vapor de agua  $P_v$ , con la siguiente ecuación se define el concepto:

**Ecuación 8. Presión del aire atmosférico**

$$P = P_a + P_v \text{ (kPa)} \quad (8)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

**Aire saturado**

El aire saturado con humedad es el término utilizado para referirse al aire contenido en un espacio cuya capacidad máxima de contener vapor de agua, a una temperatura determinada, se ha alcanzado. Aunque el espacio, y no el aire, es el que está saturado, se ha utilizado este término por conveniencia. (Apuy *et al.*, 2015, p. 20).

**Humedad relativa**

Aunque el contenido de humedad en el aire en realidad nunca sobrepasa unos cuantos gramos por metro cúbico de aire seco, la diferencia que representa en término de capacidad y velocidad de evaporación del agua es muy grande. Para entender este fenómeno con mayor facilidad surge el término humedad relativa. Dossat define la humedad relativa como la cantidad de humedad en una muestra dada de aire, en comparación con la cantidad que el aire tendría, estando saturado y a la misma temperatura de la muestra. Esta, habitualmente, se expresa en porcentaje con la notación % H.R. (Apuy *et al.*, 2015, p. 21).

Un método empleado para determinar la humedad relativa es mediante la medición de la presión de vapor del agua en el aire respecto a la presión máxima que pueda tener, esta presión máxima corresponde a la presión de saturación del agua  $P_g$  a la temperatura predominante en el aire. La razón por la cual la presión de vapor se utiliza para efectuar cálculos de cantidades de humedad de aire, se debe a que tanto el aire y el vapor de agua en rangos de temperatura y presión ambientales tienen un comportamiento similar al de mezclas de gases ideales y, por tanto, sus relaciones de masa y volumen se relacionan en proporción directa de un estado a otro. (Apuy *et al.*, 2015, p. 21). Por consiguiente, la humedad relativa se puede calcular a partir de la siguiente ecuación:

### Ecuación 9. Humedad relativa

$$\phi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_g V}{R_g T}} = \frac{P_v}{P_g} = \frac{\%H.R.}{100} \quad (9)$$

donde  $P_g = P_{sat} a T$ .

Fuente: Apuy *et al.*(2015)

### Humedad absoluta

La humedad absoluta se refiere a la masa del vapor de agua por unidad de masa del aire seco. Esto puede darse en un espacio con o sin aire. Al calentar el aire aumenta la capacidad de retener agua por lo que se reduce la humedad relativa del recinto manteniéndose la humedad absoluta. (Apuy *et al.*, 2015, p. 21).

El valor de la humedad absoluta se puede determinar aplicando los mismos principios utilizados para calcular la humedad relativa, la diferencia radica que en este caso la presión de vapor se compara con la presión total del gas a la temperatura predominante. (Apuy *et al.*, 2015, p. 21). La expresión matemática que demuestra lo anterior, queda de la siguiente forma:

### Ecuación 10. Humedad absoluta

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{\frac{P_v V}{R_v T}}{\frac{P_a V}{R_a T}} = \frac{P_v}{P_a} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} = 0.622 \frac{P_v}{P - P_v} \quad (10)$$

donde P es la presión total.

Fuente: Apuy *et al.*(2015)

### Punto de rocío

El punto de rocío es la temperatura a partir de la cual el vapor de agua contenido en el aire empieza a condensarse. Cuando alcanza el punto de saturación el aire no posee la capacidad de contener más agua por lo que si se reduce su temperatura el vapor se condensa. La humedad relativa se mantiene al 100%, sin embargo, la humedad absoluta se reduce conforme se disminuye la temperatura de saturación a la presión parcial de la humedad en el aire, o sea la presión de vapor de esta. (Apuy *et al.*, 2015, p.22).

### **Ecuación 11. Temperatura o punto de rocío**

$$T_{pr} = T_{sat \ a \ P_v} \quad (11)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*, (2015)

### **Entalpía de la mezcla vapor de agua y aire**

El calor agregado o extraído de una mezcla de vapor de agua y aire cumple diferentes funciones. Una consiste en aumentar o disminuir la temperatura de la mezcla lo cual se conoce como calor sensible, mientras que el flujo de calor empleado para la evaporación o condensación del vapor de agua recibe el nombre de calor latente. El paso de una condición (humedad relativa, temperatura) definida a otra requiere de aplicación o sustracción de energía por kg de aire seco. Una manera de obtener la entalpía es mediante la **Ecuación 12**, pero para simplificar dichos cálculos en la práctica se emplea una carta psicrométrica la cual será explicada más adelante. (Apuy *et al.*, 2015, p.22).

### **Ecuación 12. Entalpía**

$$h = h_a + \omega h_g \left( \frac{kJ}{kg \text{ aire seco}} \right) \quad (12)$$

**Fuente:** Apuy *et al.*(2015)

### **Temperatura de bulbo seco**

“La temperatura de bulbo seco corresponde a la temperatura del aire seco indicada por los termómetros ordinarios. Se obtiene a partir del elemento sensor de un termómetro en condición seca”. (Apuy *et al.*, 2015, p.22).

### **Temperatura de bulbo húmedo**

La  $T_{bh}$  es posible obtenerla a partir del termómetro de bulbo húmedo, el cual se diferencia de un termómetro normal debido a la presencia de una pequeña tela o mecha humedecida con agua en el elemento sensor del termómetro. Al estar humedecido, parte del agua se evapora si el recinto se lo permite. Esto es un proceso que requiere energía, por tanto, la temperatura del sensor disminuye. A mayor humedad relativa, menor es la capacidad de evaporación, por consiguiente, será menor la diferencia de temperatura entre el termómetro de bulbo seco y el termómetro de bulbo húmedo. En el caso contrario, a menor humedad relativa mayor es la

capacidad de evaporación y, por ende, mayor será la diferencia de temperatura entre el termómetro de bulbo seco y el termómetro de bulbo húmedo (Apuy *et al.*, 2015, p. 23).

### **Densidad**

La densidad se define como la masa por unidad de volumen, como se muestra en la **Ecuación 13**. (Cengel & Boles, 2012, p. 13):

#### **Ecuación 13. Densidad**

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (13)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

### **Volumen específico**

Básicamente corresponde al recíproco de la densidad y se define como el volumen por unidad de masa, la **Ecuación 14** corresponde a dicho concepto (Cengel & Boles, 2012, p. 13):

#### **Ecuación 14. Volumen específico**

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (14)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

### **Energía estática y baja humedad<sup>3</sup>**

“Al disminuir la humedad presente en el aire aumenta considerablemente la cantidad de energía electrostática por lo que es de suma importancia considerar este efecto para un proceso de secado en el cual intervienen sustancias inflamables” (Apuy *et al.*, 2015, p. 23).

### **Carta psicrométrica**

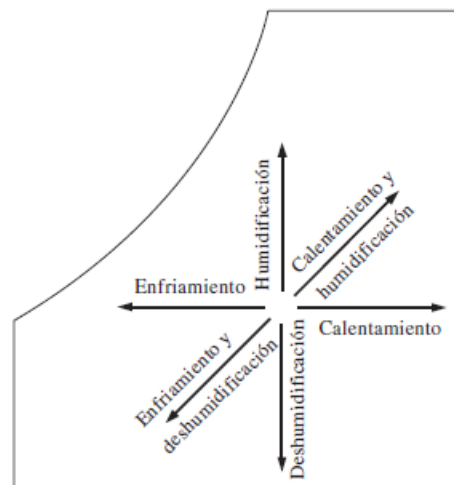
Para efectos de simplificar los cálculos relacionados con la psicrometría del aire se utiliza una gráfica de las propiedades del aire que contiene acerca de la temperatura de bulbo seco, humedad relativa, humedad absoluta, temperatura del punto de rocío, volumen específico, entalpía, propiedades del aire a una condición dada. Esta se define para diferentes presiones, es decir, a diferentes altitudes sobre el nivel del mar. Es importante indicar que, para dar uso correcto a dicha gráfica, se debe contar con al menos dos entradas o variables de las anteriormente mencionadas, esto para cada punto en estudio según el sistema y que de tal forma permitan relacionar cada uno de ellos. (Apuy *et al.*, 2015, p. 23). (Ver **Anexo B**)

### Procesos de acondicionamiento del aire

Para mantener una vivienda o una construcción industrial a la temperatura y humedad deseadas son necesarios algunos procesos definidos como “acondicionamiento del aire”. Estos procesos incluyen el calentamiento simple (elevar la temperatura), el enfriamiento simple (reducir la temperatura), la humidificación (agregar humedad) y la deshumidificación (eliminar humedad). Algunas veces dos o más de estos procesos son necesarios para llevar el aire al nivel de temperatura y humedad que se desea.

Diversos procesos de acondicionamiento de aire se ilustran en la carta psicrométrica de la **Figura 4**. Advierta que los procesos de calentamiento y enfriamiento simple aparecen como líneas horizontales en esta gráfica, puesto que el contenido de humedad del aire permanece constante ( $\omega = \text{constante}$ ) durante estos procesos. El aire se calienta y humidifica en el invierno y se enfría y deshumidifica en el verano. Observe cómo aparecen estos procesos en la carta psicrométrica. (Cengel & Boles, 2012, p. 749)

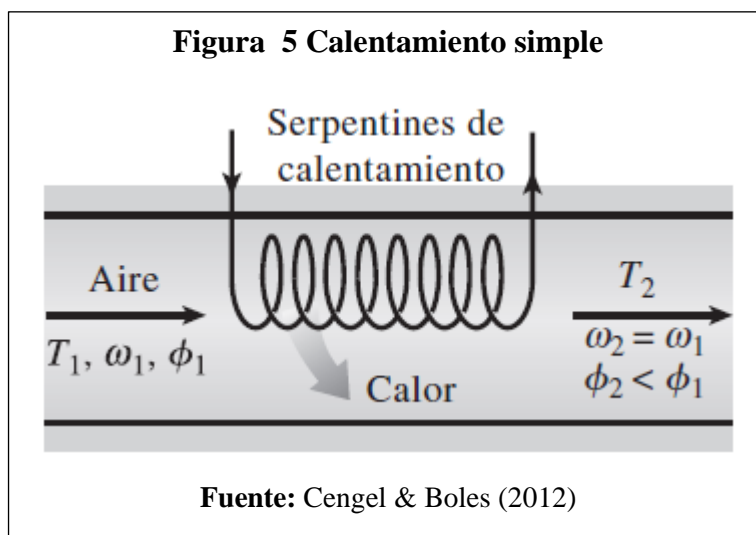
**Figura 4 Dirección de los procesos de acondicionamiento del aire en la carta psicrométrica**



**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

### Calentamiento y enfriamiento simples ( $\omega = \text{constante}$ )

Es común que el aire en este tipo de sistemas se calienta al circular por un ducto que contiene tubos para los gases calientes o los alambres de la resistencia eléctrica, como se puede observar en la **Figura 5**. Es importante aclarar que la cantidad de humedad absoluta en el aire permanece constante, ya que no se está agregando humedad ni se elimina aire. El proceso de calentamiento se da en la dirección de aumento de la temperatura de bulbo seco siguiendo una línea horizontal específica constante en la carta psicrométrica. Por otra parte, la humedad relativa del aire disminuye durante un proceso de esta naturaleza e incluso cuando la humedad absoluta permanece constante. Esto es producto de que la humedad relativa es la relación entre el contenido de humedad y la capacidad del aire de sostener humedad a la misma temperatura, dicha capacidad de sostener humedad tiende a aumentar con la temperatura. (Cengel & Boles, 2012, p. 750)



Para el análisis de este proceso se consideran las siguientes ecuaciones, en el caso de la conservación de la masa del aire seco y el agua se utiliza la **Ecuación 15** y **Ecuación 16** respectivamente:

#### **Ecuación 15. Conservación de la masa del aire seco**

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \quad (15)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

#### **Ecuación 16. Conservación de la masa del agua**

$$\omega_1 = \omega_2 \quad (16)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

Para el análisis de la conservación de energía se utiliza la **Ecuación 17**, esto si se descarta el trabajo de algún ventilador utilizado en el proceso:

**Ecuación 17. Conservación de la energía calentamiento simple**

$$\dot{Q} = \dot{m}_a(h_2 - h_1) \text{ o } q = h_2 - h_1 \quad (17)$$

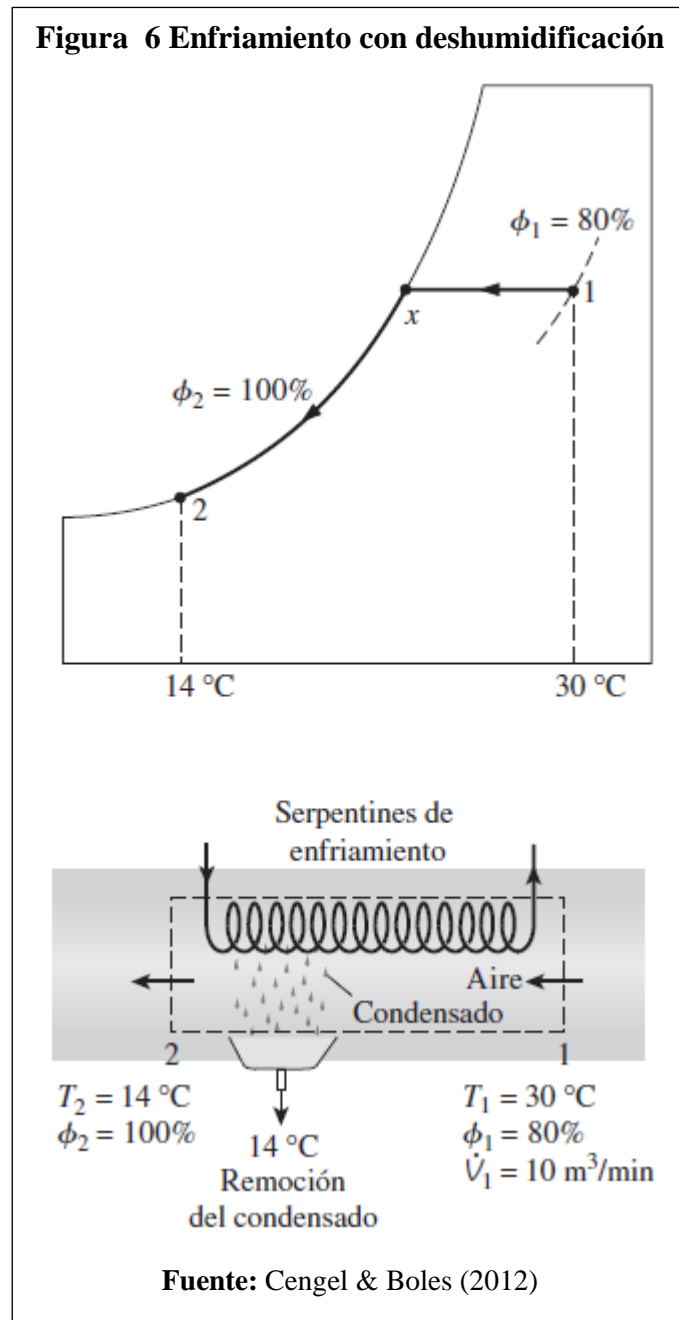
**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

donde  $h_1$  y  $h_2$  son las entalpías por unidad de masa del aire seco a la entrada y a la salida de la sección de calentamiento o enfriamiento, respectivamente. (Cengel & Boles, 2012, p. 750)

**Deshumidificación del aire**

En la mayoría de los sistemas de secado, se busca mediante la combinación de enfriamiento y deshumidificación la reducción de la cantidad de vapor de agua en el aire. La remoción de humedad utilizando procesos mecánicos siempre viene acompañada de un enfriamiento sensible debido a que se basa en el principio del punto de rocío, mencionado anteriormente. Se hace pasar el aire con alto contenido de humedad por un serpentín cuya temperatura se encuentra por debajo del punto de rocío. Al entrar en contacto con dicho serpentín disminuye su temperatura hasta saturarse por completo. El enfriamiento posterior obliga al vapor contenido en dicho aire a condensarse y por lo tanto disminuye la humedad absoluta que contiene. (Apuy *et al.*, 2015, p. 24).

En distintas literaturas sobre termodinámica se puede encontrar este proceso bajo el nombre de enfriamiento con deshumidificación. En la **Figura 6** se muestra un ejemplo de este proceso, donde quizás sea necesario mencionar que en algunas aplicaciones el aire frío y saturado como lo es en el estado 2 del ejemplo de la **Figura 6** se envía directamente a la habitación, donde se mezcla con el aire de dicho recinto, sin embargo, en algunas ocasiones el aire en el estado 2 puede estar a la humedad específica requerida, pero no así a la temperatura deseada, quizás sea muy baja, por lo tanto, se hace pasar este aire por una etapa de calentamiento donde su temperatura se lleva al nivel ideal según la aplicación. (Cengel & Boles, 2012, p. 753)



El balance de masa del aire seco está dado por la **Ecuación 18**:

**Ecuación 18. Balance de masa del aire seco**

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \quad (18)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

El balance de masa del agua está dado por la **Ecuación 19**:

**Ecuación 19. Balance de masa del agua**

$$\dot{m}_{a_1} \omega_1 = \dot{m}_{a_2} \omega_2 + \dot{m}_w \rightarrow \dot{m}_w = \dot{m}_a (\omega_1 - \omega_2) \quad (19)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

El balance de energía está dado por la **Ecuación 20**:

**Ecuación 20. Balance de energía**

$$\dot{Q}_{sal} = \dot{m}(h_1 - h_2) - \dot{m}_w h_w \quad (20)$$

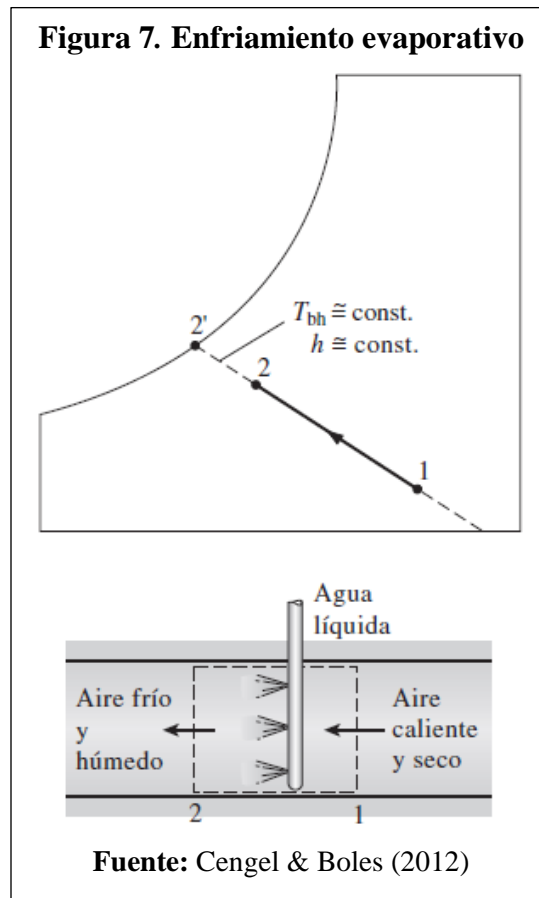
o bien,

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

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

**Enfriamiento evaporativo o humidificación adiabática**

En pocas palabras el enfriamiento evaporativo se basa en un sencillo principio: cuando el agua se evapora, el calor latente de vaporización es absorbido del cuerpo del agua y del aire de los alrededores, dando como resultado que tanto el agua como el aire, se enfrían. Es posible notar que, en un día caliente y seco, el aire se siente un poco más frío cuando el patio se riega, pues un enfriador evaporativo funciona con el mismo principio. En la **Figura 7** se muestra el proceso de enfriamiento evaporativo.



Como es posible observar en la **Figura 7** la representación de la carta psicrométrica, en el estado 1 entra al enfriador evaporativo, el aire caliente y seco, donde se rocía con agua líquida. Una parte del agua se evapora durante dicho proceso al absorber calor del flujo del aire. El resultado de este proceso es la disminución de la temperatura del flujo de aire y el aumento de su humedad (estado 2). A razón de que las líneas de temperatura de bulbo húmedo constante coinciden con las líneas de entalpía constante, es posible suponer que la entalpía del flujo de aire permanece constante, esto para un proceso de enfriamiento evaporativo, que es una aproximación razonable y de aplicación en los cálculos de acondicionamiento del aire. (Cengel & Boles, 2012, p. 754)

El balance de flujo másico del aire seco permanece constante, el cual se representa con la

**Ecuación 21:**

**Ecuación 21. Balance de masa del aire seco**

$$\dot{m}_{a_1} = \dot{m}_{a_2} = \dot{m}_a \quad (21)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

Ahora bien, para este caso la razón de flujo másico de vapor de agua en el aire se incrementa por una cantidad igual a la razón de evaporación  $\dot{m}_f$ , dicho esto, es posible expresarlo con la

**Ecuación 22:**

**Ecuación 22. Incremento del flujo másico de vapor de agua en el aire seco**

$$\dot{m}_a \omega_1 + \dot{m}_f = \dot{m}_a \omega_2 \quad (22)$$

**Fuente:** Cengel & Boles (2012)

### **Diagramas de Mollier**

A continuación, se expone la explicación desarrollada por Castro, Tomas, Ortolá y Fito (2018), sobre el funcionamiento del Diagrama de Mollier presión-entalpía y cómo es posible utilizar los cambios de estado de un fluido para transportar energía térmica de un lugar a otro. Dichos conocimientos se aplicarán para la obtención de las propiedades termodinámicas de un fluido mediante el uso del Diagrama de Mollier presión-entalpía sobre circuitos de refrigeración básicos.

En el año 1923, en la Thermodynamics Conference de los Ángeles, se decidió que cualquier gráfico que utilizara la entalpía (h) en uno de sus ejes se denominara diagrama de Mollier, en honor a Richard Mollier, que fue un profesor alemán destacado por sus aportaciones a la termodinámica (Escudero-Salas y Fernández Iglesias, 2017). El diagrama de Mollier presión-entalpía, es una representación de una variable de estado intensiva frente a una extensiva de los posibles estados de un compuesto químico por debajo del punto crítico (PC).

El punto crítico se caracteriza por una presión y una temperatura críticas, por encima de las cuales la densidad del vapor es la misma que la del líquido y desaparece la interfase entre ambos. Por encima de las condiciones críticas, existe una única fase denominada fluido supercrítico (Atkins y de Paula, 2008). Un líquido por debajo de la presión crítica, cuando se calienta, empezará

a generar fase vapor. El diagrama de Mollier presión-entalpía tiene numerosas aplicaciones, entre ellas destaca su utilización para sistemas de refrigeración, motores o máquinas de vapor.

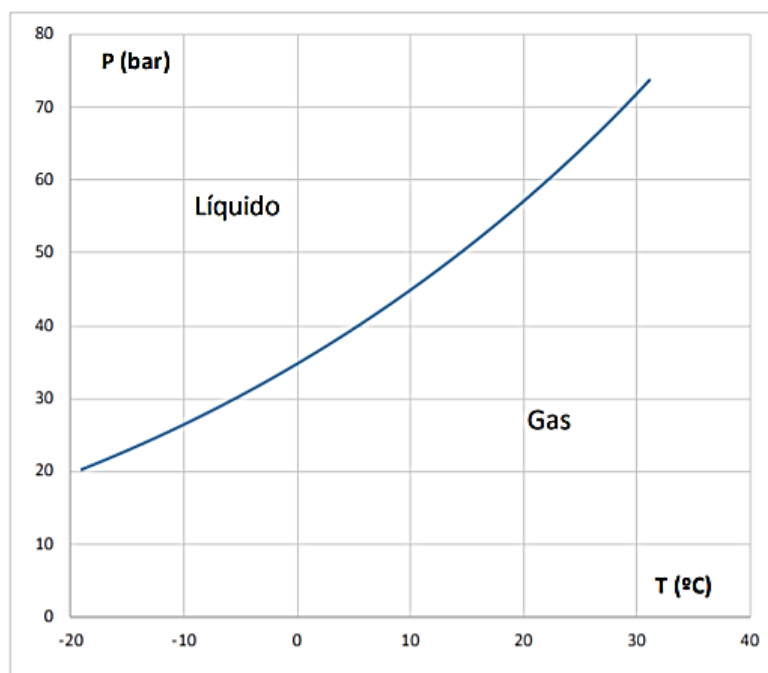
### **Principios termodinámicos**

Los circuitos mecánicos de refrigeración se basan en las propiedades termodinámicas de algunos fluidos, conocidos como fluidos refrigerantes. Si se representan conjuntamente dos variables de estado intensivas, como son presión (P) y temperatura (T), de un fluido refrigerante como es el dióxido de carbono (R744) (**Figura 8**), se observa una línea de transición de primer orden, de líquido a gas. Esta línea marca la inercia termodinámica para que el fluido esté en estado líquido o gaseoso. Además de variar la presión y la temperatura, para que se produzca la transición, se necesita aportar o disipar la energía del fluido.

Es por esto por lo que, al representar una variable de estado intensiva, como presión o temperatura, respecto a una extensiva que permita describir los cambios de energía, como la entalpía o la entropía, la representación lineal anterior, que marcaba un cambio de estado inmediato, se transforma en una zona de transición, donde el aporte o la disipación de energía marcan el cambio de estado y en la cual conviven los dos estados de agregación a la vez.

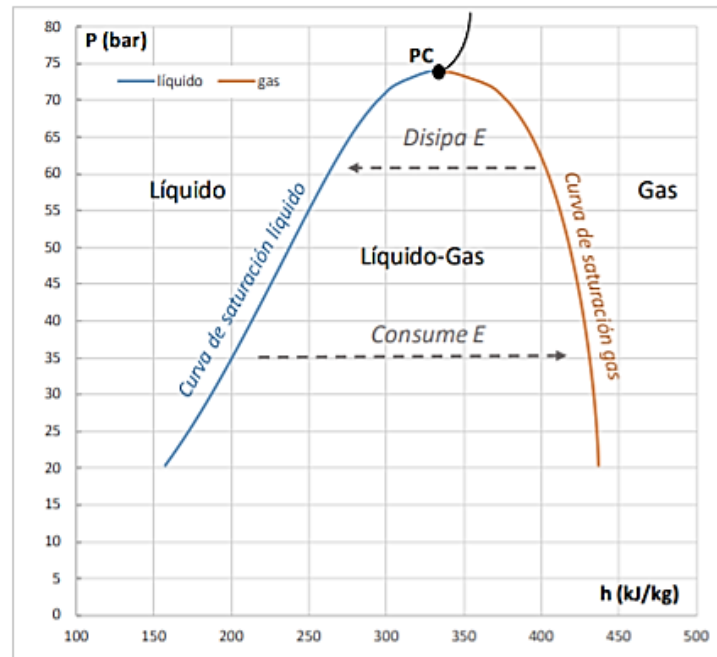
Si se representa la presión frente a la entalpía (h) (**Figura 9**), se observan tres zonas delimitadas por una curva de saturación: zona de líquido, zona de gas, y un estado mixto en el que se va a producir la transición líquido-gas en función de la disipación o el consumo de energía. Los límites de esta área son las curvas de transición líquido y gas. Dentro de la zona en la que coexisten ambos estados de agregación, cualquier aporte o eliminación de energía térmica es invertida en cambio de estado, por esta razón, cualquier fluido que se encuentre en esta área sufre cambios termodinámicos a presión y temperatura constantes. En la figura se representa además el punto crítico (PC).

**Figura 8. Diagrama de presión-temperatura del fluido refrigerante R-744**



**Fuente:** (Castro *et al.*, 2018)

**Figura 9 Diagrama de Mollier presión-entalpía del fluido refrigerante R-744**



**Fuente:** (Castro *et al.*, 2018)

### Diagrama Presión-Entalpía

En la **Figura 10** se muestra un diagrama presión-entalpía para el fluido refrigerante R744. En este diagrama se ven representadas distintas variables termodinámicas y se pueden distinguir distintos tipos de líneas:

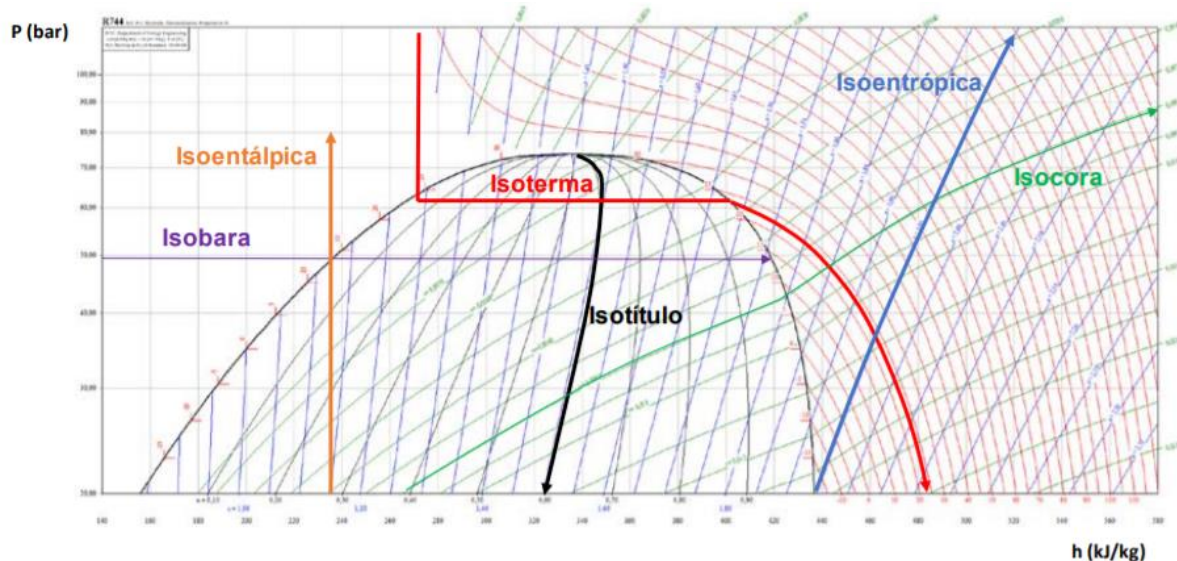
- Líneas isobaras, líneas horizontales que representan una presión constante.
- Líneas isoentálpicas, líneas verticales que representan entalpía constante.
- Líneas isotermas, líneas que representan una temperatura constante cuya forma depende de la región.

En la región de mezcla líquido-gas, al ser la temperatura una variable de estado intensiva como la presión, las líneas isotermas serán horizontales y paralelas a las isobaras; tanto en la zona de líquido como en la de gas, su variación respecto a la presión y la entalpía dependerá del calor específico de fluido. En el caso de líquido, el calor específico no depende de la presión, por lo que las líneas isotermas sólo variarán con la entalpía, representándose verticales como las isoentálpicas.

En el caso del fluido en estado gas, el calor específico sí que varía con la presión, por lo que las isotermas cambian en esta región con la entalpía y con la presión, por lo que forman una curva.

- Líneas isoentrópicas, al definirse la variación de entropía como la variación de entalpía dividido por la temperatura, las líneas isoentrópicas conforman una curva inversa a la isoterma en la zona de gas.
- Líneas isocoras, representan líneas de volumen específico constante. Estas líneas se ven afectadas por la fase gas (fluido compresible), de modo que aumentan conforme disminuye la presión.
- Líneas isotítulo, se encuentran en el interior de la zona mixta, representan la fracción másica de gas en la mezcla líquido-vapor, será 0 en la curva de saturación de líquido y será 1 en la línea de saturación de gas.

**Figura 10 Diagrama presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744 (Adaptada de Coolpack® Software)**



**Fuente:** (Castro *et al.*, 2018)

### Utilización del diagrama presión-entalpía para circuitos de refrigeración

Los diagramas de Mollier presión-entalpía permiten determinar las propiedades termodinámicas más importantes del fluido en los procesos de cambio de estado por debajo del punto crítico, donde las curvas de saturación indican la predisposición del fluido para cambiar de

estado, dependientes de la temperatura y la presión. La entalpía indica la cantidad de energía necesaria para el cambio de estado, la entropía indica la irreversibilidad de dicha transformación, el volumen específico representa los procesos expansivos de la transformación y por último el título o fracción másica de gas nos indica la proporción de fluido que ha cambiado de estado.

Una aplicación para los diagramas de Mollier presión-entalpía es el circuito mecánico de refrigeración, el cual está basado en el ciclo inverso de Carnot para sistemas no ideales. Dicho circuito se basa en la inducción de la evaporación o la condensación del fluido con el fin de transportar energía térmica de un lugar frío a otro cálido mediante el aporte de energía mecánica. Es decir, que se inducirá una evaporación del fluido en la zona fría captando calor y provocando la condensación en la zona cálida disipando dicho calor, gracias al cambio de temperatura del fluido inducido por un cambio de presión en el sistema (incremento de la presión mediante aporte de trabajo por compresión o descompresión mediante expansión libre).

De tal manera que los elementos básicos que permiten realizar las transformaciones termodinámicas mencionadas son los siguientes:

- Elementos intercambiadores de calor:
  - Evaporador: Intercambiador de calor situado en la zona fría del circuito que permite captar calor almacenándolo en el fluido en forma de cambio de estado de líquido a gas.
  - Condensador: Intercambiador de calor situado en la zona cálida del circuito que permite disipar energía del fluido mediante el cambio de estado de gas a líquido.
- Elementos inductores de cambios de presión:
  - Compresor: Émbolo mecanizado que incrementa la presión hasta las condiciones termodinámicas que permiten posteriormente el intercambio de calor y la condensación del fluido liberando el calor almacenado en la zona fría del circuito. Este elemento define la presión de alta del circuito.
  - Válvula de expansión: Dispositivo de expansión de la sección de la conducción del fluido que permite una caída de la presión del sistema, disminuyéndola hasta alcanzar una temperatura de equilibrio baja que permita el posterior intercambio de calor y evaporación del fluido en la zona fría del circuito.

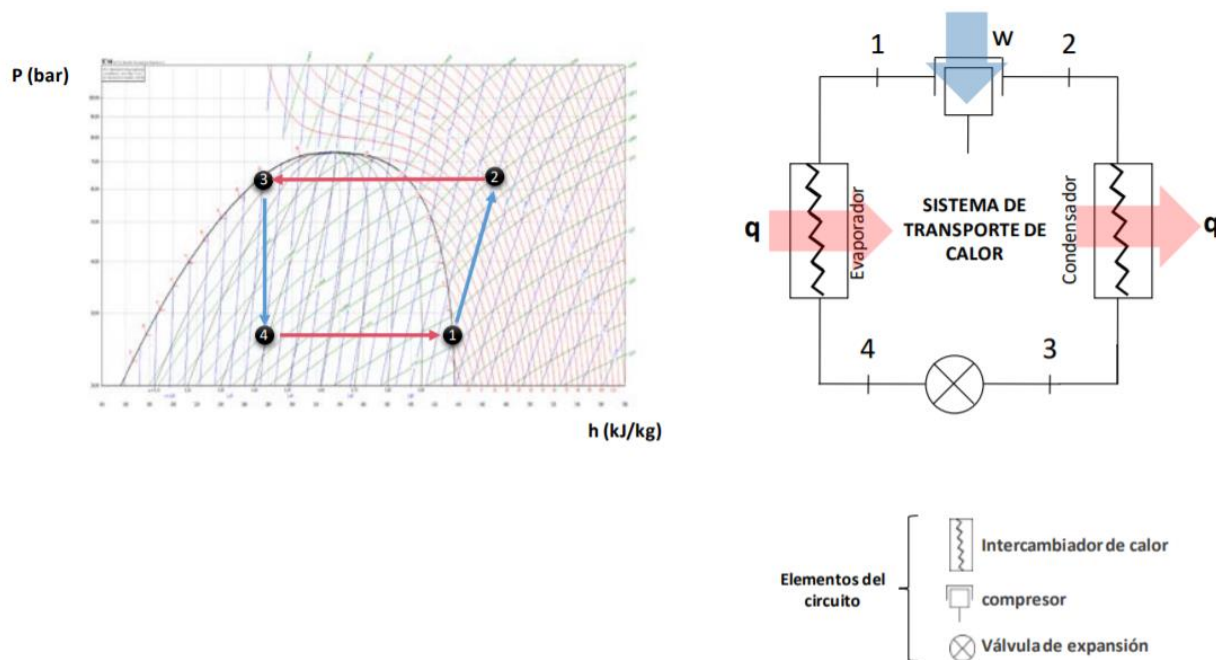
Si representamos en el diagrama presión-entalpía del fluido refrigerante los puntos del esquema del circuito (Ver **Figura 11**), observamos, en primer lugar, entre el punto 4 y 1, el evaporador, en el que se muestra a baja presión la disipación de energía, cargándose esta energía en el fluido refrigerante mediante el cambio de estado de un nivel de energía a otro de mayor energía, de líquido a gas. Si el proceso es ideal, la presión y la temperatura no cambiarán durante el cambio de estado. Sin embargo, en algunos circuitos se pueden producir fenómenos de pérdida de carga asociados a la expansión del fluido por el cambio de estado, pudiendo cambiar la presión del sistema.

Del 1 al 2, el fluido se encontrará necesariamente en estado gas, donde tendremos la compresión, pasando de baja a alta presión, de manera que, si el comportamiento del fluido es ideal el proceso de compresión será totalmente reversible, es decir, isoentrópico. Si el proceso no es ideal, el sistema sufre cierta irreversibilidad en el proceso de compresión, que afecta a futuras compresiones provocando un aumento de la entropía del sistema, es decir produciéndose una compresión no isoentrópica. En este proceso la temperatura del fluido aumentará notablemente alcanzando el máximo del sistema.

A la temperatura del fluido a la salida del compresor se le denomina temperatura de impulsión. En todas las entradas a los compresores se sitúa una trampa de líquidos para evitar la entrada de fluidos que no estén en estado gas. Del 2 al 3 se encuentra el condensador, donde se disipará la energía almacenada en el fluido en la zona fría mediante la condensación del fluido. Dicho proceso se realizará en un intercambiador de calor, donde se utilizará como fluido externo aire o agua. Del 3 al 4 se encuentra la válvula de expansión, donde el fluido sufrirá una expansión por estrangulamiento y pérdida de carga en la cual el fluido disminuirá su presión sin consumo de energía externa, es decir, adiabáticamente, así que del 3 al 4 el proceso será isoentálpico.

El descenso de presión provocará una disminución de la temperatura de equilibrio (ver **Figura 8**) lo que provocará una necesidad del fluido por disipar parte de su energía interna, dicha energía será disipada de forma espontánea evaporando parte del propio fluido, incrementando la fracción másica de gas o título. (pp.1-6). (Ver **Anexo C**), Diagrama de Mollier para el agua.

**Figura 11. Circuito de refrigeración cuyos puntos se representan en el diagrama de Mollier presión-entalpía para el fluido refrigerante R-744**



**Fuente:** (Castro *et al.*, 2018)

### Energía Solar (Captación Térmica)

El objeto de la captación térmica de la energía solar es capturar el mayor calor posible que procedimiento de transformación de la energía radiante del Sol en calor o energía térmica. Con el fin de hacer uso correcto y sacar máximo provecho de la energía térmica solar surge la necesidad de invención de tecnologías que favorecieran dicha actividad, por lo tanto, de ahí nació la creación del captador o colector solar de placa plana, en aquellos años alrededor de la mitad del siglo XVIII, atribuida a Sausarre, aunque los primeros modelos se deben a Hersechel (1873) y a Tellier (1885) y el primer fabricante industrial en serie fue Clarence M. Kemp (1872) en EEUU. (Tobajas, 2017, p. 35).

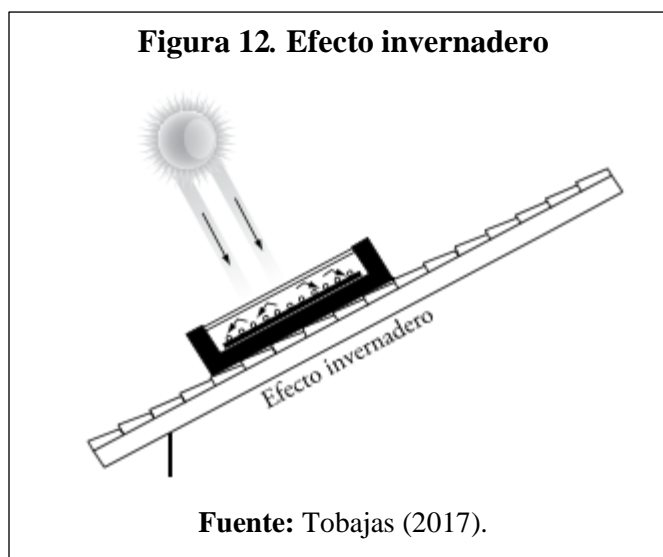
### **Tipos de captación**

En algunas ocasiones los captadores o colectores solares térmicos son clasificados de la siguiente manera, según su utilización:

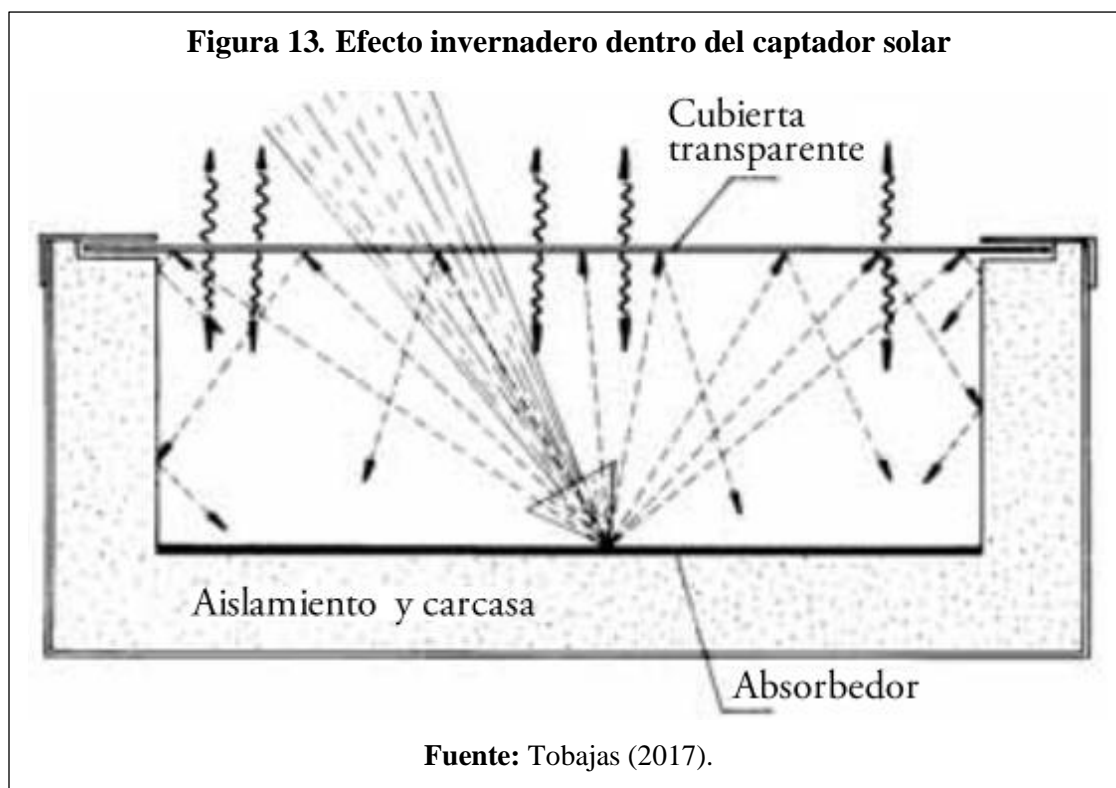
- **Baja Temperatura:** El sistema de captación a Baja Temperatura está basado en captadores con temperaturas iguales o menores a 100 °C. Es normal que sean utilizados para agua caliente sanitaria, calefacción por suelo radiante, calentamiento de piscinas descubiertas, entre otros. Dentro de estos tipos de captadores los más utilizados son:
  - Captadores solares planos
  - Captadores solares de tubos al vacío
- **Media Temperatura:** El sistema de captación a Media Temperatura está basado en captadores que utilizan un reflector en forma de cilindro parabólico que focaliza la energía en un tubo de vacío por el cual circula un fluido caloportador (normalmente aceites). Se utiliza para la generación de energía eléctrica mediante el accionamiento de una turbina por medio de vapor.
- **Alta Temperatura:** El sistema de captación a Alta Temperatura está basado en la concentración mediante espejos ultrapulidos llamados heliostatos, que dirigen la energía hasta un receptor colocado en una torre. Se utiliza para la producción de energía eléctrica por medio de vapor, la destilación del agua salada del mar o de pozos salubres, hornos solares de alta temperatura, entre otras aplicaciones. En España existe la plataforma solar de Almería, donde se experimenta y se rentabilizan los distintos tipos de energía solar. (Tobajas, 2017, p. 36).

### Funcionamiento de un captador solar

Al colocar un vidrio entre la placa que absorbe el calor y el Sol, ocurre un fenómeno llamado “efecto invernadero”. Este consiste en atrapar los rayos del Sol o la radiación solar, impidiendo que la energía que atraviesa el vidrio vuelva a salir, efectuando una trampa energética de radiación; este efecto es el mismo que ofrece la atmosfera al Sol con respecto a la Tierra (ver **Figura 12**). Si se analiza el proceso más detenidamente, se observa que cuando la radiación solar incide en un captador solar, esta puede ser total o parcialmente absorbida, otra parte también podrá ser reflejada y otra atravesará el cuerpo. La energía que se absorbe es la que hace que se caliente el cuerpo y emita a su vez radiación con una longitud de onda que dependerá de su temperatura. (Tobajas, 2017, p. 36).



La parte principal de la radiación solar está comprendida entre los 0,3 y 2,4  $\mu\text{m}$ , el vidrio, al ser transparente, deja pasar a través de él la radiación electromagnética, ahora bien, habrá una pequeña parte que se reflejará en su superficie, ello vendrá condicionado por el espesor del vidrio. Después de atravesar el vidrio, la radiación llega al absorbedor, que se calienta y también emite radiación, oscilando esta entre los 4,5 y 7,2  $\mu\text{m}$ . En esta longitud de onda es cuando el vidrio es opaco a la misma, aumentando la temperatura en el interior del captador solar, como es detallado en la **Figura 13**. (Tobajas, 2017, p. 36).



### **Colectores solares de placa plana**

Los colectores de placa plana son en la actualidad los más extendidos comercialmente. Su temperatura de trabajo se sitúa en un rango de 50-70 °C, por lo que están indicados para producir agua caliente para muy diversas aplicaciones: ACS, calefacción por fan-coil o suelo radiante, precalentamiento del fluido de entrada para diversas aplicaciones industriales, entre otros. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 35). En la **Figura 14** se muestra el ejemplo de un colector solar de placa plana.

**Figura 14. Colector solar de placa plana**



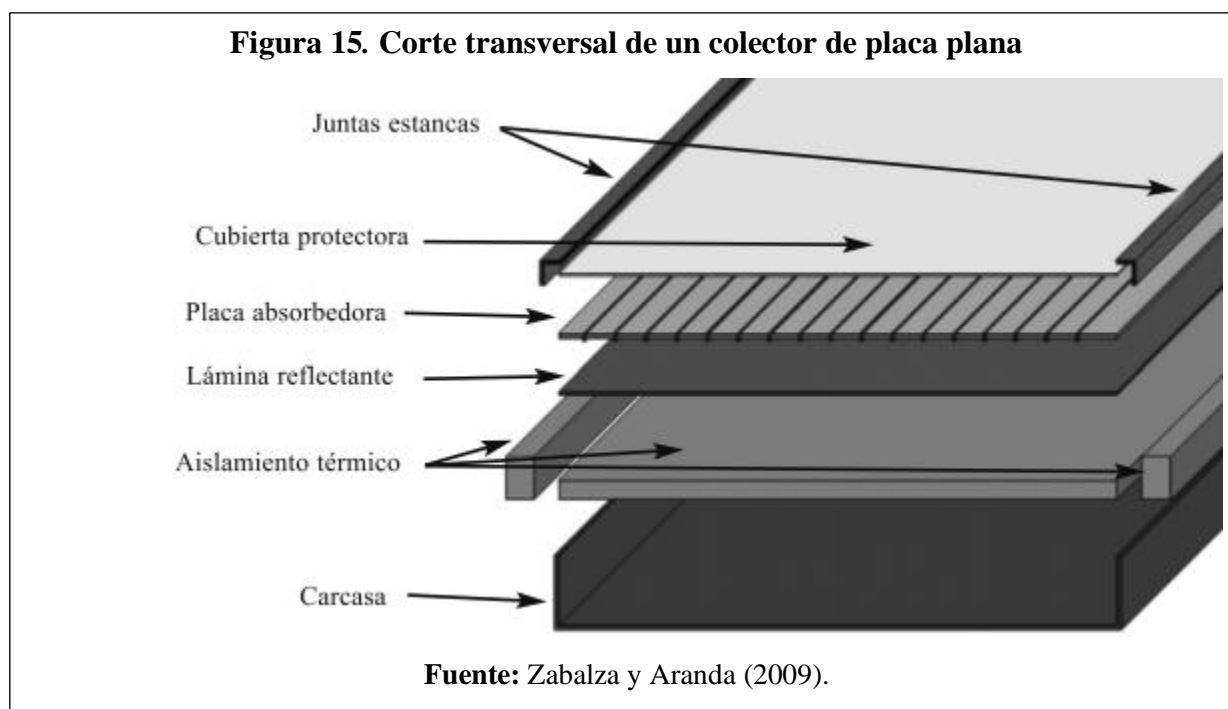
**Fuente:** ONOSI SOLAR (2019).

Los principales elementos que constituyen un colector de placa plana son:

- La cubierta exterior: Está formada habitualmente por un cristal de vidrio simple de 4-6 mm de espesor, aunque también pueden encontrarse cubiertas con cristal doble o incluso con materiales plásticos. Su función es producir el efecto invernadero, reducir las pérdidas por convección y proporcionar estanqueidad al colector. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 35)
- El absorbedor: Suele estar constituido por una placa metálica sobre la que se encuentra soldada una tubería de cobre formando un serpentín, favoreciendo el intercambio de calor entre la placa y el fluido circulante. La función de la placa es absorber la máxima radiación solar posible y ceder el calor acumulado al serpentín. La superficie absorbidora expuesta al sol suele ser de cobre recubierto con pintura negra mediante un tratamiento especial a base de óxidos metálicos (óxido de titanio, óxido de cromo, TINOX<sup>®</sup>, entre otros.) que, en general, dan un mejor resultado que las pinturas en cuanto rendimiento (especialmente en condiciones meteorológicas adversas) y duración, aunque su coste sea algo mayor. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 35)

- El aislante térmico: Es el material que recubre todos los laterales y la parte posterior del colector, y tiene por objeto minimizar las pérdidas térmicas a través de la carcasa. El material utilizado puede ser lana de vidrio, poliuretano, entre otros, con un grosor variable dependiendo del diseño del colector. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 36)
- La carcasa: es la caja exterior que alberga todos los componentes anteriores proporcionando rigidez al colector y realizando el sellado de su interior. Generalmente suele ser de aluminio, con algún tratamiento anticorrosión (anodizado), debido a su poco peso. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 36)

En la **Figura 15**, se muestra los principales elementos de un colector de placa plana a través de un corte transversal.



El funcionamiento de un colector de placa plana está basado con el conocido efecto invernadero. La mayor parte de la radiación solar incidente atraviesa la cubierta exterior y queda retenida en el interior del colector (efecto invernadero). Esta radiación es absorbida por la placa absorbedora, aumentando su temperatura, por lo que la placa comienza a ceder calor al serpentín de tubos que está soldado o embutido en esta. Progresivamente, el fluido que circula por el interior

del serpentín aumenta su temperatura hasta alcanzar la de trabajo del colector. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 36)

Una variante del colector de placa plana convencional es el denominado colector de placa plana de ultra-alto vacío (UHV), que debido a su mayor temperatura de trabajo (puede alcanzar hasta 400 °C), se englobaría dentro del grupo de colectores solares de media temperatura. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 37)

### **Colectores solares de tubos al vacío**

Los colectores de tubos al vacío poseen un mejor rendimiento y proporcionan mayores temperaturas que los colectores de placa plana, pudiendo llegar a temperaturas de trabajo por encima de 70 °C. Por ello, la aplicación más habitual de este tipo de captadores es el calentamiento de agua para instalaciones de calefacción por radiadores convencionales e instalaciones de refrigeración por medio de máquinas de absorción. Los principales inconvenientes que presentan estos colectores frente a los de placa plana son su elevado precio, la mayor laboriosidad y cuidado que requiere su montaje y su menor robustez. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 37). En la **Figura 16** se puede observar un ejemplo de un colector solar de tubos al vacío.

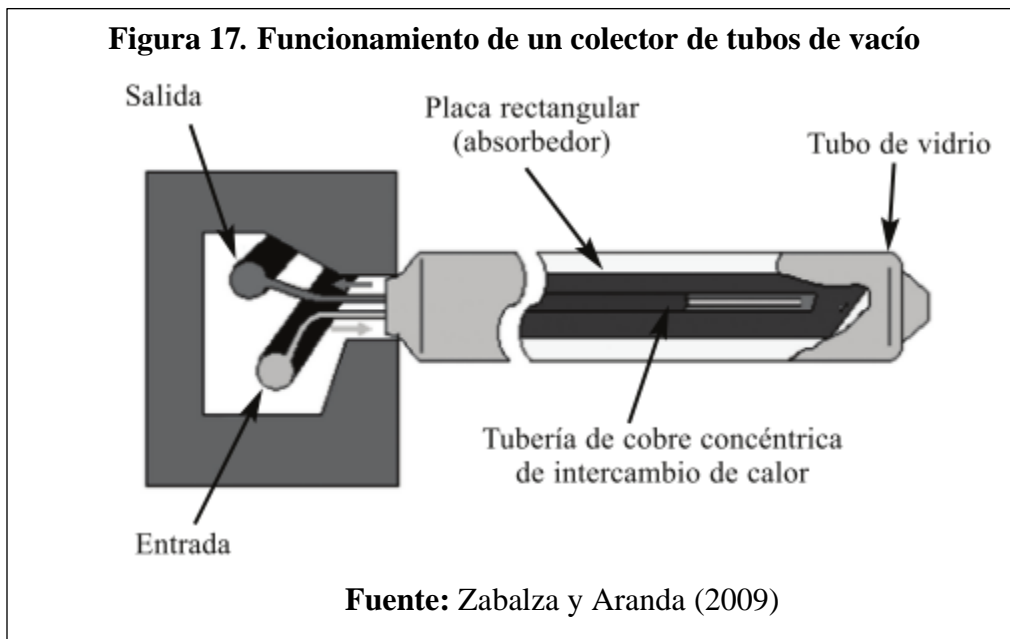
**Figura 16. Colector Solar de tubos al vacío**



**Fuente:** INTEVA (2018).

Estos colectores están formados por 10 a 20 tubos de vidrio en cuyo interior se ha hecho el vacío. En el interior de cada tubo hay una tubería de cobre soldada a una placa rectangular, que absorbe la radiación solar y cede calor al fluido que circula por la tubería. Al igual que los colectores de placa plana, el funcionamiento de este tipo de colectores se basa en el efecto invernadero que se produce cuando la radiación solar atraviesa el vidrio. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 38).

La diferencia, en este caso, está en que no se requiere de un material aislante, ya que el propio vacío de los tubos elimina casi totalmente las pérdidas térmicas hacia el exterior del vidrio. Por ello su rendimiento es siempre superior al de los colectores de placa plana, especialmente en condiciones de baja radiación solar o baja temperatura ambiente, aunque su coste es más elevado. Por tanto, su uso se recomienda exclusivamente en zonas frías con poca radiación solar y en aplicaciones donde se requiera un calentamiento a mayor temperatura. (Zabalza y Aranda, 2009, p. 38). La **Figura 17** muestra el funcionamiento de un colector de tubos de vacío.



### Diferencia entre tiempo y clima

En muchas ocasiones no se tiene claro o bien, las personas no se dan a la tarea de investigar cuál es la diferencia entre tiempo y clima, siendo estos importantes en las vivencias del día a día del ser humano, más aún para este caso, cuando se pretende desarrollar un proyecto de la naturaleza de un secador de granos de café, el cual tiene una marcada dependencia a la condiciones o parámetros que estos establecen.

Por lo tanto, se cita una serie de definiciones y conceptos expuestos por el señor Torres (2019), sobre las diferencias que existen entre tiempo y clima, donde el mismo expone que; en muchos medios de comunicación al notificar la predicción meteorológica, estos utilizan expresiones como el clima. De manera análoga, los portales oficiales de algunos gobiernos utilizan la palabra clima para proveer información sobre las condiciones atmosféricas en los días próximos, y en algunos otros se pueden encontrar frases como estado del tiempo o pronóstico del tiempo. (p.2).

Aunado a esto, términos como frente frío, El Niño, u onda tropical acompañan a la información que proveen, por ejemplo: “El Niño hace que llueva menos”, mezclando así fenómenos de distinta naturaleza y escala temporal que resultan sumamente confusos. Este intercambio de términos lleva, entonces, a la idea de que el clima cambia a diario, y por consecuencia, todos los fenómenos atmosféricos son cambio climático. (Torres, 2019. p. 2)

¿Qué es lo correcto, entonces, clima o tiempo? ¿Todo es cambio climático? ¿Dónde queda El Niño y las sequías? Es importante distinguir entre los conceptos de tiempo y clima para identificar el tipo de fenómenos que experimentamos diariamente, el cómo estudiarlos, así como conocer los efectos que estos ocasionan. Dichos efectos pueden variar desde una insignificante lluvia ligera o una tormenta, hasta una sequía de decenas de años de duración. Tales eventos influyen nuestra vida cotidiana e incluso la de generaciones por venir. (Torres, 2019. p. 2)

### **Tiempo**

De acuerdo con la sociedad meteorológica de los Estados Unidos (AMS, por sus siglas en inglés), se define al tiempo meteorológico como “el estado atmosférico actual, y que está relacionado principalmente con los efectos en la vida y las actividades humanas”. Como lo establecen en su definición, “popularmente el tiempo se percibe en términos de temperatura, humedad, lluvia, nubosidad, visibilidad, y viento” (Torres, 2019. p. 3) citando a (AMS, 2018).

Los fenómenos que se observan en el día a día de la vida cotidiana se refieren a tiempo atmosférico. Ejemplos de tiempo son lluvias, viento, torbellinos, tornados, brisas marinas, ondas de latitudes medias, así como también ondas tropicales y huracanes (ver **Figura 18**), en el cual se presenta como ejemplo de fenómeno de tiempo meteorológico al huracán Newton en el océano Pacífico, para ser exactos el 5 de setiembre de 2016. Así pues, el pronóstico del tiempo de cierto lugar en particular nos dirá si lloverá y estará nublado, o si hará mucho calor durante el día con lluvia por la tarde. (Torres, 2019. p. 3)

**Figura 18. Ejemplo de fenómeno de tiempo meteorológico: huracán Newton (categoría 1)**



**Fuente:** Torres (2019, citando a NASA Eosdis Worldview, 2016, <https://worldview.earthdata.nasa.gov>)

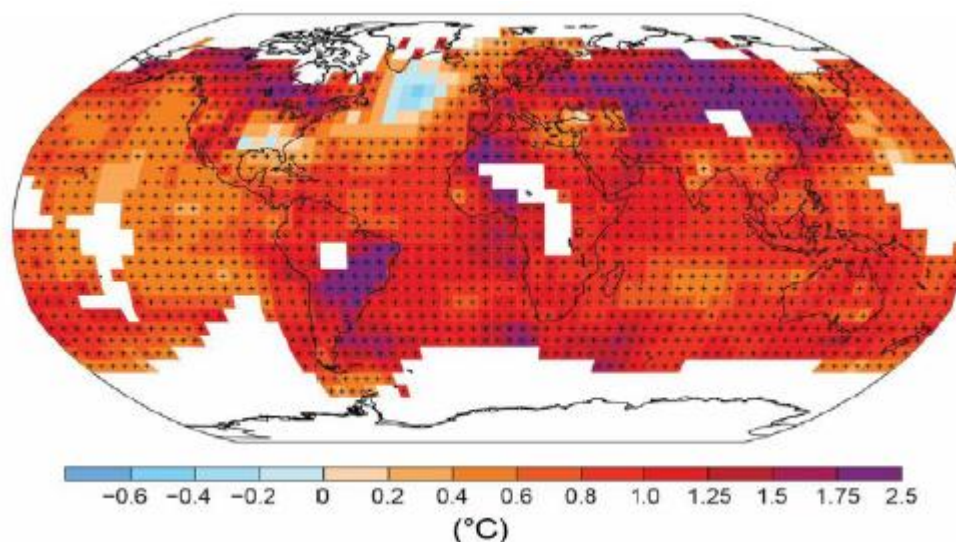
### **Clima**

Es definido como: “clima se refiere a las variaciones en el largo plazo del sistema atmósfera-hidrosfera-tierra” por lo que clima se define, entonces, como las condiciones medias del tiempo durante períodos de 30 años o más, Torres (2019. p. 3) citando a AMS (2018). Por otra parte, al hablar de clima nos estaremos refiriendo a estados del sistema terrestre promediados durante 30 años.

A partir de la definición anterior se entiende por cambio climático como los cambios en las condiciones medias del sistema atmósfera-hidrosfera-tierra en un lapso de al menos 30 años Torres (2019. p. 3) citando a IPCC (2013).

Entonces, al preguntarse cómo va a estar el clima mañana o en una semana, la respuesta sería igual que ayer, o hace cinco días, o como hace diez años, ¡no hay diferencia! Dado que estas escalas en tiempo son a largo plazo, fenómenos como las sequías, el calentamiento global y el cambio climático caen dentro de esta categoría (ver **Figura 19**). Por todo lo anterior, lo correcto sería usar pronóstico del tiempo y evitar frases como: “pronóstico del clima” o “previsión climática”. (Torres, 2019. p. 4)

**Figura 19. Ejemplo de fenómeno en la escala de clima, mapa de los cambios de temperatura de la superficie terrestre de 1901 a 2012**

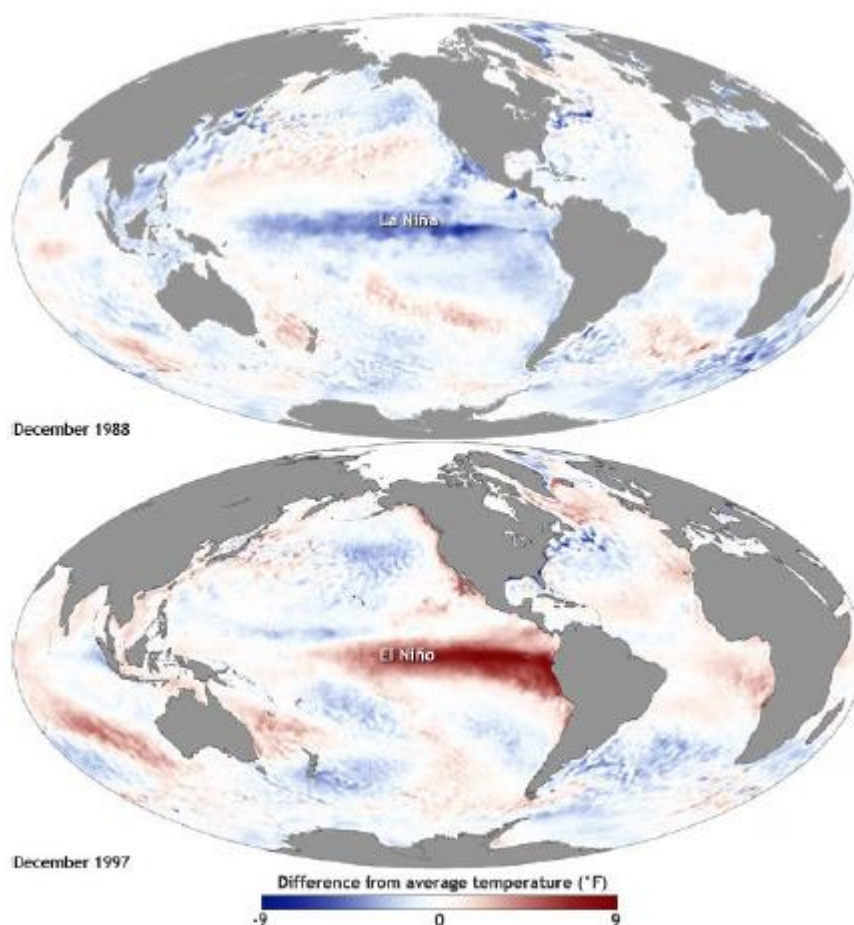


**Fuente:** Torres (2019, citando a Climate Change: The Physical Science basis.wg1-ipcc, 2013, <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>)

El estudio de nuestra atmósfera no sólo se reduce a analizar fenómenos de tiempo y clima. Se ha encontrado que existen fenómenos atmosféricos que duran más de un mes y poco menos que una estación del año. Este tipo de fenómenos caen dentro de lo que se conoce como variabilidad intraestacional. Ejemplos de estos son la Oscilación Madden-Julían (MJO por sus siglas en inglés) y los monzones, que duran aproximadamente de tres a cinco meses. Estos últimos marcan la temporada de lluvias dentro de las zonas tropicales (Torres, 2019. p. 4, citando a Krishnamurti, Stefanova y Misra, 2013).

De manera similar, existen fenómenos atmosféricos cuya presencia oscila entre uno y cinco años y caen dentro de lo que se conoce como variabilidad interanual. Dentro de esta encontramos fenómenos como El Niño-Oscilación del Sur (o ENSO: El Niño-Southern Oscillation) y la Oscilación Cuasi-Bienal (o QBO: Quasi-Biennial Oscillation) por mencionar algunos (Torres, 2019. p.4, citando a Magaña, Vázquez, Pérez, y Pérez, 2003; Wang y Fiedler, 2006). La **Figura 20** muestra un ejemplo de la variabilidad interanual. Cada una de estas variaciones atmosféricas en cada una de las distintas escalas temporales implica bastante estudio, así como también el clima por sí mismo.

**Figura 20. Ejemplo de variabilidad interanual: Fenómeno El Niño-Oscilación del Sur**



**Fuente:** Torres (2019, citando a NOAA Climate <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/elniño-and-la-niña-frequentlyasked-questions>)

En la parte superior observamos su fase negativa, La Niña, caracterizada por presentar anomalías negativas en la temperatura de la superficie del mar en el Ecuador. En su fase positiva, El Niño, se presenta lo contrario, es decir, anomalías positivas en la temperatura de la superficie del mar. Al considerar escalas de tiempo de orden climático surgen preguntas como: ¿el clima era el mismo ahora que cuando los mayas estaban en su máximo esplendor?, ¿realmente ha cambiado el clima desde 1970?, ¿cómo será el clima dentro de 40 años? O una muy importante: ¿el clima varía? Estas son las cuestiones que los climatólogos –personas que estudian el clima– analizan. (Torres, 2019, p. 5)

Dichas investigaciones han llevado a encontrar fenómenos atmosféricos que caen en escalas aún mayores a la escala interanual y menores a la de clima. Estas fluctuaciones, conocidas como variabilidad climática, se definen como las variaciones del estado medio del clima que se deben principalmente a factores naturales (Torres, 2019, p. 5). Ahora bien, se podrán preguntar, ¿por qué la introducción a este tema? Ya en al algún punto del inicio de este trabajo se indicó brevemente la dependencia del diseño al utilizar energías renovables del tiempo o bien del clima.

Por lo tanto, se debe establecer con criterio y claridad las características, comportamientos, variaciones del tiempo y clima en la región o país que forman parte del estudio, puesto que, con base en esto se podrá tener seguridad con respecto a la viabilidad de desarrollar un proyecto de pequeña o gran escala de esta índole, donde se implementan energías renovables, que resultan eficientes bajo ciertos parámetros atmosféricos, en ese sentido, podrían ser rentables en las condiciones actuales, mas no así, bajo condiciones que se podrían presentar a futuro.

### **Series de tiempo**

El siguiente concepto facilita el estudio del comportamiento de diversas variables en distintas áreas puestas en investigación con algún fin propio de quien desarrolla el estudio, como lo es en este caso. Dicho lo anterior y de acuerdo con Ríos (2008), quien expuso en su trabajo que se llaman Series de Tiempo a un conjunto de observaciones sobre valores que toma una variable (cuantitativa) en diferentes momentos del tiempo. Los datos se pueden comportar de diferentes formas a través del tiempo, puede que se presente una tendencia, un ciclo; no tener una forma definida o aleatoria, variaciones estacionales (anual, semestral, entre otros).

Las observaciones de una serie de tiempo normalmente son denotadas por  $Y_1; Y_2, \dots, Y_T$ , donde  $Y_t$  es el valor tomado por el proceso en el instante  $t$ . Los modelos de series de tiempo tienen un enfoque netamente predictivo y en ellos los pronósticos se elaboran solo con base al comportamiento pasado de la variable de interés. Podemos distinguir dos tipos de modelos de series de tiempo:

- Modelos deterministas: se trata de métodos de extrapolación sencillos en los que no se hace referencia a las fuentes o naturaleza de la aleatoriedad subyacente en la serie. Su simplicidad relativa generalmente va acompañada de menor precisión. Ejemplo de modelos

deterministas son los modelos de promedio móvil en los que se calcula el pronóstico de la variable a partir de un promedio de los “n” valores inmediatamente anteriores.

- Modelos estocásticos: se basan en la descripción simplificada del proceso aleatorio subyacente en la serie. En términos sencillos, se asume que la serie observada  $Y_1; Y_2, \dots, Y_T$  se extrae de un grupo de variables aleatorias con una cierta distribución conjunta difícil de determinar, por lo que se construyen modelos aproximados que sean útiles para la generación de pronósticos.

Donde la serie  $\{Y_t\}_{t=1}^T$  podrá ser estacionaria o no estacionaria:

- Serie no estacionaria: es aquella cuyas características de media, varianza y covarianza cambian a través del tiempo lo que dificulta su modelamiento. Sin embargo, en muchas ocasiones, si dicha serie es diferenciada una o más veces la serie resultante será estacionaria (procesos no estacionarios homogéneos).
- Serie estacionaria: es aquella cuya media y varianza no cambian a través del tiempo y cuya covarianza sólo es función del rezago. Gracias a estas características podremos modelar el proceso subyacente a través de una ecuación con coeficientes fijos estimados a partir de los datos pasados.

Para dar mayor claridad al concepto, seguidamente se mencionan ciertas áreas donde son útiles las series de tiempo.

### **Aplicaciones de series de tiempo**

Hoy en día diversas organizaciones requieren conocer el comportamiento futuro de ciertos fenómenos con el fin de planificar, prevenir; es decir, se utilizan para predecir lo que ocurrirá con una variable en el futuro a partir del comportamiento de esa variable en el pasado. En las organizaciones es de mucha utilidad en predicciones a corto y mediano plazo, por ejemplo, ver qué ocurriría con la demanda de un cierto producto, las ventas a futuro, decisiones sobre inventario, insumos, entre otros.

A continuación, se mencionan algunas de las áreas de aplicación de Series de Tiempo:

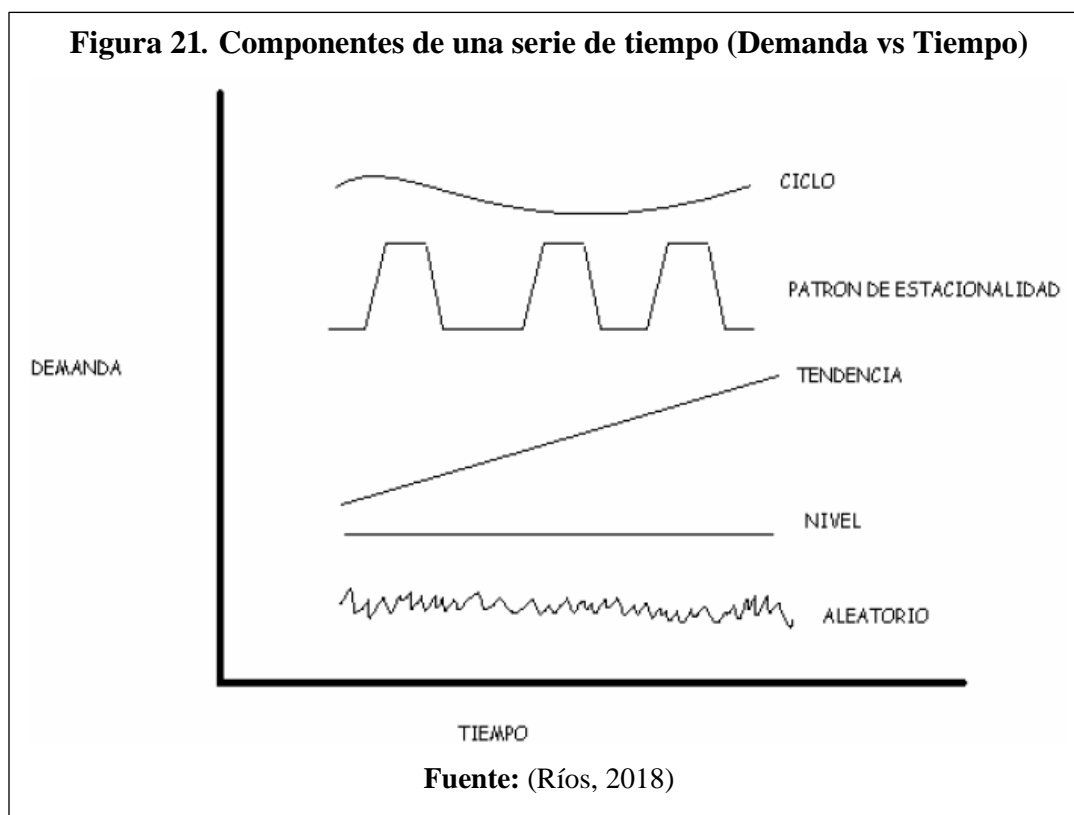
- Economía: Precios de un artículo, tasas de desempleo, tasa de inflación, índice de precios, precio del dólar, precio del cobre, precios de acciones, ingreso nacional bruto, etc.

- Meteorología: Cantidad de agua caída, temperatura máxima diaria, Velocidad del viento (energía eólica), energía solar, entre otros.
- Geofísica: Series sismológicas.
- Química: Viscosidad de un proceso, temperatura de un proceso.
- Demografía: Tasas de natalidad, tasas de mortalidad.
- Medicina: Electrocardiograma, electroencefalograma.
- Marketing: Series de demanda, gastos, utilidades, ventas, ofertas.
- Telecomunicaciones: Análisis de señales.
- Transporte: Series de tráfico.

### **Componentes de una serie de tiempo: Enfoque clásico**

Se dice que una serie de tiempo puede descomponerse en cuatro componentes (cinco si se considera una constante llamada nivel) que no son directamente observables, de los cuales únicamente se pueden obtener estimaciones (ver **Figura 21**). (pp.4-6). Estos cuatro componentes son:

- Tendencia (T): representa el comportamiento predominante de la serie. Esta puede ser definida vagamente como el cambio de la media a lo largo de un extenso período de tiempo. (Ríos, 2008, p. 6).
- Ciclo (C): caracterizado por oscilaciones alrededor de la tendencia con una larga duración, y sus factores no son claros. Por ejemplo, fenómenos climáticos, que tienen ciclos que duran varios años. (Ríos, 2008, p. 6).
- Estacionalidad (E): es un movimiento periódico que se produce dentro de un periodo corto y conocido. Este componente está determinado, por ejemplo, por factores institucionales y climáticos. (Ríos, 2008, p. 6).
- Aleatorio (A): son movimientos erráticos que no siguen un patrón específico y que obedecen a causas diversas. Este componente es prácticamente impredecible. Este comportamiento representa todos los tipos de movimientos de una serie de tiempo que no son tendencia, variaciones estacionales ni fluctuaciones cíclicas. (Ríos, 2008, p. 6).



De manera más directa Guerrero (2015, p. 3) define las series de tiempo como conjuntos de datos numéricos que se observan en el tiempo de manera regular (a intervalos de tiempo fijos) y en forma sistemática (con el mismo instrumento de medición). Donde se puede hacer referencia a cualquier tipo de fenómenos: económicos, demográficos, sociales, biológicos, **climáticos**, entre otros.

### **Series climáticas**

Una vez explicado el anterior concepto, es prudente introducir la definición de series climáticas. Gómez (2013) dice que: desde que existen las estaciones meteorológicas que registran diariamente las distintas variables meteorológicas (presión, temperatura, humedad, precipitaciones...) las series de datos durante periodos largos (al menos 30 años) se han convertido en una fuente fundamental para el estudio del clima. De hecho, son las series climáticas las que nos permiten valorar mediante cálculos estadísticos ese (estado medio o característico) de una localidad determinada.

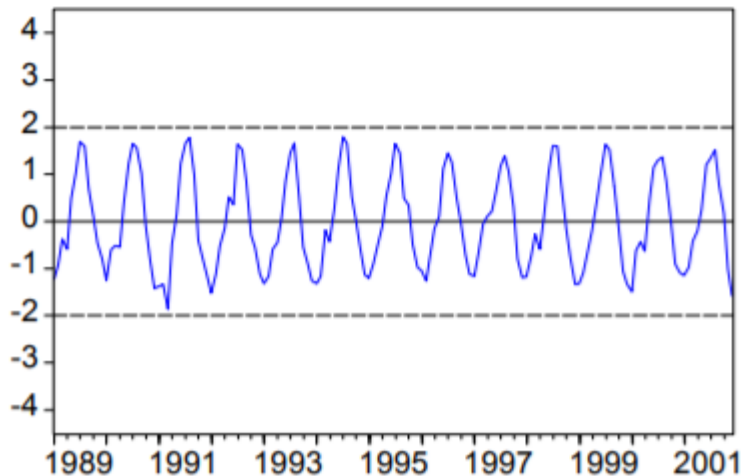
Además, comparando distintas series climáticas se ha podido avanzar en el estudio de la evolución del clima, los cambios climáticos y en el conocimiento de los factores climáticos. La altitud, la exposición, la cercanía o lejanía al mar, la orografía... cada día se descubren nuevos condicionantes, factores que intervienen en el complejo sistema atmosférico. Las series climáticas son, por tanto, un conjunto de datos, de registros de sucesivos estados del tiempo en un lugar determinado durante un periodo de tiempo largo. Los datos pueden presentar distinta resolución temporal: anual, mensual o diaria. (párr.1-3)

En cualquier caso, lo que es imprescindible a la hora de analizarlos, es que la información contenida esté ordenada y sea coherente y uniforme en cuanto a:

- Ubicación de la estación meteorológica
- Variables registradas
- Resolución temporal
- Continuidad temporal (consistencia)
- Unidades de medida

A continuación, se presentan dos ejemplos de series temporales (**Figura 22** y **Figura 23**).

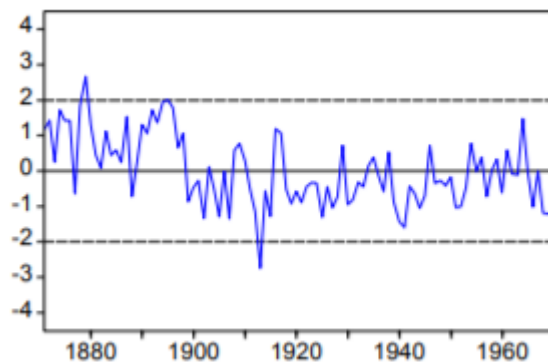
**Figura 22. Temperatura media registrada en Madrid-Retiro (Enero 1989 – Diciembre 2001)**



Fuente: (Mauricio, 2007)

La serie de la **Figura 22** presenta reducciones (en invierno) y aumentos (en verano) sistemáticos en su nivel cada 12 meses, por lo que suele decirse que dicha serie es estacional. (Mauricio, 2007, p. 7)

**Figura 23. Volumen de flujo anual del río Nilo en Asuán (1871 – 1970)**



Fuente: (Mauricio, 2007)

La serie de la **Figura 23** muestra un nivel que no parece constante; en concreto, se aprecia que dicho nivel podría haber cambiado de manera permanente a partir del año 1899. (Mauricio, 2007, p. 3)

### **Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)**

Para el análisis, cálculo o estimación de energía termosolar o fotovoltaica, se vuelve indispensable el contar con una base de datos confiable de radiación solar que utilice sistemas de información geográfica (GIS). Lo anterior lo justifica la complejidad o cuidado que requiere la implementación de energía solar en el diseño de un proyecto, donde se debe tomar en cuenta una serie de factores como, por ejemplo: temperaturas, irradiación, inclinación de la localización, entre otros, en una ubicación deseada. Actualmente existen en el mercado softwares que cumplen con estos requerimientos, pero proporcionalmente tienen su alto coste económico.

En el caso de las grandes empresas diseñadoras en este campo no tienen problemas para hacer frente a este tipo de inversiones, contrariamente en algunas circunstancias donde se requieren este tipo de base de datos para investigaciones a nivel universitario o bien simplemente aquellas personas que desean instalar su propio sistema en el hogar o en una pequeña empresa, claramente deja de ser rentable la obtención del derecho de uso de un software de este tipo. Sin embargo, esto no es un impedimento al contar con base de datos de acceso al público y de alto nivel, como lo es PVGIS.

PVGIS se ha desarrollado en el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea (JRC), en el sitio del CCI en Ispra, Italia, desde 2001. PVGIS se ha enfocado en la investigación con respecto a la evaluación de recursos solares, estudios de rendimiento fotovoltaico (PV) y la difusión de conocimientos y datos sobre energía solar, radiación y rendimiento fotovoltaico. La parte más conocida de este proyecto es la aplicación web PVGIS en línea, pero detrás de esto, hay una gran cantidad de investigación que se ha llevado a cabo para que los resultados de PVGIS sean lo más precisos posible. (EU Science Hub, 2019)

La aplicación web PVGIS ha sufrido una serie de cambios a lo largo de los años, siendo la versión actual PVGIS 5. En cada nueva versión de PVGIS se ha ido ampliando las capacidades del sistema y de igual forma la extensión geográfica de los datos que se utilizan. Actualmente dispone de información de Europa, África, Asia, América y Países Nórdicos (EU Science Hub, 2019). En el **Anexo D**, se muestra la interfaz de interacción de la herramienta de Radiación Solar de PVGIS, punto donde es posible consultar información a partir del ingreso de una serie parámetros según lo deseado.

## Control automático

A lo largo de la historia se ha ido desarrollando la teoría del control, o bien lo que se conoce como “El Control Automático”, el cual ha desempeñado un papel vital en el avance de la ingeniería y la ciencia. Con el pasar de los años el control automático se ha convertido en una parte importante e integral en la mayoría de los sistemas del mundo actual, hablese de sistemas de vehículos espaciales, en los sistemas robóticos, en los procesos modernos de fabricación y en cualquier operación industrial que requiera el control de temperatura, presión, humedad, flujo, entre otras variables. Por lo tanto, es deseable que la mayoría de los ingenieros y científicos estén familiarizados con la teoría y la práctica del control automático. (Ogata, 2010, p. 1).

### Definiciones

Con la anterior introducción se van a definir una serie de conceptos generales que atañen y permiten la comprensión en la teoría de control automático.

- **Variable controlada:** La variable controlada es la cantidad o condición que se mide y controla. Normalmente, la variable controlada es la salida del sistema. (Ogata, 2010, p. 3).
- **Señal de control o variable manipulada:** es la cantidad o condición que el controlador modifica para afectar el valor de la variable controlada. (Ogata, 2010, p. 3).
- **Controlar:** significa medir el valor de la variable controlada del sistema y aplicar la variable manipulada al sistema para corregir o limitar la desviación del valor medido respecto del valor deseado. (Ogata, 2010, p. 3).
- **Plantas:** Una planta puede ser una parte de un equipo, tal vez un conjunto de los elementos de una máquina que funcionan juntos, y cuyo objetivo es efectuar una operación particular. En este libro se llamará planta a cualquier objeto físico que se va a controlar (como un dispositivo mecánico, un horno de calefacción, un reactor químico o una nave espacial). (Ogata, 2010, p. 3).
- **Procesos:** El Diccionario Merriam-Webster define un proceso como una operación o un desarrollo natural progresivamente continuo, marcado por una serie de cambios graduales que se suceden unos a otros de una forma relativamente fija y que

conducen a un resultado o propósito determinados; o una operación artificial o voluntaria que se hace de forma progresiva y que consta de una serie de acciones o movimientos controlados, sistemáticamente dirigidos hacia un resultado o propósito determinado. En este libro se llamará proceso a cualquier operación que se va a controlar. Algunos ejemplos son los procesos químicos, económicos y biológicos. (Ogata, 2010, p. 3).

- **Sistemas:** Un sistema es una combinación de componentes que actúan juntos y realizan un objetivo determinado. Un sistema no está necesariamente limitado a los sistemas físicos. El concepto de sistema se puede aplicar a fenómenos abstractos y dinámicos, como los que se encuentran en la economía. Por tanto, la palabra sistema debe interpretarse en un sentido amplio que comprenda sistemas físicos, biológicos, económicos y similares. (Ogata, 2010, p. 3).
- **Perturbaciones:** Una perturbación es una señal que tiende a afectar negativamente el valor de la salida de un sistema. Si la perturbación se genera dentro del sistema se denomina interna, mientras que una perturbación externa se genera fuera del sistema y es una entrada. (Ogata, 2010, p. 3).
- **Control realimentado:** El control realimentado se refiere a una operación que, en presencia de perturbaciones, tiende a reducir la diferencia entre la salida de un sistema y alguna entrada de referencia, y lo realiza tomando en cuenta esta diferencia. Aquí sólo se especifican con este término las perturbaciones impredecibles, ya que las perturbaciones predecibles o conocidas siempre pueden compensarse dentro del sistema. (Ogata, 2010, p. 3).
- **Variable de proceso o variable medida:** Es la señal procedente del transmisor y que representa la magnitud medida que se desea controlar. (García, 2014, p. 95). Se puede también definir como una condición del fluido de proceso, líquido, gas, vapor, que puede cambiar el proceso de fabricación de alguna manera. (García, 2014, p. 96). En la mayoría de los casos la variable medida es también la variable de proceso. (García, 2014, p. 97).

- **Elemento final de control:** Se encarga de regular la variable manipulada. (García, 2014, p. 95). También se le conoce como aquellos elementos correctores, y constituyen la parte del sistema de control que actúa para cambiar físicamente la variable manipulada. (García, 2014, p. 107).
- **El Controlador:** Un controlador es un dispositivo que recibe datos de un instrumento de medida, compara ese dato con un valor deseado programado y, si es necesario, envía una señal a un elemento de control para tomar una acción correctora. Hay tres tipos de controladores locales: neumáticos, electrónicos o programables. Frecuentemente, los controladores también están en un sistema de control digital. (García, 2014, p. 105).
- **Valor deseado (*setpoint*):** Es un valor para una variable de proceso, que es el óptimo para mantenerse. Por ejemplo, si una temperatura de proceso necesita permanecer dentro de 5 °C de 100 °C, entonces el valor deseado es 100 °C. Puede emplearse un detector de temperatura para ayudar a mantener la temperatura en el valor deseado. (García, 2014, p. 96).
- **Algoritmo de control:** Un algoritmo de control es una expresión matemática de una función de control. (García, 2014, p. 99).
- **Transductor:** Es un dispositivo que transforma una señal mecánica en una señal eléctrica. Por ejemplo, dentro de un dispositivo de presión capacitivo, un transductor convierte cambios de presión en un cambio proporcional de capacitancia. (García, 2014, p. 102).
- **Convertidor:** Un convertidor es un dispositivo que convierte un tipo de señal en otro tipo diferente de señal. Por ejemplo, un convertidor transforma corriente en tensión o una señal analógica en una señal digital. Un convertidor utilizado para transformar un señal de corriente de 4-20 mA en una señal neumática de 3-15 psig, generalmente utilizada por actuadores de válvula, se denomina convertidor de corriente a presión. (García, 2014, p. 102).
- **Sensor:** Un sensor es un dispositivo que responde a algunas propiedades de tipo eléctrico, mecánico, térmico, magnético, químico, entre otros., generando una señal

eléctrica que puede ser susceptible de medición. Normalmente, las señales obtenidas a partir de un sensor son de pequeña magnitud y necesitan ser tratadas convenientemente en los aspectos de amplificación y filtrado principalmente. Si a un elemento sensor se le adjunta un dispositivo de acondicionamiento de la señal, entonces se le denomina transductor. (García, 2020, p. 92).

- **Transmisor:** En términos de instrumentación es el dispositivo de medida, llamado así debido a que transmite la medida de proceso en forma de señal. (García, 2014, p. 94). Básicamente, un transmisor es un dispositivo que convierte una señal de un detector o transductor en una señal normalizada y la transmite a un monitor o controlador. Los transmisores comprenden. (García, 2014, p. 102):
  - Transmisores de presión
  - Transmisores de caudal
  - Transmisores de nivel
  - Transmisores de temperatura, etc.
- **Señales:** Hay tres clases de señales para transmitir la detección de la variable de proceso, desde el detector, transmisor, controlador, etc., hasta el sistema de control centralizado, que son las siguientes. (García, 2014, p.103):
  - Señal neumática
  - Señal analógica
  - Señal digital
- **Señales analógicas:** La señal eléctrica normal más usual es la señal de corriente de 4-20 mA. Con esta señal, un transmisor envía una pequeña corriente por medio de un conjunto de cables. La señal de corriente es una clase de medida en la que 4 mA representa la medida más baja del margen, y 20 mA representa la medida más elevada. Esta señal del transmisor de 4-20 mA puede convertirse en una indicación de temperatura o en una señal de entrada a un dispositivo de control. (García, 2014, pp. 103-104).
- **Sensores y transductores:** Los transductores son uno de los elementos más importantes del bucle de control, puesto que su cometido es la medición de las variables que intervienen en el proceso. Los esfuerzos dedicados al análisis y diseño

de los sistemas de control con objeto de conseguir mejores prestaciones en cuanto a precisión resultarán baldíos, si paralelamente no se utilizan para la medición de las variables a controlar transductores de buena calidad, ya que el sistema de control nunca será mejor que los sistemas de percepción utilizados para la medición de las variables de estos. (García, 2020, p. 91).

- **Acondicionadores de señal:** Los acondicionadores de señal son circuitos que convierten los parámetros eléctricos de salida de los transductores en una señal eléctrica (generalmente corriente, voltaje o frecuencia) que se puede medir fácilmente. Este bloque incluye todas aquellas transformaciones que deben realizarse sobre las señales eléctricas que resultan en la salida del transductor, y que son previas al procesado para extraer la información que se busca. El conjunto transductor-acondicionador es la interfase entre la variable física y la entrada del circuito electrónico que vaya a procesar la información (por ejemplo, el convertidor A/D de un microprocesador). (Granda *et al.*, 2015, p. 6).

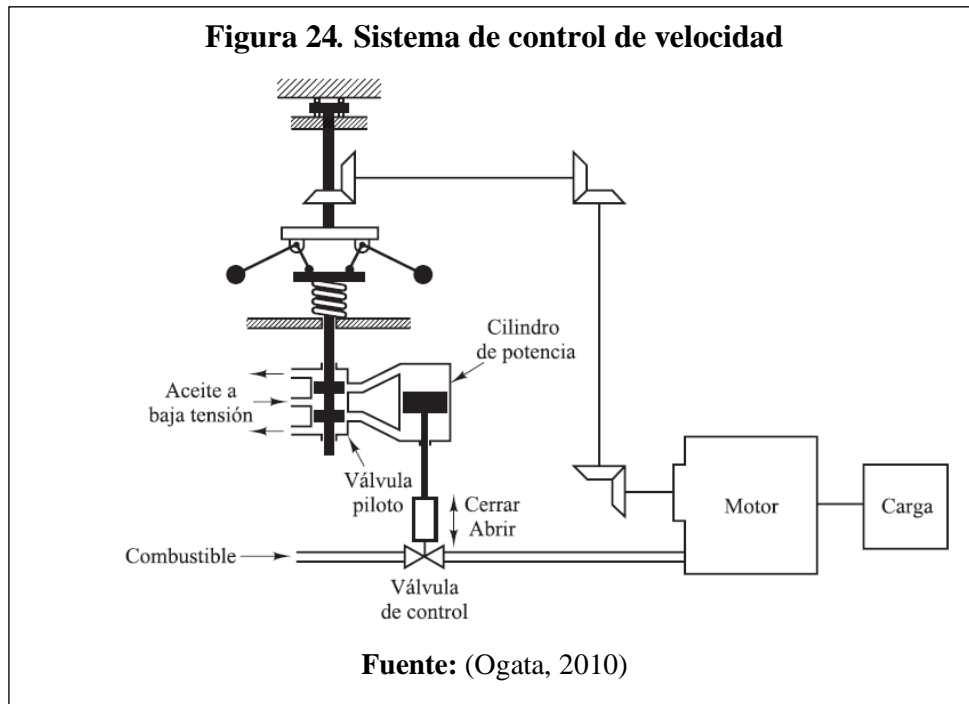
## **Ejemplos de sistemas de control**

### ***Sistema de control de velocidad.***

El principio básico del regulador de velocidad de Watt para una máquina se ilustra en el diagrama esquemático de la **Figura 24**. La cantidad de combustible que se admite en la máquina se ajusta de acuerdo con la diferencia entre la velocidad de la máquina que se pretende y la velocidad real. La secuencia de acciones puede describirse del modo siguiente: el regulador de velocidad se ajusta de modo que, a la velocidad deseada, no fluya aceite a presión en ningún lado del cilindro de potencia. (Ogata, 2010, p. 4).

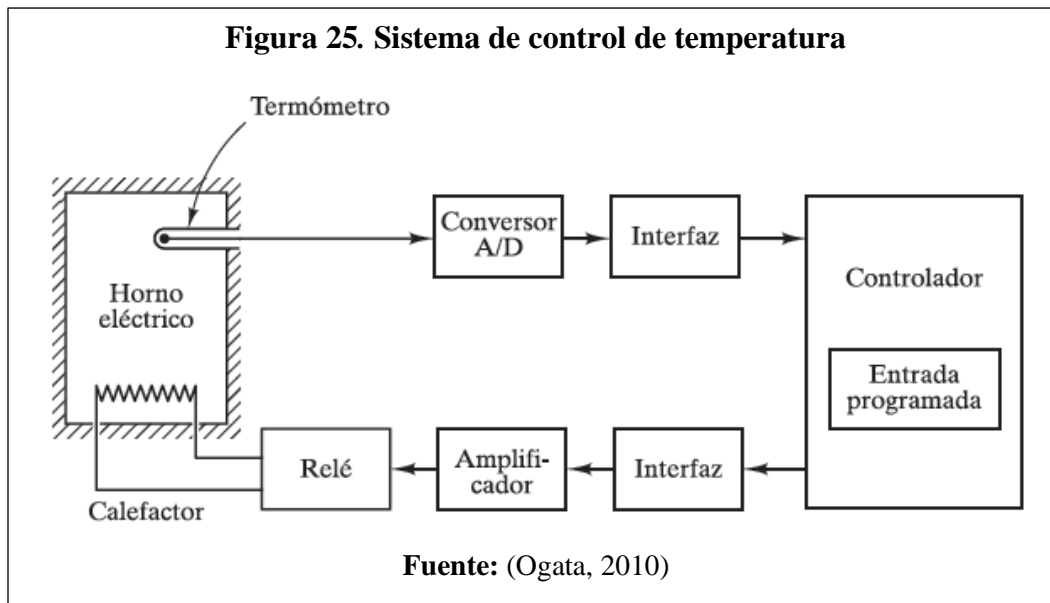
Si la velocidad real cae por debajo del valor deseado debido a una perturbación, la disminución de la fuerza centrífuga del regulador de velocidad provoca que la válvula de control se mueva hacia abajo, aportando más combustible, y la velocidad del motor aumenta hasta alcanzar el valor deseado. Por otra parte, si la velocidad del motor aumenta por encima del valor deseado, el incremento en la fuerza centrífuga del regulador provoca que la válvula de control se mueva hacia arriba. (Ogata, 2010, p. 4).

Esto disminuye el suministro de combustible, y la velocidad del motor se reduce hasta alcanzar el valor deseado. En este sistema de control de velocidad, la planta (el sistema controlado) es la máquina y la variable controlada es la velocidad de esta. La diferencia entre la velocidad deseada y la velocidad real es la señal de error. La señal de control (la cantidad de combustible) que se va a aplicar a la planta (la máquina) es la señal de actuación. La entrada externa que se aplica para alterar la variable controlada es la perturbación. Un cambio inesperado en la carga es una perturbación. (Ogata, 2010, p. 4).



### ***Sistema de control de temperatura.***

La **Figura 25** muestra un diagrama esquemático del control de temperatura de un horno eléctrico. La temperatura del horno eléctrico se mide mediante un termómetro, que es un dispositivo analógico. La temperatura analógica se convierte a una temperatura digital mediante un convertidor A/D. La temperatura digital se introduce en un controlador mediante una interfaz. Esta temperatura digital se compara con la temperatura de entrada programada, y si hay una discrepancia (error) el controlador envía una señal al calefactor, a través de una interfaz, amplificador y relé, para hacer que la temperatura del horno adquiriera el valor deseado. (Ogata, 2010, p. 4).



### **Control en lazo cerrado en relación con control en lazo abierto**

#### ***Sistemas de control realimentado.***

Un sistema que mantiene una relación determinada entre la salida y la entrada de referencia, comparándolas y usando la diferencia como medio de control, se denomina sistema de control realimentado. Un ejemplo sería el sistema de control de temperatura de una habitación. Midiendo la temperatura real y comparándola con la temperatura de referencia (temperatura deseada), el termostato activa o desactiva el equipo de calefacción o de enfriamiento para asegurar que la temperatura de la habitación se mantiene en un nivel confortable independientemente de las condiciones externas. (Ogata, 2010, p. 7).

Los sistemas de control realimentados no se limitan a la ingeniería, sino que también se encuentran en diversos campos ajenos a ella. Por ejemplo, el cuerpo humano es un sistema de control realimentado muy avanzado. Tanto la temperatura corporal como la presión sanguínea se conservan constantes mediante una realimentación fisiológica. De hecho, la realimentación realiza una función vital: hace que el cuerpo humano sea relativamente insensible a las perturbaciones externas, permitiendo que funcione de forma adecuada en un entorno cambiante. (Ogata, 2010, p.7).

### ***Sistemas de control en lazo cerrado (feedback control).***

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control en lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente. En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación (que puede ser la propia señal de salida o una función de la señal de salida y sus derivadas y/o integrales), con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. (Ogata, 2010, p. 7).

### ***Sistemas de control en lazo abierto (feedforward control).***

Los sistemas en los cuales la salida no tiene efecto sobre la acción de control se denominan sistemas de control en lazo abierto. En otras palabras, en un sistema de control en lazo abierto no se mide la salida ni se realimenta para compararla con la entrada. Un ejemplo práctico es una lavadora. El remojo, el lavado y el centrifugado en la lavadora operan con una base de tiempo. La máquina no mide la señal de salida, que es la limpieza de la ropa. En cualquier sistema de control en lazo abierto, la salida no se compara con la entrada de referencia. (Ogata, 2010, p. 8).

Así, a cada entrada de referencia le corresponde una condición de operación fija; como resultado de ello, la precisión del sistema depende de la calibración. Ante la presencia de perturbaciones, un sistema de control en lazo abierto no realiza la tarea deseada. En la práctica, el control en lazo abierto sólo se usa si se conoce la relación entre la entrada y la salida y si no hay perturbaciones internas ni externas. Es evidente que estos sistemas no son de control realimentado. Obsérvese que cualquier sistema de control que opere con una base de tiempo está en lazo abierto. (Ogata, 2010, p. 8).

Por ejemplo, el control de tráfico mediante señales operadas con una base de tiempo es otro ejemplo de control en lazo abierto. (Ogata, 2010, p. 8).

### ***Control en cascada.***

El control con retroalimentación es el método de control automático de procesos más simple que se utiliza para la compensación de las perturbaciones de dicho proceso. Sin embargo, la

desventaja del control con retroalimentación es que actúa o reacciona después de que el proceso ya ha sido perturbado. En otras palabras, si la perturbación entra al proceso, esta tiene que recorrer o propagarse a lo largo del proceso, causar una desviación en la variable controlada con respecto al *setpoint*, y es ahí cuando la retroalimentación procede con la acción correctiva. (Smith, 2002, p.61).

Conforme se establecen los requerimientos del proceso, o en procesos cuya dinámica es lenta o presentan frecuentemente muchas perturbaciones, el desempeño que ofrece un control con retroalimentación podría volverse inaceptable. Dicho lo anterior, el control en cascada es un método que en algunas aplicaciones mejora de forma significativa el rendimiento proporcionado por un control con retroalimentación. Esta estrategia de control ya es bien conocida y se ha venido utilizando por mucho tiempo. (Smith, 2002, p. 61).

El control en cascada es un sistema de control en el que un lazo de control secundario (esclavo) se instala para controlar una variable, que es una fuente principal de perturbación de carga, para otro lazo de control primario (maestro). El controlador del lazo primario determina el valor deseado (SP) del controlador adicionador en el lazo secundario. (García, 2014, p. 135).

Para la correcta implementación de esta técnica se debe enfatizar en lo siguiente: Al diseñar métodos de control en cascada, una consideración importante es que la variable secundaria debe responder o corregir de manera más rápida ante los cambios de la perturbación y en la variable manipulada, con respecto a la respuesta que da la variable primaria y cuanto más rápido mejor. (Smith, 2002, p. 64).

#### *Implementación y sintonización de controladores.*

Se generan dos preguntas a raíz de lo anterior, ¿Cómo implementar un control en cascada en una operación totalmente automatizada y cómo sintonizar o ajustar los controladores? La respuesta a ambas preguntas es la misma, desde adentro hacia afuera. Es decir, el controlador interno se ajusta primero en modo de *setpoint* remoto, mientras que, los otros lazos están en manual. Como el control interno se ajusta en el modo de *setpoint* remoto, una buena práctica es comprobar primero su funcionamiento, antes de pasar al siguiente controlador. De la misma forma, este procedimiento continua hacia afuera hasta que todos los controladores estén en un correcto funcionamiento. (Smith, 2002, p. 65).

*Sistemas en cascada de dos niveles.*

El objetivo principal es lograr que el controlador interno o secundario sea rápido y sensible, esto para minimizar el efecto de las perturbaciones en la variable primaria controlada. Ajustar este tipo de sistemas al final se reduce en ajustar el control primario. Existen ciertas maneras de ajustar el controlador primario, por ejemplo, expertos utilizan a menudo el método de prueba y error. Los otros métodos disponibles básicamente consisten en seguir una serie de pasos o “receta” para obtener los primeros valores de ajuste. El primer método disponible es la técnica oscilatoria de Ziegler-Nichols. (Smith, 2002, p. 65).

**Transductores de temperatura.**

A continuación, se exponen las definiciones y principios de funcionamiento sobre transductores de temperatura más comunes utilizados en aplicaciones industriales, también así las comparaciones en relación con ventajas y desventajas realizadas en distintas literaturas, esto con el fin de establecer argumentos y criterios para una correcta selección de estos de acuerdo con los requerimientos de una eventual implementación.

La temperatura es probablemente la variable que más se mide y controla en los procesos industriales. Las propiedades físicas de los materiales dependen de su temperatura y siempre es posible utilizar las variaciones térmicas de una de las características físicas de un material dado como principio de transducción de temperatura. (Granda *et al.*, 2015, p. 217).

Un transductor de temperatura es un dispositivo que produce una señal eléctrica, generalmente intensidad, voltaje o impedancia, función de la temperatura a la que se encuentra. Los transductores de temperatura se pueden clasificar en cinco grupos principales (Granda *et al.*, 2015, p. 217):

- Bimetales (sensores de temperatura)
- Detectores de temperatura resistivos (RTD)
- Dispositivos resistivos semiconductores (termistores)
- Dispositivos termoelectrónicos (termopares)
- Transductores de temperatura integrados (basados en diodos y transistores bipolares)

***Anotaciones importantes:***

- Los dispositivos resistivos y los integrados son transductores moduladores, lo que significa que necesitan fuentes de alimentación auxiliares y, generalmente, un circuito en puente para producir una salida útil, (Granda *et al.*, 2015, p. 217).
- Mientras que los dispositivos termoeléctricos son autogeneradores, esto es, no requieren ninguna fuente de alimentación para generar la señal de salida. (Granda *et al.*, 2015, p. 217).
- Los RTD y los termistores son transductores de temperatura resistivos que se basan en la variación de la resistividad de un conductor (RTD) o de un semiconductor (termistor) con la temperatura. (Granda *et al.*, 2015, p. 217).
- Los transductores de temperatura termoeléctricos se basan en el efecto Seebeck. (Granda *et al.*, 2015, p. 217).
- Los transductores de temperatura basados en diodos y transistores bipolares aprovechan la dependencia con la temperatura de la tensión en una unión PN directamente polarizada. Para cada uno de ellos, se analizan los principios físicos en los que se basan, su modo de funcionamiento y sus características principales. (Granda *et al.*, 2015, p. 217).

***Detectores de temperatura resistivos: RTD***

Los detectores de temperatura resistivos (Resistance Temperature Detector, RTD) son transductores de temperatura que se basan en la variación de la resistencia de un conductor con la temperatura. Actualmente el platino es el material empleado con mayor frecuencia en este tipo de transductores y de ahí viene el nombre de PRT (Platinum Resistance Thermometer). (Granda *et al.*, 2015, p. 219).

La **Tabla 1** muestra los parámetros más importantes para RTD fabricados con materiales como platino, níquel y cobre.

**Tabla 1. Parámetros de diversos detectores de temperatura resistivos.**

<i>Parámetro</i>	<i>Platino</i>	<i>Cobre</i>	<i>Níquel</i>
Resistividad a 20°C, $\mu\Omega \times \text{cm}$	10.6	1.673	6.844
$\alpha$ , $\Omega/\Omega/^\circ\text{C}$	0.00385	0.0043	0.00681
$R_0$ , $\Omega$ a 0°C	25, 50, 100, 200, 500...	10 (20°C)	50, 100, 120
Margen	-200 a +850°C	-200 a +260°C	-80 a + 320°C

**Fuente:** Granda *et al.*, (2015)

*Principales ventajas.* (Granda *et al.*, 2015, p. 221):

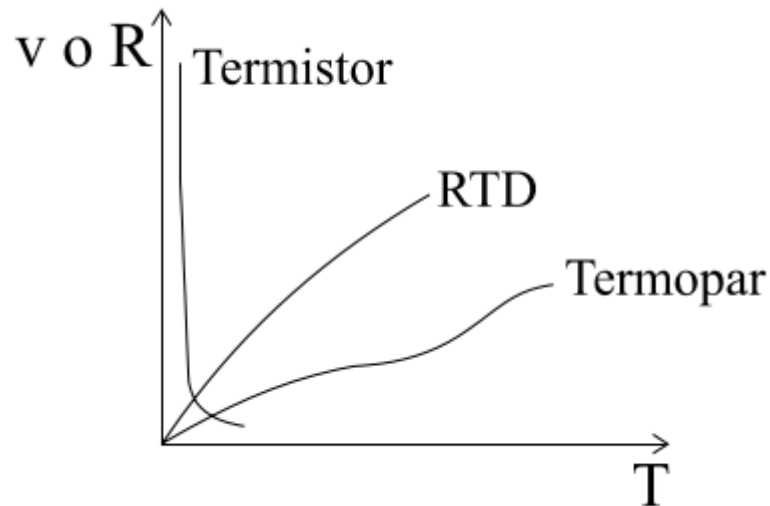
- Su sensibilidad (unas 10 veces mayor que la de los termopares).
- La alta repetibilidad y exactitud en el caso del platino y el bajo coste en el caso del cobre y del níquel.
- El tiempo de respuesta está comprendido entre 0.5 y 5 segundos, lentitud que representa un inconveniente.

#### ***Dispositivos resistivos semiconductores: Termistores***

Los termistores son dispositivos basados en la variación de la resistividad de los semiconductores con la temperatura. Esto es, son resistencias variables con la temperatura, pero no están basadas en conductores como los RTD, sino en semiconductores. (Granda *et al.*, 2015, p.222).

Mientras que los termopares son los transductores de temperatura más versátiles y los RTD los más estables, los termistores son, con mucho, los más sensibles, permitiendo detectar pequeños cambios de temperatura que no se podrían observar con un RTD o un termopar. El precio que se paga por este incremento de sensibilidad es la pérdida de linealidad. El termistor es un dispositivo extremadamente no lineal, como se muestra en la **Figura 26**, en la que se compara el rango y la linealidad de los termistores, RTD y termopares. Un termistor puede variar su resistencia diez veces más que un RTD para un mismo cambio en la temperatura. (Granda *et al.*, 2015, p. 222).

**Figura 26. Comparación entre distintos transductores de temperatura.**



**Fuente:** Granda *et al.*, (2015)

*Ventajas.* (Granda *et al.*, 2015, p. 224).

- Alta sensibilidad
- Alta velocidad de respuesta
- Bajo costo

*Aplicaciones.* (Granda *et al.*, 2015, p. 224).

- Basadas en calentamiento externo del termistor (medida, control y compensación de la temperatura), sobre todo con los NTC.
- Basadas en calentarlo mediante el propio circuito de medida: medida de caudal, nivel y vacío (método de Pirani) y análisis de la composición de gases.

### ***Transductores de temperatura termoeléctricos (Termopares).***

Los termopares son quizás los dispositivos eléctricos más comunes en la medida de temperatura. Los termopares son transductores de temperatura autogeneradores, esto es, generan una señal eléctrica función de la temperatura sin necesidad de alimentación eléctrica. Se basan en los fenómenos termoeléctricos (efecto Seebeck) que se producen cuando existe una diferencia de

temperatura entre partes distintas de un sistema conductor o semiconductor. (Granda *et al.*, 2015, p. 235).

El efecto Seebeck consiste en la aparición de una tensión termoeléctrica en un circuito compuesto por dos conductores diferentes cuyo punto de unión se encuentra a una temperatura dada. Esta tensión depende de los materiales que forman la unión y de la temperatura de esta unión. (Granda *et al.*, 2015, p. 236). En pocas palabras, el efecto Seebeck es la transformación directa del calor en una tensión cuando se calienta la unión entre dos metales distintos. (Granda *et al.*, 2015, p. 236).

#### *Características y ventajas.*

Los termopares son los transductores de uso más frecuente para la medida de temperaturas debido a (Granda *et al.*, 2015, p. 236):

- Son los transductores de temperatura más versátiles.
- Tienen un rango de medida grande, no sólo en su conjunto, que va desde (-270 °C hasta 3000 °C), sino también en cada modelo particular.
- Su estabilidad a largo plazo es aceptable.
- Su fiabilidad elevada; para temperaturas bajas tienen mayor exactitud que los RTD.
- Por su pequeño tamaño, permiten tener buenos tiempos de respuesta, del orden de los milisegundos.
- Poseen robustez, simplicidad y flexibilidad de utilización.
- Se dispone de modelos de bajo precio que son suficientes en muchas aplicaciones.

#### *Tipos de termopares.*

En la **Tabla 2**, se recogen las características de algunos de los termopares más comunes y su designación de acuerdo con las normas ANSI. Para utilizar los datos de la tensión de salida de los termopares que se muestran en las tablas correspondientes, el criterio es asignar el signo '+' al primero de los componentes del termopar y el signo '-' al segundo. Así, por ejemplo, en el termopar tipo J, se asigna al hierro el signo '+' y al constantan el signo '-'. (Granda *et al.*, 2015, p. 241).

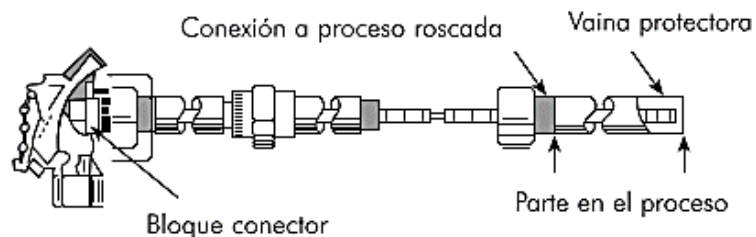
**Tabla 2. Termopares comunes y su designación de acuerdo con las normas ANSI.**

<i>Designación ANSI</i>	<i>Composición</i>		<i>Margen habitual</i>	<i>mV/margen</i>
	<i>Positivo</i>	<i>Negativo</i>		
B	Pt (6%)/Rodio	Pt (30%)/Rodio	38 a 1800°C	13.6
E	Cromel	Constantan	0 a 982°C	75.0
J	Hierro	Constantan	-184 a 760°C	50.0
K	Cromel	Alumel	-184 a 1260°C	56.0
N	Nicrosil (Ni-Cr-Si)	Nisil (Ni-Si-Mg)	-270 a 1300°C	51.8
R	Pt (13%)/Rodio	Pt	0 a 1593°C	18.7
S	Pt (10%)/Rodio	Pt	0 a 1538°C	16.0
T	Cobre	Constantan	-184 a 400°C	26.0

**Fuente:** Granda *et al.*, (2015)

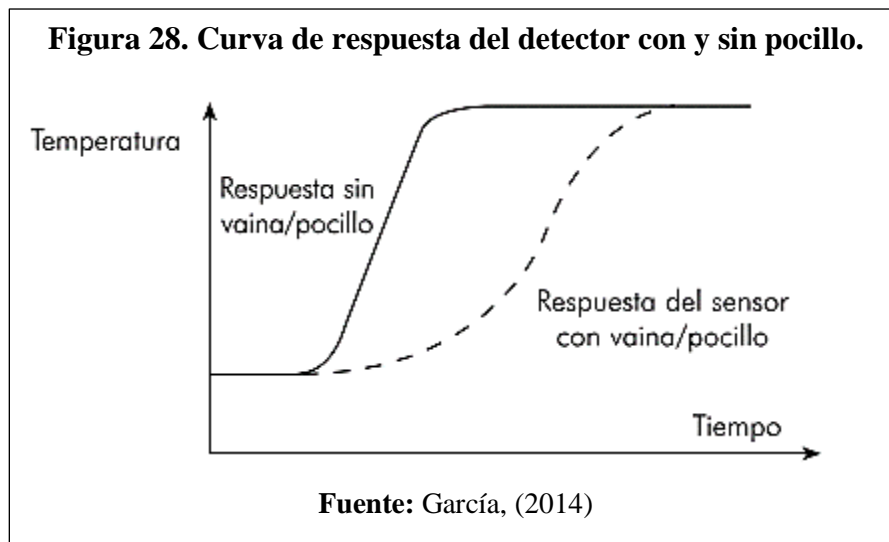
### Pocillos térmicos.

Con frecuencia, el medio ambiental del proceso, donde se requiere controlar la temperatura, no solo está caliente, sino también presurizado y posiblemente es químicamente corrosivo o radiactivo. En general, para facilitar la sustitución de los detectores de temperatura (RTD y TC), para su examen o reemplazamiento, y para proporcionar protección mecánica, los detectores se instalan dentro de pocillos térmicos, como se muestra en la **Figura 27**. (García, 2014, p. 87).

**Figura 27. Diagrama de instalación de un detector en un pocillo térmico.**

**Fuente:** García, (2014)

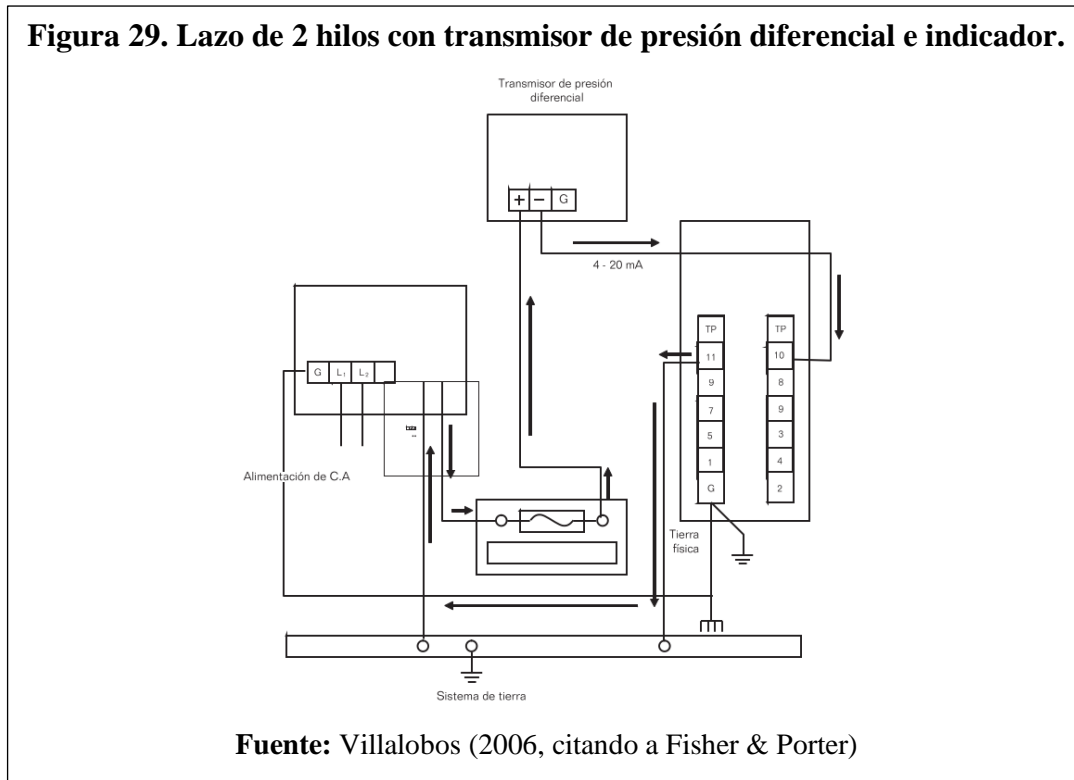
Básicamente, un pocillo térmico es un tubo metálico hueco con un extremo cerrado. Normalmente se instala permanentemente en la tubería. El detector se introduce en su interior y hace contacto con el extremo cerrado. Un inconveniente de los pocillos térmicos es su largo tiempo de respuesta, ya que la temperatura de proceso tiene que transmitirse primero al pocillo y después al detector. En la **Figura 28** se muestra un ejemplo de la respuesta de temperatura de un detector sin pocillo, es decir, al descubierto, y con pocillo. Sin embargo, minimizando el espacio de aire entre el detector y el pocillo, puede disminuirse este retraso térmico. (García, 2014, p. 88).



### **Lazos de control de dos y cuatro hilos.**

Las conexiones de control o lazos de dos y cuatro hilos son empleados en el campo de la instrumentación. Gran parte de la importante en el cableado de los lazos de dos hilos son las señales que se manejan. En la instrumentación se emplean las conexiones tipo serie en donde todos los instrumentos quedan conectados en serie y es llamada arreglo de dos hilos, en esta conexión la corriente (4 a 20) mA, fluye a través de todos los instrumentos que componen el lazo como se muestra en la figura 2-16, es importante señalar que la polaridad de las conexiones se debe respetar y si se rompe o se desconecta un cable, el lazo no funcionará. (Villalobos, 2006, p. 57). En la **Figura 29** se ejemplifica un diagrama eléctrico de estas conexiones.

En la **Figura 29** se muestra un diagrama de 2 hilos con un transmisor de presión diferencial conectado con un indicador y alimentados con una fuente de 26 volts de corriente directa. (Villalobos, 2006, p. 59).



### Elementos finales de control.

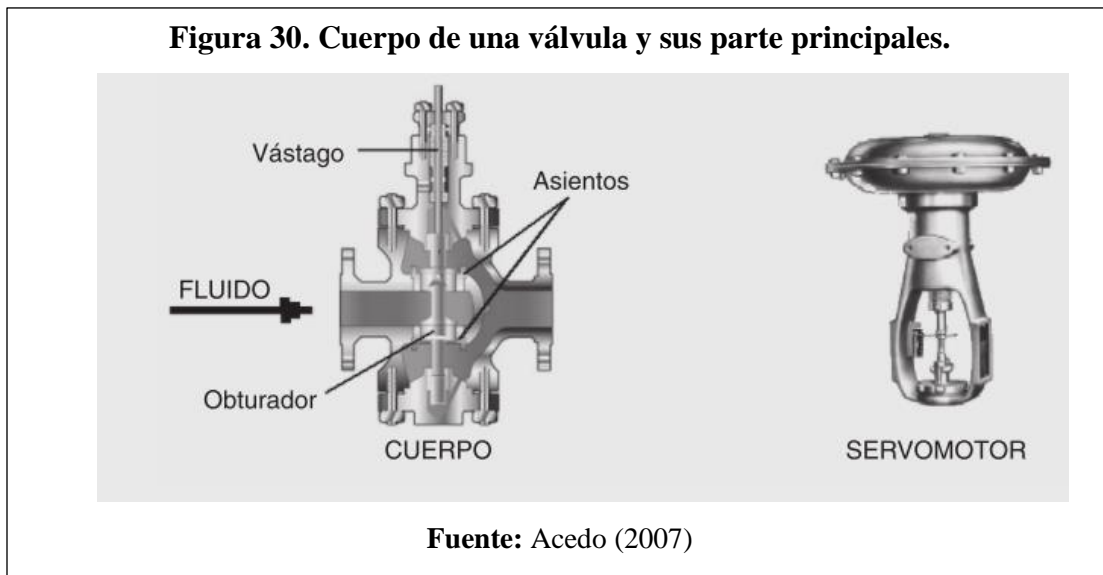
Aunque los sistemas se diseñen para obtener los mejores resultados, bien en estabilidad del proceso o bien para optimizarlo, el elemento final de control sigue siendo una válvula automática o cualquier equipo, por ejemplo, que accione el mecanismo necesario para controlar el flujo de un fluido. (Acedo, 2007, p. 353).

### Válvulas automáticas.

La válvula automática es el componente del lazo de control que modifica el paso de fluido, a través de un orificio con restricción variable, en función de la señal procedente del controlador. Al modificar el caudal de paso modifica a su vez el valor de una variable de proceso, por ejemplo: presión en un recipiente, temperatura de un intercambiador, etc. La válvula automática consta de dos partes fundamentales. (Acedo, 2007, p. 354):

- Cuerpo y partes internas
- Actuador o servomotor

El cuerpo de la válvula contiene el conjunto de obturador y asiento, que son los que realmente llevan a cabo la función de control. Este conjunto se conoce con el nombre de trim de la válvula. El asiento se encuentra solidario con el cuerpo, mientras que el obturador está unido a un vástago accionado por el servomotor. La **Figura 30** muestra las dos partes principales mencionadas: cuerpo y servomotor. (Acedo, 2007, p. 354).

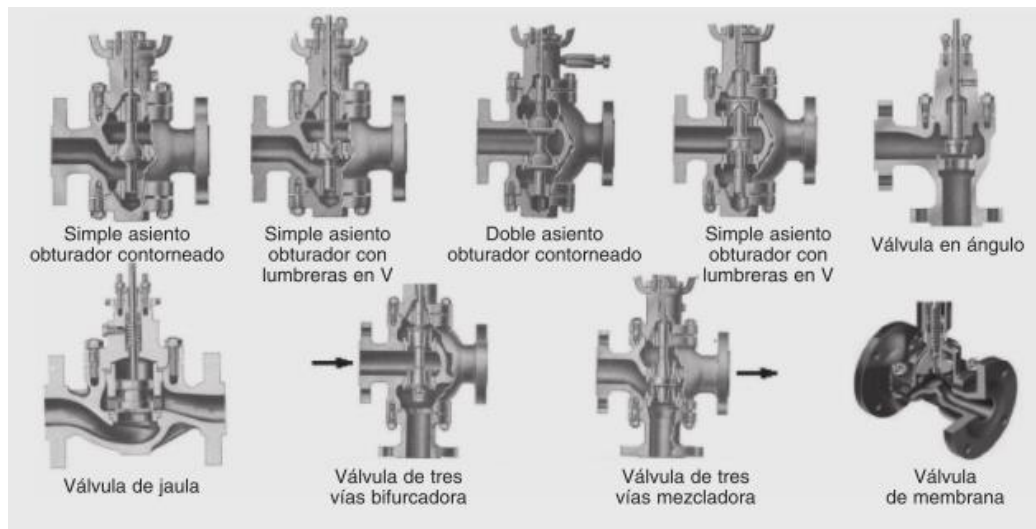


De forma general las válvulas pueden pertenecer a alguno de los dos grupos siguientes en función de cómo se realiza el desplazamiento del obturador:

- Movimiento lineal
- Movimiento circular

En las primeras, el obturador se mueve longitudinalmente en la dirección del vástago, mientras que en las segundas el movimiento es rotacional respecto al vástago. La **Figura 31** muestra algunos cuerpos de válvulas con movimiento lineal. (Acedo, 2007, p. 354).

**Figura 31. Cuerpos de válvulas con movimiento lineal.**



**Fuente:** Acedo (2007)

Exceptuando la de membrana, el resto de las válvulas que aparecen en la **Figura 31** pertenecen a la denominación genérica de «válvulas de globo», siendo las más utilizadas en la industria. (Acedo, 2007, p. 355).

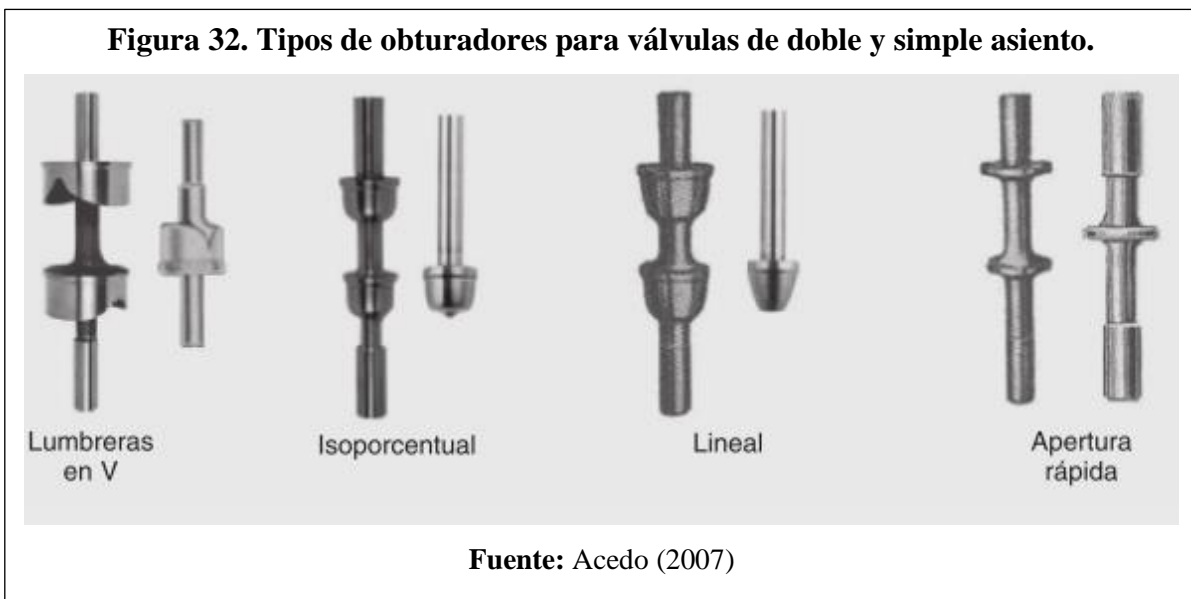
#### *Obturador y asientos.*

Este conjunto se suele conocer como trim de la válvula y representa la parte fundamental de la misma desde el punto de vista de regulación. Dependiendo de la forma del obturador se tendrá una curva característica apertura-caudal u otra. (Acedo, 2007, p. 356).

La **Figura 32** muestra diversos tipos de obturadores para válvulas de doble y simple asiento, algunos de ellos guiados por arriba y por abajo y otros solo por arriba. Las características de estos obturadores, cuyas curvas aparecen en la **Figura 33**, son las siguientes:

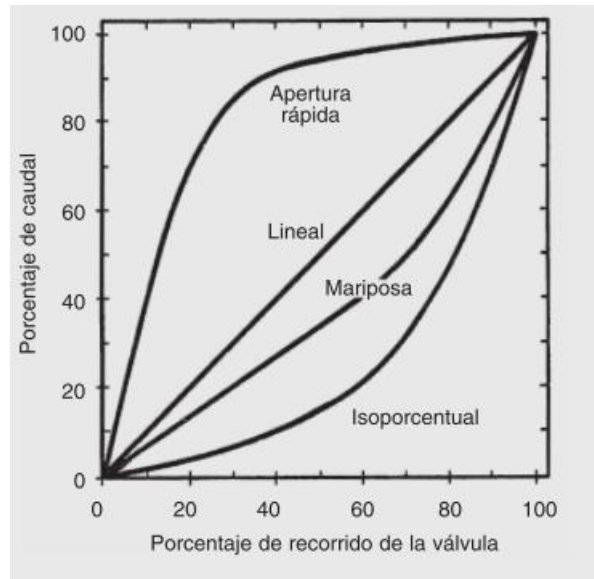
- *Isoporcentual.* Además de los isoporcentuales contorneados, los obturadores con lumbreras en «V» también disponen de esta característica, según la cual, a igual incremento de carrera de la válvula se produce igual porcentaje de cambio en el caudal que está pasando en ese punto. Para una *rangeabilidad* (también conocida como turndown, es la relación entre los caudales máximo y mínimo controlables) de 50, cada 1% de cambio en la carrera producirá un incremento de caudal de 3,91 %. (Acedo, 2007, p. 356).

- *Lineal*. Los que disponen de esta característica, a igual incremento de carrera corresponde igual incremento de caudal al tener pendiente constante. En otras palabras, a 50 % de carrera corresponde 50 % de caudal y a 100 % de carrera 100 % de caudal. (Acedo, 2007, p.357).
- *Apertura rápida*. Proporcionan la mayor parte del flujo de forma muy rápida. Este tipo de válvulas se suelen utilizar para corte, o para regulación On-Off. A veces se conocen como obturadores «de seta». (Acedo, 2007, p. 357).



La **Figura 33** muestra cuatro curvas características de las válvulas más utilizadas. La de apertura rápida proporciona un gran cambio de caudal al principio de recorrido y posteriormente la respuesta es justamente al revés, mucho recorrido para muy poco cambio de caudal. Las válvulas con estas características no se suelen utilizar para regulación, sino para apertura o corte de caudal de forma instantánea, tal como ocurre en el modo de control On-Off. (Acedo, 2007, p. 360).

**Figura 33. Curvas características de las válvulas más utilizadas.**



**Fuente:** Acedo (2007)

### *Accesorios de las válvulas.*

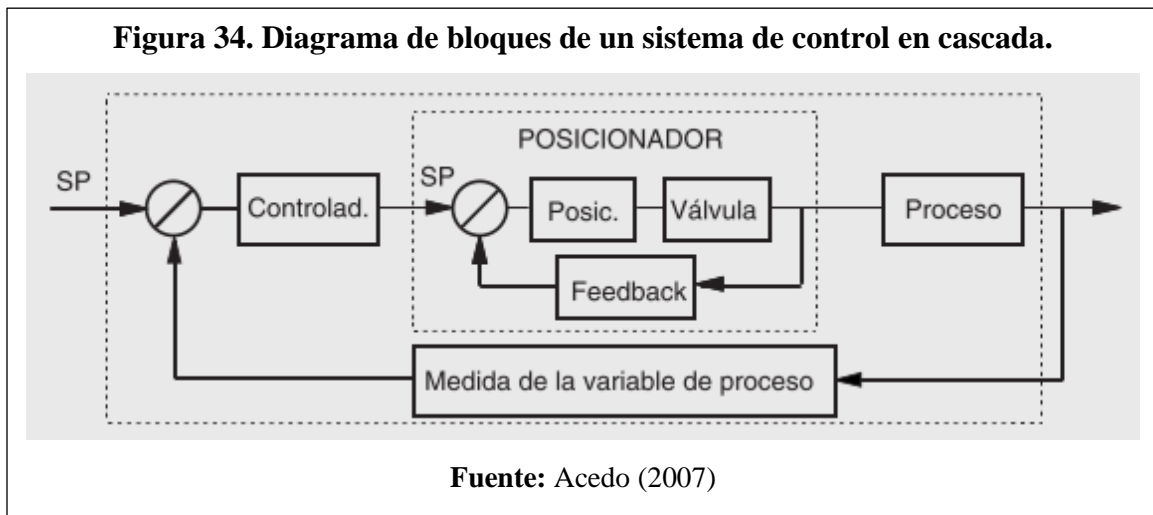
#### *Posicionador.*

Cuando se aplica señal a un servomotor no existe seguridad de que se vaya a situar en la posición correcta. El posicionador es un servomecanismo con un sistema de realimentación que detecta la posición de la válvula comparándolo con el valor deseado y modifica la cantidad de aire enviada a la cabeza de la válvula. (Acedo, 2007, p. 371).

En la actualidad existen diferentes tipos de posicionadores. Además de los neumáticos se encuentran los electroneumáticos, que actúan directamente con la señal de 4 a 20 mA, o bien con actuación digital. En cualquier caso, el objeto de todos ellos es el mismo, actuar como controlador de posición. Realmente actúan como el secundario de un control en cascada en el que el controlador primario es el correspondiente a la variable de proceso, por ejemplo, temperatura. (Acedo, 2007, p. 371).

De alguna manera el posicionador tiene un comportamiento similar a un controlador feedback. La **Figura 34** muestra el diagrama de bloques de un sistema de control en

cascada. El punto de consigna del posicionador es la señal procedente del controlador. La salida del controlador secundario (posicionador) es la que se envía a la válvula automática, mientras que la acción feedback se realiza por medio de la leva”. (Acedo, 2007, p. 372).



### *Variadores de velocidad*

El motor con variador de velocidad forma parte de un lazo de control. Desde el punto de visto de control, un proceso, o lazo de control, es un bloque con una variable de entrada y otra variable de salida que se deben de mantener en un cierto valor. En otras palabras, para mantener constante una **variable controlada** hay que actuar sobre otra variable que se denomina **manipulada**. Por ejemplo, para mantener **controlado** el caudal de impulsión de una bomba, una de las formas consiste en **manipular** su velocidad de giro. (Acedo, 2007, p. 385).

En muchas ocasiones el variador de velocidad se trata como elemento final de control. Por tanto, solo se considera el variador como una caja negra a la cual llega una señal procedente del sistema de control y, proporcional a ella, modifica la velocidad de un motor que mueve algún elemento directamente relacionado con el proceso. Por último, y no menos importante, queda decir que cuando se instala un conjunto motor con variador de velocidad, existen dos objetivos considerados como más importantes. (Acedo, 2007, p. 385):

- Ahorro de energía
- Mayor estabilidad en el control

### Conceptos generales del variador

No siempre se pueden utilizar variadores de velocidad, porque para ello es imprescindible que existan elementos accionados por motor, como puede ser una bomba, un soplante, etc. Existen diversos tipos de variadores de velocidad, dependiendo de si tienen que modificar la velocidad de un (Acedo, 2007, p. 386):

- Motor de corriente alterna con voltaje ajustable
- Motor de corriente alterna con frecuencia ajustable
- Motor de corriente continua con potencia ajustable

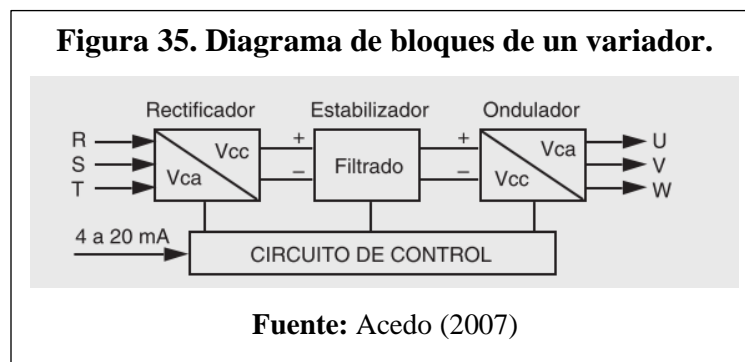
Entre ellos, los más utilizados son los que se basan en la variación de frecuencia. Como se sabe, la velocidad de giro de un motor de corriente alterna es función de la frecuencia. En un motor sincrónico simple, ver la **Ecuación 23**:

#### Ecuación 23. Velocidad de giro de un motor de corriente alterna.

$$\text{Velocidad de giro (rpm)} = f \left( \frac{\text{Frecuencia}}{\text{Pares de polos}} \right) * 60 \quad (23)$$

**Fuente:** (Acedo, Instrumentación y control básico de procesos, 2007)

Por ejemplo, un motor con dos pares de polos, operando a una frecuencia de 50 Hz tendrá velocidad de 1.500 rpm. (Acedo, 2007, p.386).



Del variador de velocidad es preciso conocer, al menos conceptualmente, las partes fundamentales que lo componen. A efectos de control se trata como si fuera una caja negra a la que llega una señal procedente del sistema de control y produce una salida que actúa sobre el motor para modificar su velocidad y, por tanto, el caudal de paso de producto. (Acedo, 2007, p. 387).

La **Figura 35** muestra un diagrama de bloques de un variador en el que pueden apreciarse tres zonas perfectamente diferenciadas, como son. (Acedo, 2007, p. 386):

- Rectificador: convierte la corriente alterna trifásica a corriente continua.
- Estabilizador: almacena energía para estabilizar la corriente continua.
- Ondulador o inversor: convierte la corriente continua a corriente alterna con frecuencia variable para alimentar el motor.

A continuación, se van a mencionar las ventajas y desventajas más relevantes a considerar si se implementa un variador de velocidad:

*Ventajas.* (Acedo, 2007, p. 391).

1. Se obtiene un mejor control.
2. Se consigue un ahorro energético que puede llegar a ser importante.

*Desventajas.* (Acedo, 2007, pp. 391-392).

1. No en todos los circuitos se pueden sustituir válvulas por variadores de velocidad.
  - 1.1. Para montar un variador es necesario que exista un motor. No en todos los circuitos existe.
  - 1.2. Existen líneas de proceso con productos en fase gas.
  - 1.3. A veces la impulsión de una bomba se envía a varios lugares.
2. El proyecto suele requerir una inversión relativamente alta.
  - 2.1. Puede necesitar estudio de viabilidad.
  - 2.2. En procesos críticos el variador debe ser redundante.
  - 2.3. A veces el coste del variador es superior al del motor.

### **Equipos de proceso.**

#### ***Bombas centrífugas.***

Existen diversas formas de efectuar el control de las bombas centrífugas, como son (Acedo, 2007, p. 392):

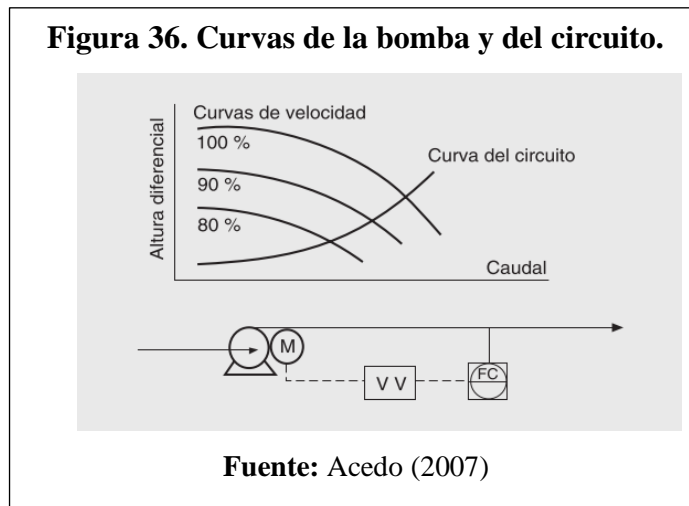
- Marcha-Parada (ON/OFF).
- Estrangulamiento en la línea de impulsión.

- Derivación de caudal.
- Velocidad de giro.

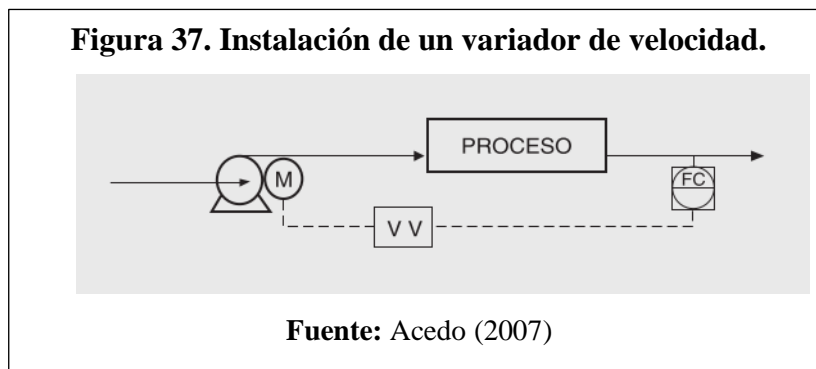
Con el método ON/OFF se corre el riesgo de ocasionar daños en los equipos debido a la frecuencia de cambios. Con los métodos siguientes los costes pueden ser altos cuando se opera a bajo caudal respecto al diseño. El control de velocidad disminuye los costes de operación, mientras que los de inversión pueden llegar a ser altos. (Acedo, 2007, p. 392).

*Control con velocidad variable.*

La **Figura 36** muestra las curvas, tanto de la bomba como del circuito. Se puede ver que a medida que va disminuyendo la velocidad disminuyen caudal y presión de impulsión. Al disminuir la velocidad disminuye el consumo, por lo que la bomba estará consumiendo la energía necesaria para impulsar el caudal de proceso. (Acedo, 2007, p. 396).



El control se puede llevar a cabo por medio de turbinas de vapor o motores eléctricos con variador de velocidad. La **Figura 37** muestra que, con la instalación de un variador de velocidad, no existe ninguna válvula que ocasione pérdida de carga adicional en el circuito, haciendo de esta manera que el consumo eléctrico del motor disminuya. (Acedo, 2007, p. 396).



### Tarifas Eléctricas COOPESANTOS R.L

Ver **Anexo E**, donde se muestra una tabla con las tarifas eléctricas presentadas por COOPESANTOS R.L, entidad que brinda el servicio eléctrico en la Zona donde se ubica el Beneficio de Palmichal CECA S.A.

### Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN)

#### Cálculo de la TIR

De acuerdo con lo expuesto por Allen, Brealey y Myers (2010), en su libro Principios de Finanzas Corporativas: “La tasa interna de rendimiento se define como la tasa de descuento a la cual  $VPN = 0$ . Esto significa que para encontrar la TIR de un proyecto de inversión que dure  $T$  años, debemos despejar la TIR de la expresión siguiente”, ver **Ecuación 24**. (p. 122).

#### **Ecuación 24. Cálculo de la TIR**

$$VPN = C_0 + \frac{C_1}{1 + TIR} + \frac{C_2}{(1 + TIR)^2} + \dots + \frac{C_T}{(1 + TIR)^T} = 0 \quad (24)$$

**Fuente:** Allen *et al.* (2010)

Como complemento al concepto anterior en dicho libro indican que: “Para calcular la TIR, se sigue el método de prueba y error. Adicionalmente exponen el siguiente ejemplo, considerando un proyecto que genere los siguiente flujos, ver **Tabla 3**.”

**Tabla 3. Ejemplo flujos de efectivo.**

Flujos de efectivo dólares		
C <sub>0</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>
- 4 000	+ 2 000	+ 4 000

Fuente: Allen *et al.* (2010)

La tasa interna de rendimiento es la TIR en la **Ecuación 25**:

**Ecuación 25. Ejemplo cálculo de la TIR**

$$VPN = -4\,000 + \frac{2\,000}{1 + TIR} + \frac{4\,000}{(1 + TIR)^2} = 0 \quad (25)$$

Fuente: Allen *et al.* (2010)

En algunas ocasiones las personas confunden la tasa interna de rendimiento con el costo de oportunidad del capital, porque los dos entran como tasas de descuento en la fórmula VPN. La tasa interna de rendimiento es una medida de rentabilidad que depende únicamente de la cantidad y los plazos de los flujos de efectivo. El costo de oportunidad del capital es un estándar de rentabilidad que se emplea para calcular cuánto vale el proyecto. El costo de oportunidad del capital se establece en los mercados capitales y corresponde a la tasa de rendimiento esperada de otros activos que tienen el mismo nivel de riesgo que el proyecto sujeto a evaluación. (Allen *et al.*, 2010, p. 123).

**La regla de la TIR**

La siguiente definición fue expuesta por Allen *et al.* (2010):

La regla de la tasa interna de rendimiento consiste en aceptar un proyecto de inversión si el costo de oportunidad del capital es menor que la tasa interna de rendimiento. Por ejemplo, si el costo de oportunidad del capital es menor para una TIR de 28%, entonces el proyecto tiene un VPN positivo cuando se descuenta al costo de oportunidad del capital. Si es igual a la TIR, el proyecto tiene un VPN de cero, y si es mayor el proyecto tendrá un VPN negativo.

Por lo tanto, cuando comparamos el costo de oportunidad del capital con la TIR de nuestro proyecto, en realidad preguntamos si el proyecto tiene un VPN positivo, y así ocurre en todos los casos: la regla siempre dará la misma respuesta que la regla del valor presente neto si el VPN de un proyecto es una función de la tasa de descuento que decrece suavemente. (pp. 123-124).

### **Cálculo del valor actual neto (VAN)**

El valor actual neto se puede definir en pocas palabras como un indicador de evaluación de la factibilidad del proyecto. Se conoce también como el valor actualizado neto o valor presente neto por sus siglas en inglés (Net Present Value), donde su acrónimo es VAN y en inglés según lo anterior NPV. Básicamente, el VAN corresponde al valor futuro del dinero que va a recibir el proyecto en diferentes periodos, recuperando las inversiones realizadas y, por consiguiente, cubriendo los costos de producción y obteniendo utilidades o ganancias.

Cuando el valor actual de neto es positivo o mayor que cero, es equivalente a decir que los beneficios generados de un proyecto son superiores a los costos incurridos por el mismo. Dicho de una forma más sencilla, una vez costeadas las obligaciones del proyecto, queda un saldo favorable para el inversionista, permitiendo ser aceptado el proyecto para su posterior ejecución.

Para hallar el valor presente neto, primero se debe calcular su valor presente. Se descuenta el flujo de efectivo futuro con una tasa adecuada  $r$ , que generalmente se conoce como tasa de descuento, tasa mínima aceptable, o costo de oportunidad del capital, ver **Ecuación 26**. (Allen *et al.*, 2010, p. 29):

#### **Ecuación 26. Valor presente (VP)**

$$\text{Valor presente (VP)} = \frac{C_1}{1+r} \quad (26)$$

**Fuente:** (Allen *et al.*, 2010)

El valor presente neto es el valor presente menos cualquier flujo de efectivo inmediato, ver

#### **Ecuación 27:**

#### **Ecuación 27. Valor presente neto (VPN)**

$$\text{Valor presente neto (VPN)} = C_0 + \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r_2)^2} + \frac{C_3}{(1+r_3)^3} + \dots \quad (27)$$

**Fuente:** (Allen *et al.*, 2010)

Recuerde que  $C_0$  es negativa si el flujo de efectivo inmediato es una inversión, es decir, una salida de flujo de efectivo. (Allen *et al.*, 2010, p. 30).

En relación con lo anterior la fórmula básica del valor presente de un activo que paga en varios periodos es la siguiente extensión obvia de la fórmula correspondiente a un periodo, ver **Ecuación 28.** (Allen *et al.*, 2010, p. 53):

**Ecuación 28. Valor presente (VP) para varios periodos**

$$\text{Valor presente (VP)} = \frac{C_1}{1+r} + \frac{C_2}{(1+r_2)^2} + \dots \quad (28)$$

**Fuente:** (Allen *et al.*, Principios de Finanzas Corporativas Novena Edición, 2010)

### **CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO**

Balestrini (2006), indica que el marco metodológico es aquel conjunto de procedimientos lógicos, tecno-operacionales implícitos en todo proceso de investigación, con el objeto de ponerlos de manifiesto y sistematizarlos; a propósito de permitir descubrir y analizar los supuestos del estudio y de reconstruir los datos, a partir de los conceptos teóricos convencionalmente operacionalizados. (p.125). Dicho de otra forma, corresponde a aquella estructura implementada de manera organizada para recolectar, ordenar y finalmente analizar la información, permitiendo así, llevar a cabo la interpretación de los resultados de acuerdo con el problema que se investiga.

#### **Enfoque de la investigación**

El presente proyecto se desarrollará con base al enfoque cuantitativo no experimental, ya que, a partir de los objetivos y problema de la investigación inicialmente planteados y según las características, necesidades o bien naturaleza del presente proyecto de investigación, se determina que dicho enfoque es el que mejor se ajusta de acuerdo con lo indicado y se cuenta con un sustento teórico suficiente que permite la implementación de este.

Hernández, Fernández y Baptista (2014, p. 4), caracterizan al enfoque cuantitativo como secuencial y probatorio, e indican que cada etapa precede a la siguiente y no se puede brincar o eludir pasos. También exponen que este utiliza la recolección de datos para probar hipótesis con base en la medición numérica y el análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y probar teorías.

Según lo anterior, se implementará en la recolección de datos, tanto en literatura como en campo, cálculos y análisis energéticos, dimensionamiento del sistema de acuerdo con los requerimientos obtenidos en la memoria de cálculo, además, en la selección de tecnología según lo disponible en el mercado, que permita un adecuado funcionamiento de acuerdo con las condiciones de operación en las cuales se someterá el sistema.

## **Método de la investigación**

Existen distintas formas de clasificar un proyecto de investigación, ya sea por sus características, objetivos, área de aplicación o bien enfoque dado a este. En el caso del Señor Carlos Muñoz Razo, explica que es posible clasificar una tesis en tres tipos diferentes, según la naturaleza del método de investigación y las técnicas de recopilación que se implementarán para la obtención de información.

### **Tesis de investigación documental (teórica)**

Son aquellos trabajos en los cuales el método de investigación se concentra en la recopilación de datos documentales, que se obtienen de libros, textos, apuntes, revistas, sitios Web, o bien de documentos gráficos, icnográficos y electrónicos. (Muñoz, 2011, p. 14).

### **Tesis de investigación de campo (práctico)**

Para este caso se refiere a aquellos trabajos donde la recopilación de información se lleva a cabo en el ambiente específico que presenta el hecho o fenómeno de estudio. (Muñoz, 2011, p. 14).

### **Tesis combinada (investigación documental y de campo)**

En esta ocasión son aquellas investigaciones donde la recopilación y análisis de datos se dan de forma conjunta entre la investigación documental con la de campo. (Muñoz, 2011, p. 14). Una vez explicados los conceptos anteriores, es posible afirmar que este proyecto está relacionado, por un lado, con el tipo documental, y por otro, con el tipo de campo, ya que en un principio se realizó una serie recopilación de datos en campo a través de funcionarios (gerente de planta, entre otros) y a partir de observaciones sobre el equipo utilizado en el sistema de secado de café actual (en el Beneficio de Palmichal CECA S.A); acto seguido se obtuvieron datos documentales de distintas fuentes, como también de bases datos, como lo es PVGIS, por consiguiente es claro que corresponde una tesis combinada.

De esta forma se obtuvo una serie de datos en campo, los cuales fueron complementados y respaldados con investigación documental, logrando un punto de partida fidedigno para el proyecto. Una vez que se obtuvo la información relacionada con parámetros y requerimientos para el secado correcto del grano de café, se procedió a realizar la memoria de cálculo con la cual se obtuvo los requerimientos energéticos en cada etapa del sistema (flujo de aire requerido según la cantidad a secar de granos de café y en el tiempo establecido, enfriamiento con deshumidificación del aire atmosférico, calentamiento sin deshumidificación del aire).

Seguidamente, se concretó el dimensionamiento y selección del equipo de acuerdo con la demanda energética en cada etapa del sistema y la oferta disponible en el mercado, haciendo referencia al ventilador, batería de enfriamiento para la etapa de deshumidificación del aire, tipo y cantidad de colectores solares, secadora de café tipo guardiola. Una vez seleccionado el tipo de equipo de acuerdo con los requerimientos energéticos y demás, se continuó con la propuesta de control automático para el sistema de secado.

En la etapa de deshumidificación del aire, se logra a partir del equipo seleccionado, ya que este, por la naturaleza de su funcionamiento, cuenta con un controlador que permite modificar una serie de parámetros, tanto del ventilador como del equipo de enfriamiento. Por otra parte, se propone un método de control para la etapa del calentamiento del aire sin entrar en el diseño de esta, pero si con una base de argumentos, consideraciones y esquema de su funcionamiento que, eventualmente, permitirá, con criterios ingenieriles, el diseño de esta.

Finalmente, se realizó el análisis financiero del proyecto, con el fin de determinar su viabilidad en caso de llevar a cabo su implementación.

### **Fuentes de información**

Durante el proceso de elaboración del presente proyecto se utilizaron variadas fuentes de información, las cuales dieron un aporte significativo en las distintas áreas investigadas y relacionadas al proyecto, logrando así un correcto entendimiento, interpretación, desarrollo y finalización de cada una de las etapas de este. A continuación, en la **Tabla 4** se mencionan las fuentes consultadas durante el proceso.

**Tabla 4. Fuentes de información.**

Fuente	Comentario
Beneficio de Palmichal CECA S.A	En relación con el proceso de secado de café (parámetros, requerimientos, equipos utilizados, entre otros).
Ingenieros expertos y especialistas	Conocimiento práctico en áreas como energía termosolar, procesos termodinámicos, equipos

		relacionados al acondicionamiento de aire para procesos industriales, sistemas de control automático.
Universidades nacionales e internacionales		Con relación a proyectos de esta índole (secado de granos) desarrollados en dichas instituciones, en los cuales se buscó información de valor referente a la investigación en proceso.
Fuente		Comentario
Base de datos: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)		Utilizada para la obtención de datos tales como radiación solar, condiciones climáticas promedio del punto o ubicación geográfica en investigación, los cuales fueron indispensables para el análisis energético y su memoria de cálculo.
Software psicrométrico Daikin		Herramienta para el cálculo de procesos psicrométricos de la empresa japonesa Daikin Industries, Ltd.
ICAFE		En relación con el proceso de secado de café (parámetros, requerimientos, equipos utilizados, entre otros).
CENICAFE		En relación con el proceso de secado de café (parámetros, requerimientos, equipos utilizados, entre otros).
MAG		Buenas prácticas en el procesamiento del café mediante beneficiado húmedo.
Literatura sobre termodinámica (Cengel, Y., & Boles, M. <i>Termodinámica</i> , en su quinta y séptima edición).		Fundamentales para el desarrollo de los cálculos energéticos y procesos termodinámicos en las etapas del sistema que estaban involucrados.

Empresas proveedoras y/o fabricantes de equipo relacionado al proyecto.	Consulta, obtención de información relevante y asesoramiento.
Literatura sobre instrumentación y sistemas de control automático.	Fundamentales para la recolección de información relacionada con esta área de la ingeniería y así alcanzar la propuesta de control automático.
Google Earth	Determinar las dimensiones del Beneficio (Nave industrial)

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

### Variables o unidades de análisis

- Objetivo: Investigar los parámetros y requerimientos necesarios para un adecuado secado del grano de café según las exigencias del mercado.
  - Variable: temperatura máxima y humedad final.
  - Indicador: Se medirá la máxima temperatura en grados Celsius (°C) a la cual se puede someter al grano de café y la cantidad de humedad final requerida en el grano en porcentaje (bh %).
  - Definición Conceptual: Temperatura máxima a la que se puede someter los granos de café para lograr el correcto secado sin dañar sus propiedades organolépticas y el porcentaje de humedad en base húmeda que se requiere alcanzar en el grano de café que evita tanto el deterioro, como el cultivo de hongos y bacterias, permitiendo su debida comercialización.
  - Definición Operacional: Se harán visitas a la nave industrial de CECA S.A, donde se entrevistará al encargado de planta, el cual cuenta con amplia experiencia en el proceso de beneficio del café y así, también se observarán las condiciones en las que se opera el sistema que ellos implementan. Por otra parte, se complementará dicha información recolectada con investigación documental en instituciones como ICAFE, Cenicafé, entre otras.
  - Definición Instrumental: Preguntas específicas, interfaz gráfica disponible en la nave industrial que muestra datos como temperaturas en distintos puntos del sistema y estudios de dichas instituciones enfocados en la variables en cuestión.

- Objetivo: Realizar un estudio de la interacción entre la energía y las variables que mayor efecto tienen en esta etapa del beneficio del café.
  - Variable: Comportamiento del sistema.
  - Indicador: Se van a medir las distintas variables (Temperaturas, humedad absoluta, humedad relativa, entalpía, entre otras) en cada una de las etapas del sistema y energía solar disponible.
  - Definición Conceptual: Según la naturaleza del diseño en cada etapa interactúan estas variables, pero con magnitudes distintas, ya que las necesidades o función de cada una de ellas difiere, aun cuando el sistema es visto como un todo. Inicialmente, dichas variables están sujetas a las condiciones climáticas de la ubicación geográfica en estudio, al tomar de forma directa el aire atmosférico y la utilización de la radiación solar disponible.
  - Definición Operacional: Uso de la base de datos PVGIS, consulta de literatura sobre psicrometría, uso del software de psicrometría Daikin.
  - Definición Instrumental: Uso de los datos sobre radiación solar y condiciones climáticas geográficas que proporciona la plataforma de PVGIS, psicrometría de los diferentes procesos sobre acondicionamiento de aire que exponen los libros de Cengel, Y., & Boles, M. *Termodinámica*, en su quinta y séptima edición; además, la herramienta del Software psicrométrico de Daikin que permite relacionar distintos puntos de un sistema de esta naturaleza en la carta psicrométrica a partir de dos propiedades de entrada y así obtener otras variables de interés para diseñar y trazar el comportamiento del sistema.
- Objetivo: Dimensionar el sistema de tal modo que se logre un ambiente controlado de acuerdo con el análisis realizado y que, eventualmente, permita su adaptación a otros procesos de secado.
  - Variable: potencia (kW), flujo de aire (m<sup>3</sup>/h).
  - Indicador: Se medirán los requerimientos tanto de potencia en (kW) en cada una de las etapas del sistema, como el flujo de aire en (m<sup>3</sup>/h).
  - Definición Conceptual: Es aquella potencia en (kW) necesaria en cada una de las etapas de diseño del sistema (deshumidificación del aire atmosférico, calentamiento

del flujo de aire) y el flujo de aire que se requiere hacer pasar a través de la masa de café con dichas condiciones, para lograr su deshumidificación en el tiempo establecido, según el estudio realizado anteriormente.

- Definición Operacional: Literatura de Cengel, Y., & Boles, M. *Termodinámica*, en su quinta y séptima edición.
- Definición Instrumental: Uso de las ecuaciones y teorías que gobiernan los diferentes procesos de acondicionamiento de aire y la psicrometría que exponen los libros de Cengel, Y., & Boles, M. *Termodinámica*, en su quinta y séptima edición. Esto permitirá calcular los requerimientos de potencia en (kW), a partir de las variables psicrométricas ya obtenidas y a su vez el flujo de aire requerido, partiendo de conceptos de termodinámica.
- Objetivo: Emplear tecnologías que favorezcan un máximo aprovechamiento de la energía termosolar durante el proceso, así como el correcto ajuste según las condiciones en las cuales se va a operar el sistema.
  - Variable: Equipo requerido, control automático y viabilidad financiera.
  - Indicador: Características de los equipos disponibles en el mercado, soluciones de control automático y análisis financiero según la tecnología seleccionada.
  - Definición Conceptual: Equipo que cumple con la función requerida y se ajusta a las necesidades y exigencia de cada etapa del secador, propuesta del sistema de control automático que permita un mejor ajuste de acuerdo con las condiciones de trabajo. Así también, la viabilidad financiera según el equipo seleccionado.
  - Definición Operacional: Dimensiones de la nave industrial (Beneficio) de CECA S.A, equipo que ofrece el mercado, valores obtenidos en la memoria de cálculo, características de los sistemas seleccionados para cada etapa, condiciones de operación, costos de inversión.
  - Definición Instrumental: se debe analizar las dimensiones de la nave industrial con el fin de determinar el espacio disponible en este, tanto para el equipo como para una posible instalación de los colectores solares, una búsqueda exhaustiva del equipo que ofrece el mercado con el fin de dar la mejor solución, análisis de la memoria de cálculo obtenida anteriormente de manera simultánea con las fichas

técnicas del equipo disponible en el mercado. De acuerdo con las características y funcionamiento del equipo seleccionado para cada etapa del secador y las condiciones de operación, se podrá realizar un análisis y proponer soluciones de control, seleccionando la que mejor se adapte. Por último, determinar la viabilidad económica de su implementación.

## **Instrumentos**

A lo largo del desarrollo de este proyecto se hizo uso de ciertos instrumentos para la recolección o bien obtención de aquella información indispensable para llevar a cabo con éxito la investigación. A continuación, se indican dichos recursos de investigación:

- Entrevistas en campo a expertos del secado de café, como lo es el encargado de planta en el Beneficio de CECA S.A, igualmente, a algunos de los funcionarios.
- Manuales sobre el proceso, parámetros, requerimientos y equipo del secado de café de instituciones como: Instituto del Café de Costa Rica (ICAFE), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Centro Nacional de Investigación de Café (Cenicafé).
- Trabajos de investigación en los cuales se desarrollaron temas relacionados al del presente proyecto y los cuales fueron desarrollados en universidades nacionales; tales como la Universidad de Costa Rica (UCR), Tecnológico de Costa Rica (TEC) y a su vez en algunas internacionales, como lo es la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Asesoría con ingenieros expertos en los distintos temas relacionados a la investigación.
- Base de datos de la Unión Europea PVGIS, por sus siglas en inglés (Photovoltaic Geographical Information System).
- Consulta y uso de literatura relacionada a las distintas áreas de la ingeniería y sus aplicaciones, relacionadas directamente con la naturaleza del proyecto.
- Fichas técnicas de equipos requeridos, consultadas en empresas como Grupo Leahó, Beirut, Condair, Fisair, fabricantes ubicados en China, entre otros.

### **Proceso para la recolección y análisis de datos**

Primeramente, se va a coordinar una visita al Beneficio de Palmichal CECA S.A, esto para conocer la nave industrial, algunos integrantes del personal a cargo y realizar una serie de preguntas al gerente de planta, con el fin de ampliar el conocimiento del cómo funciona el proceso de beneficiado de café.

Una vez realizada la visita al Beneficio, se iniciará una investigación del proceso de beneficiado de café, esto con el fin de conocer más sobre el proceso en general y, desde luego, enfatizando en la etapa de secado del grano, donde estará basado el proyecto. En dicha investigación se buscará recopilar y documentar toda aquella información fundamental para alcanzar un correcto secado de los granos de café, tales como parámetros, requerimientos, buenas prácticas, equipos utilizados y su funcionamiento.

En este punto es importante mencionar que algunos de los parámetros más relevantes a determinar son: humedad promedio inicial en el grano de café, humedad final requerida en el grano de café para su adecuada conservación, temperatura y tiempo máximo de secado recomendado, entre otros. Todo lo anterior se obtendrá de fuentes de información como ICAFE, MAG, Cenicafé y de proyectos desarrollados en universidades tanto nacionales (UCR, TEC), como internacionales (UNAM) que estén relacionados al tema de sistemas de secado de café.

Seguidamente, se coordinará por segunda vez, una visita al Beneficio, pero en acompañamiento con el tutor de tesis; en esta ocasión se pretende complementar la información investigada, determinar condiciones que se podrían mejorar y aclarar cualquier duda en caso de que se genere alguna con respecto al proceso de secado, con información de campo a través del gerente de planta y asimismo, al observar el equipo de secado en funcionamiento.

El paso a seguir una vez que se establecen los fundamentos para lograr un correcto secado de granos de café, será la determinación de la cantidad de humedad a retirar, necesaria de acuerdo con la carga de café que se vaya a tomar como muestra de análisis. Para esta etapa se utilizarán los métodos de cálculo de humedad recomendados en manuales de instituciones como el ICAFE y Cenicafé. Es necesario indicar que para efectuar los cálculos requeridos en cada etapa del proyecto se utilizará el programa informático Excel de Microsoft Corporation.

Posteriormente, se utilizará la base de datos de la Unión Europea PVGIS, con el fin de obtener la series climáticas correspondientes a la ubicación geográfica del Beneficio de CECA S.A,

esto para caracterizar sus condiciones promedio tales como: temperatura media  $T_m$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), humedad relativa  $\phi$  (%). Estas variables permitirán dar inicio al análisis psicrométrico.

Una vez determinadas las variables anteriormente mencionadas, se dará continuación con el análisis psicrométrico por medio de la herramienta para cálculos de procesos psicrométricos de la empresa japonesa Daikin Industries, Ltd., la temperatura media y la humedad relativa obtenidas de la base de datos PVGIS serán las dos variables de entrada a la carta psicrométrica. Básicamente, dichas variables corresponderán a las condiciones o características promedio del aire atmosférico del presente sitio.

Luego, de igual manera, haciendo uso de la herramienta Daikin y literatura sobre termodinámica, se trazará cada uno de los puntos de acondicionamiento del aire hasta llevarlo a las condiciones requeridas con las cuales se hará pasar a través de los granos de café. En esta etapa se considerarán algunos parámetros obtenidos durante la etapa de investigación, para ser específicos, la temperatura máxima a la cual se puede someter el grano de café. Se deberán determinar las condiciones exigidas en cada punto de la carta psicrométrica para lograr el proceso de enfriamiento del aire con deshumidificación, calentamiento simple y finalmente la humidificación adiabática del aire (etapa donde se retira la humedad de los granos de café).

Llegado a este punto, se hará uso de la teoría y ecuaciones que expone el libro de termodinámica Cengel, Y., & Boles, M. *Termodinámica*, para calcular la potencia requerida en kW, esto en la etapa de enfriamiento con deshumidificación del aire, calentamiento simple del aire sin deshumidificación, asimismo, el flujo de aire en ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) que se requiere hacer pasar a través del café con las condiciones ya establecidas. Además, otras variables necesarias en cada uno de los puntos de la carta psicrométrica como el proceso de humidificación adiabática del aire.

Ahora bien, con los valores obtenidos en el punto anterior será posible seleccionar el equipo según los requerimientos calculados para cada uno de los procesos, refiérase a la deshumidificación del aire de acuerdo con la potencia de refrigeración en (kW) y el flujo de aire en ( $\text{m}^3/\text{h}$ ), ventilador basado en la cantidad de flujo de aire en ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) y la cantidad de colectores solares conformes con la potencia de calefacción en (kW). Para este último proceso, primeramente, se deberá determinar cuál es la cantidad de energía termosolar disponible en función a la ubicación geográfica del beneficio, a partir de las series climáticas extraídas de la base de datos PVGIS.

Posterior a analizar cuál es la energía disponible en la ubicación correspondiente, se podrá seleccionar el modelo de colectores solares requerido y también la cantidad que, eventualmente, se podrían instalar con base a las dimensiones de la nave industrial. Una vez finalizado lo anterior, se podrá continuar con la propuesta del sistema de control automático, ya que, en este punto, se contará tanto con las condiciones de operación del secador como con las características de funcionamiento del equipo seleccionado, lo que permitirá analizar opciones de control de acuerdo con lo anteriormente dicho y dar la mejor solución.

Finalmente, llevado a cabo las distintas etapas de diseño anteriores, se procederá a realizar el análisis financiero del proyecto, esto con la finalidad de determinar si, eventualmente, sería viable su implementación.

## CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LA INVESTIGACIÓN

### Descripción de la empresa

El Beneficio de Palmichal CECA S.A., que pertenece a Neumann Kaffee Gruppe de Alemania y el cual está ubicado en Palmichal de Acosta, San José (ver **Figura 38**), se dedica desde 1950 al negocio nacional e internacional del café costarricense. Además de su negocio principal de exportación, CECA opera un molino húmedo en la región de Tarrazú, así como un micro-molino especializado. La actividad de beneficiado la realizan por temporadas, de acuerdo con los meses de cosecha del café en el país, acorde a la zona y siendo específicos, en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo.

**Figura 38. Captura satelital: Ubicación Beneficio de Palmichal CECA S.A.**



**Fuente:** Google Earth, (s.f)

## Definición del diseño

Se aspira a diseñar un sistema idóneo para el secado de granos de café partiendo de los parámetros y requerimientos de dicha actividad industrial, para la posterior comercialización del producto final, a partir de la implementación de nuevas tecnologías, incluyendo las energías renovables. La propuesta de diseño dependerá de la tecnología disponible en el mercado que mejor se ajuste, conforme a las condiciones y requerimientos energéticos obtenidos a partir del estudio realizado.

## Desarrollo

### Determinación de los parámetros y requerimientos del correcto secado de café.

A partir de la investigación documental y en campo, como está evidenciada en la sección **procesos de beneficiado del café y etapa de secado del grano de café** del marco referencial, se expone la información necesaria para entender el proceso de beneficiado de café, principalmente los estándares exigidos en el mercado para el correcto secado de los granos del café. A continuación se exponen a continuación de forma resumida, ya que representan la base para dar inicio al estudio (ver **Tabla 5**).

**Tabla 5. % Humedad en base húmeda del café pergamino.**

%humedad en base húmeda del café pergamino	
$\%h_{\text{inicial promedio}}$	$\%h_{\text{final requerida}}$
(55-50)%	(10-12)%
Seleccionada	
50%	10%

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

La **Tabla 5** muestra el rango de % de humedad inicial promedio en el café pergamino antes de ser sometido a la etapa de secado y el rango % de humedad final requerida o aceptado en el café para su conservación y comercialización, posterior a ser sometido a la etapa de secado, también así, el % de humedad seleccionado inicial como el final para la presente investigación, ambos valores en base húmeda.

Por otra parte, la **Tabla 6** indica la muestra en Kg biomasa húmeda de café tomada para el estudio, basándose en la capacidad de carga de cada una de las guardiolas utilizadas en el Beneficio de

Palmichal y la equivalencia de quintales (qq) en kg de café pergamino, para una cantidad final de café pergamino húmedo a secar de 2760 Kg biomasa húmeda.

<b>Tabla 6. Carga de café pergamino húmedo a secar.</b>	
<b>Carga de café pergamino húmedo a secar</b>	
1qq a kg	46
Carga en Quintales (qq)	60
Kg <sub>biomasa húmeda</sub>	2760

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

A continuación, en la **Tabla 7** se muestra la cantidad de kg<sub>agua</sub> y kg<sub>biomasa seca</sub> que conforman la carga de 2760 kg<sub>biomasa húmeda</sub>, también así los kg<sub>agua final</sub> requeridos en la carga y los kg<sub>agua a extraer</sub> de esta, por último, la relación kg<sub>agua a extraer</sub> por cada kg<sub>biomasa húmeda</sub>. Donde se utilizó la **Ecuación 1** para realizar los respectivos cálculos, como se presenta a continuación:

- Cálculo del peso de agua inicial:

$$\text{Humedad en base húmeda (bh)} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{peso de producto}} \cdot 100$$

$$\text{peso de agua} = \frac{\text{peso de producto} \cdot \text{Humedad (bh)\%}}{100}$$

$$\text{peso de agua inicial (kg}_{\text{agua}}) = \frac{2760 \cdot 50\%}{100} = 1380$$

- Cálculo del peso de agua final:

$$\text{Humedad en base húmeda (bh)} = \frac{\text{peso de agua}}{\text{kg}_{\text{bio-seca}} + \text{peso de agua}} \cdot 100$$

$$(\text{kg}_{\text{bio-seca}} + \text{peso de agua}) \cdot \text{Húmeda (bh)\%} = \text{peso de agua} \cdot 100$$

$$\text{peso de agua (kg)} = \frac{(\text{kg}_{\text{bio-seca}}) \cdot \text{Húmeda (bh)\%}}{(100 - \text{Húmeda (bh)\%})}$$

$$\text{peso de agua final (kg}_{\text{agua}}) = \frac{1380 \cdot 10}{(100 - 10)} = 153$$

Donde los  $\text{kg}_{\text{agua a extraer}}$  corresponde a la diferencia entre peso de agua inicial y peso de agua final, como se muestra seguidamente:

$$\text{kg}_{\text{agua a extraer}} = 1380 - 153 = 1227$$

Finalmente, se calculó la relación de  $\text{kg}_{\text{agua a extraer}}$  por  $\text{kg}_{\text{biomasa húmeda}}$ :

$$\text{kg}_{\text{agua a extraer}} / \text{kg}_{\text{biomasa húmeda}} = \frac{1227}{2760} = 0.44$$

**Tabla 7. Cantidad de humedad a extraer de la carga.**

Cantidad de humedad (agua) a extraer de la carga	
$\text{Kg}_{\text{agua inicial}}$	1380
$\text{Kg}_{\text{biomasa seca}}$	1380
$\text{Kg}_{\text{agua final}}$	153
$\text{kg}_{\text{agua a extraer}}$	1227
$\text{kg}_{\text{agua a extraer}} / \text{Kg}_{\text{biomasa húmeda}}$	0.44

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 8** se indican las temperaturas máximas a las cuales se pueden someter el grano de café sin dañar sus propiedades organolépticas, como bien lo indica la **Figura 3. Límites seguros, según temperatura y tiempo.**

**Tabla 8. Temperatura máxima a la cual se puede someter el grano de café.**

Temperatura máxima (°C)
40
50
60

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

### **Análisis psicrométrico.**

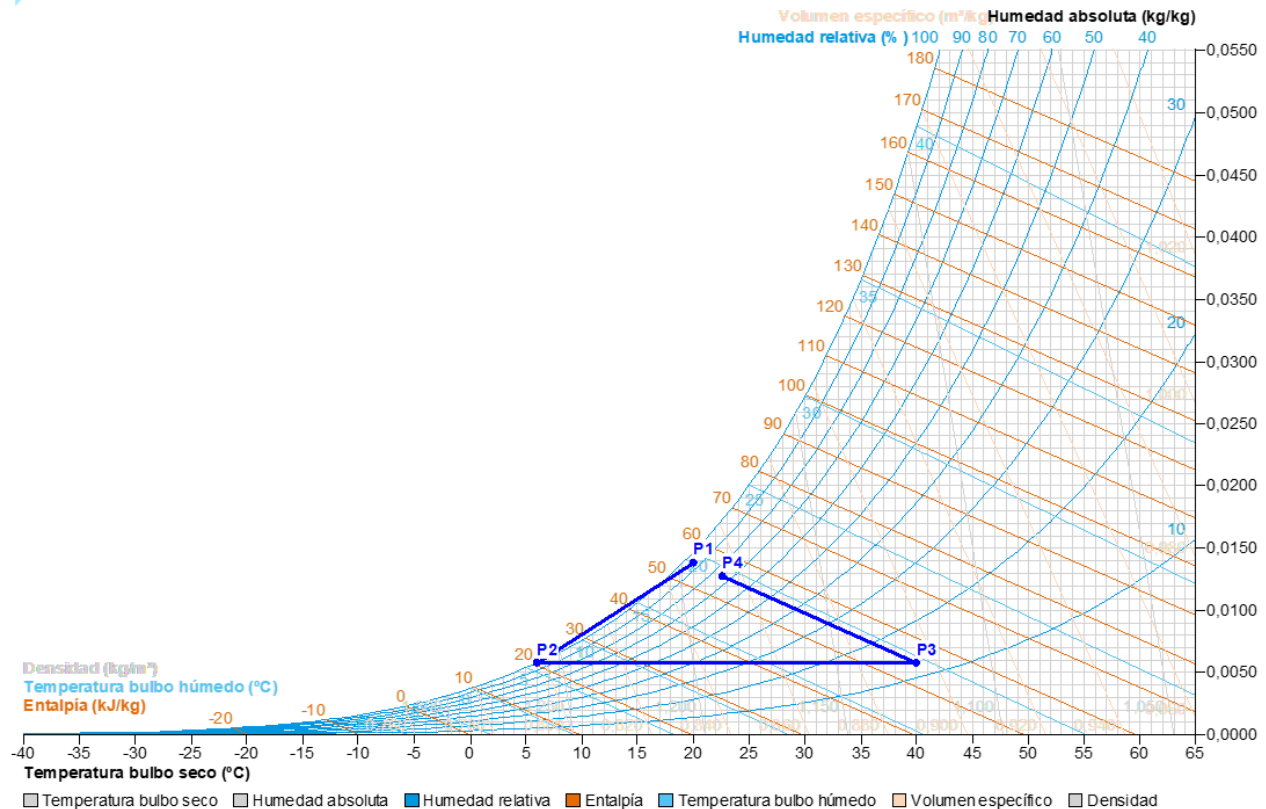
En este apartado se van a desarrollar los cálculos de **psicrometría**, análisis que permitirá relacionar cada uno de los puntos del proceso que realizará el sistema de secado de café, desde el acondicionamiento del aire (**Deshumidificación del aire y calentamiento simple ( $\omega$ =constante)**), hasta la etapa (**Enfriamiento evaporativo o humidificación adiabática**), punto en el cual el aire entra en contacto con el café y este último pierde la humedad.

Es conveniente resaltar que el análisis psicrométrico básicamente describe el comportamiento del aire producto de cada etapa al cual es sometido para alcanzar las condiciones requeridas en el proceso de secado, incluso hasta el momento que pasa a través de los granos de café al ir a alta temperatura, causa la evaporación de la humedad del café y la arrastra. A raíz de lo anterior, primeramente, se estableció la cantidad de humedad al extraer del café y con base en esto, se acondiciona el aire.

Importante aclarar que dichos cálculos es posible realizarlos a partir de la serie de ecuaciones planteadas en el apartado **Principios de la Psicrometría, acondicionamiento del aire y sus aplicaciones.**, pero, para efectos de estudios y diseños de ingeniería es común el uso softwares que permiten a partir de **cartas psicrométricas** realizar análisis de climatización, ya que, efectuarlos de manera manual se podría volver un poco engorroso. En este caso se utilizó el visor de diagramas psicrométricos de DAKIN.

A continuación, se mostrará la carta psicrométrica (ver **Gráfico 3**) que describe el funcionamiento del sistema de secado de café, posteriormente se desarrollarán los diversos puntos que relacionan cada una de las etapas del proceso.

**Gráfico 3. Carta psicrométrica: funcionamiento del sistema de secado.**



**Fuente:** Elaboración propia (software DAKIN, 2021)

Contar, al menos, con dos entradas o variables del aire del proceso en estudio es requisito para dar inicio al análisis energético a partir de la carta psicrométrica. En esta ocasión las variables utilizadas en el primer punto del proceso son las condiciones climáticas promedio del aire atmosférico de la región en cuestión y corresponden a la temperatura media  $T_{m1} = 20 \text{ °C}$  y la humedad relativa  $\phi_1 = 94.13 \%$  específicamente, obtenidas a través de la base de datos europea PVGIS, también así se establece la presión atmosférica  $P_{atm} = 101.325 \text{ kPa}$  de acuerdo con la elevación de la región en estudio (ver **Tabla 9**).

Con ambos valores se da inicio al estudio y se logra obtener las otras variables que son necesarias para relacionar el punto 1 con el punto 2, donde se da la deshumidificación del aire atmosférico.

**Tabla 9. Análisis psicrométrico: punto 1.**

Punto 1	
Temperatura media $T_{m1}$ (°C)	20
Humedad relativa $\phi_1$ (%)	94.13
Entalpía específica $h_1$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	55.2
Humedad absoluta $\omega_1$ (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>aire seco</sub> )	0.0138
Presión atmosférica P (kPa) @ 1115m elevación (cte para el proceso completo)	101.325
Volumen específico $v_1$ (m <sup>3</sup> /kg <sub>aire</sub> )	0.849

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Como se indicó anteriormente, en el punto (1-2) se da la etapa de **Deshumidificación del aire**, esto al someterlo a bajas temperaturas hasta alcanzar su punto de rocío, donde se logra que este pierda parte de su humedad. La finalidad de esta etapa del sistema de secado es aumentar la capacidad de absorción o de arrastre del aire de partículas de agua o humedad a la hora de tener contacto con los granos de café. A continuación, en la **Tabla 10** se presentan los valores requeridos en el punto 2 para alcanzar la deshumidificación del aire.

**Tabla 10. Análisis psicrométrico: punto 2.**

Punto 2	
Temperatura $T_2$ (°C) / "Depende de la capacidad del equipo seleccionado"	6
Humedad relativa $\phi_2$ (%)	100
Entalpía específica $h_2$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	20.6
Humedad absoluta $\omega_2$ (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>aire seco</sub> )	0.0058
Presión atmosférica $P_2$ (kPa)	101.325
Volumen específico $v_2$ (m <sup>3</sup> /kg <sub>aire</sub> )	0.798

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Con respecto a la tabla anterior, se someterá el aire a una temperatura  $T_2 = 6$  °C, donde se hará llegar al punto de rocío, por consiguiente, alcanzando una humedad relativa  $\phi_2 = 100\%$ , esto,

al disminuir su temperatura, ocasionando que se disminuya la capacidad de retener partículas de agua y pierda parte de la humedad que contiene, como se evidencia al comparar ( $\omega_1$  vs  $\omega_2$ ). Con las variables ( $T_2$  y  $\phi_2$ ) se define el punto dos, y de la misma forma al punto uno, se obtienen los valores de las otras variables al ingresar dichos datos en el programa de Daikin. Claramente la temperatura  $T_2$  depende de las capacidades de enfriamiento del equipo seleccionado para esta etapa del sistema.

Siguiendo con el proceso, se encuentra el **calentamiento simple ( $\omega$ =constante)**, esto en el punto (2-3), donde se pretende realizar dicho calentamiento a partir de la utilización de energía termosolar. En la **Tabla 11** se muestran los valores establecidos para el punto 3.

<b>Punto 3</b>	
Temperatura $T_3$ (°C) / "Temperatura que se busca alcanzar con energía termosolar"	40
Humedad relativa $\phi_3$ (%)	12.7
Entalpía específica $h_3$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	55.2
Humedad absoluta $\omega_3$ (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>aire seco</sub> )	0.0058
Presión atmosférica $P_3$ (kPa)	101.325
Densidad del aire $\rho_3$ (kg <sub>aire</sub> /m <sup>3</sup> )	1.123

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Es posible determinar el punto 3 a partir de las variables  $T_3= 40$  °C y  $\omega_3= 0.0058 \frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$ , donde  $T_3$  corresponde a la temperatura requerida en el aire para conseguir la evaporación de la humedad de los granos de café, esta se establece a partir de lo indicado en la **Tabla 8**. La humedad absoluta  $\omega_3$  se fija partiendo de las características propias del proceso que se da en el **punto 2-3, calentamiento simple ( $\omega$ =constante)**, por lo tanto, del punto 2 al 3 la humedad absoluta se mantiene constante o bien, se da un calentamiento sin la deshumidificación del aire.

Finalmente, se alcanza la última etapa del proceso de secado, el punto de 3 a 4, donde a partir del proceso termodinámico **enfriamiento evaporativo o humidificación adiabática**, se da la disminución de la temperatura del flujo de aire y el aumento de su humedad, por consiguiente, y el cual es el objetivo del secador de café, se logra la pérdida de la humedad en la carga de granos

de café y al mismo tiempo, el aumento de la temperatura en esta. A continuación, en la **Tabla 12**, se presentan las variables y sus valores en el punto 4.

<b>Tabla 12. Análisis psicrométrico: punto 4.</b>	
<b>Punto 4</b>	
Eficiencia del proceso de humidificación adiabática = $\eta = (T_3 - T_4)/(T_3 - T_{w4})$	85%
Temperatura de bulbo húmedo $\approx$ Temperatura del agua $T_{w4}$ (°C)	19.5
Temperatura $T_4$ (°C) / "Se obtiene a partir de la eficiencia del proceso de humidificación adiabática"	22.58
Humedad relativa $\phi_4$ (%)	79.3
Entalpía específica $h_4$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	55.2
Humedad absoluta $\omega_4$ (kg <sub>agua</sub> /kg <sub>aire seco</sub> )	0.0128
Presión atmosférica $P_4$ (kPa)	101.325
Volumen específico $v_4$ (m <sup>3</sup> /kg <sub>aire</sub> )	0.855

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

El punto 4 se establece a partir de la temperatura  $T_4 = 22.8$  °C y la entalpía específica  $h_4 = 55.2$  (kJ/kg<sub>aire</sub>). Según lo anterior  $T_4$  corresponde a la temperatura a la cual el aire sale después de pasar a través de los granos de café y es posible determinarla a partir de la eficiencia ( $\eta$  %) del proceso de humidificación adiabática. Un proceso real de humidificación adiabática no alcanza en general la saturación, por lo tanto, la eficiencia promedio de este tipo de procesos oscila entre el 85% y 90% y es posible expresarla para esta aplicación por medio de la **Ecuación 29**:

**Ecuación 29. Eficiencia del proceso de humidificación adiabática.**

$$\eta = \frac{\text{Enfriamiento del aire real}}{\text{Enfriamiento máximo del aire}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{w4}} * 100 \quad (29)$$

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

donde:

- $T_3$  = es la temperatura de entrada real del aire a la guardiola.
- $T_4$  = es la temperatura de salida real del aire de la guardiola.
- $T_{w4} = T_{bh4}$  = es la temperatura en la que el agua o humedad del café se evapora cuando se somete al fluido del aire caliente y equivale a la temperatura de bulbo húmedo en el punto 4, y es la temperatura más baja que el aire podría conseguir a la salida en la humidificación adiabática, en caso de ser un proceso ideal.

De acuerdo con lo anterior, es posible despejar la  $T_4$  de la **Ecuación 29**, ya que se cuenta con los otros valores de la ecuación. A partir de lo antes mencionado, se muestra, a continuación, el cálculo de la variable  $T_4$  una vez realizado el despeje respectivo:

$$\eta = \frac{\text{Enfriamiento del aire real}}{\text{Enfriamiento máximo del aire}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{w4}} * 100$$

$$T_4 = T_3 - \frac{\eta \cdot (T_3 - T_{w4})}{100} = 40 - \frac{85 \cdot (40 - 19,5)}{100} = 22.58 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Por último, la segunda variable de entrada “h” en el punto 4, corresponde al mismo valor de “h” en el punto 3, ya que el proceso de (3 – 4) es adiabático, lo mismo decir de entalpía específica constante, por lo tanto,  $h_3 = h_4$ .

En resumen, en el **punto1-2** se toma el aire atmosférico y se somete a bajas temperaturas utilizando un equipo de deshumidificación industrial, se hace llegar al punto de rocío logrando la pérdida de humedad en este; en el **punto2-3** el aire pasa por un intercambiador de calor, donde aumenta su temperatura haciendo uso de energía termosolar y mantiene la humedad absoluta constante; al finalizar la etapa del **punto1-2** y **punto2-3** se logra obtener un aire seco y caliente, lo que equivale a un aire con mayor capacidad de evaporar la humedad de los granos de café a partir del intercambio de calor o energía y adicionalmente, con una buena capacidad de arrastre del agua que es evaporada, esto al contener baja cantidad de kilogramos de agua por cada kilogramo de aire seco, en pocas palabras es un aire apto para el **punto3-4**, donde pasará por la carga de café para realizar el secado de esta.

### Cálculo de requerimientos energéticos y flujo de aire.

Una vez finalizado el análisis psicrométrico, se procede a realizar los cálculos para determinar los requerimientos energéticos en la etapa de enfriamiento y calentamiento para lograr el acondicionamiento del aire, también así la cantidad de flujo de aire que debe pasar a través del café para alcanzar el secado de este en un determinado tiempo.

Según lo anterior, en la **Tabla 13** se muestra el cálculo de la masa de aire requerida en la etapa (3-4) para lograr el secado de café.

**Tabla 13. Masa de aire requerida en la etapa (3-4), para el secado del café.**

Masa de aire requerida en el secado de acuerdo a la carga de café (Punto 3 - 4)	
$Kg_{biomasa\ húmeda}$	2760
$(kg_{agua\ a\ extraer} / Kg_{biomasa\ húmeda}) = m_f$	0.44
$\omega_3 (kg_{agua}/kg_{aire\ seco})$	0.0058
Densidad del aire $\rho_3 (kg_{aire}/m^3)$	1.12
$\omega_4 (kg_{agua}/kg_{aire\ seco})$	0.0128
$m_a (kg_{aire\ seco}/Kg_{biomasa\ húmeda})$	63.49
$m_a\ total (kg_{aire\ seco})$	175238.10

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Como se observa, los 5 primeros valores de la **Tabla 13** corresponden a valores anteriormente calculados en las **Tabla 6**, **Tabla 7**, **Tabla 11** y **Tabla 12** respectivamente. Una vez obtenidos dichos valores, se calcula a partir de la **Ecuación 22**, la masa de aire requerida ( $m_a$ ) en  $kg_{aire\ seco}$  por cada  $kg_{biomasa\ húmeda}$ . Seguidamente se calculó con la relación de la **Ecuación 30**, la  **$m_a$  total** necesaria para secar la carga total de 2760  $kg_{biomasa\ húmeda}$  de café.

#### **Ecuación 30. Cálculo de la masa de aire total requerida.**

$$m_{a\ total} = \left( \frac{kg_{aire\ seco}}{kg_{biomasa\ húmeda}} \right) * (kg_{biomasa\ húmeda}) \quad (30)$$

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

A continuación, se muestra el cálculo de los valores anteriormente mencionados:

- Cálculo de la masa de aire requerida ( $m_a$ ) en  $\text{kg}_{\text{aire seco}}$  por cada  $\text{kg}_{\text{biomasa húmeda}}$ :

$$\dot{m}_a \omega_3 + \dot{m}_f = \dot{m}_a \omega_4$$

$$m_a = \frac{m_f}{\omega_4 - \omega_3} = \frac{0,44}{0,0128 - 0,0058} = 63,49$$

- Cálculo de  $m_a$  total para secar la carga de café:

$$m_{a \text{ total}} = \left( \frac{\text{kg}_{\text{aire seco}}}{\text{kg}_{\text{biomasa húmeda}}} \right) * (\text{kg}_{\text{biomasa húmeda}})$$

$$m_{a \text{ total}} = 63.49 \cdot 2760 = 175\,238.10$$

Posteriormente fue posible calcular el flujo volumétrico de aire requerido en el secado a partir de la **Ecuación 13** y con el valor de la densidad del aire en el punto 3, esto de acuerdo con el flujo másico calculado con la **Ecuación 31** para un tiempo de secado de (24 y 8) horas.

**Ecuación 31. Cálculo del flujo másico.**

$$\dot{m} = \frac{m_{a \text{ total}}}{\text{Tiempo de secado}} \left( \frac{\text{kg}_{\text{aire seco}}}{h} \right)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

**Tabla 14. Cálculo del flujo volumétrico de aire seco requerido para un tiempo determinado de secado.**

Flujo volumétrico de aire requerido en el secado de acuerdo a la carga de café (Punto 3 - 4)		
Tiempo de secado (h)	24	8
$\dot{m}$ ( $\text{kg}_{\text{aire seco}}/\text{h}$ )	7302	21905
$\dot{V}_a \text{ total}$ ( $\text{m}^3_{\text{aire seco}}/\text{h}$ )	6502	19506

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Seguidamente, se demuestra el cálculo de los valores anteriormente indicados:

- Cálculo del flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{m_{a \text{ total}}}{\text{Tiempo de secado}} \left( \frac{\text{kg aire seco}}{h} \right)$$

$$\dot{m} = \frac{175\,238.10}{8} = 21\,905$$

- Cálculo del flujo volumétrico de aire requerido en el secado:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\dot{V}_{a \text{ total}} = \frac{21\,905}{1.12} = 19\,506$$

Para efectos de la investigación se selecciona el flujo másico del aire para un tiempo de secado de 8 horas, dicho esto, en la **Tabla 15** se presenta el flujo másico de aire en  $\text{kg}_{\text{aire seco}}/\text{h}$  y en  $\text{kg}_{\text{aire seco}}/\text{s}$ . Este equivale al flujo másico a deshumidificar para llevar a cabo el proceso de secado.

<b>Tabla 15. Flujo másico a deshumidificar.</b>		
<b>Flujo másico a deshumidificar</b>		
$\dot{m}$	kg/h	kg/s
	21905	6

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 16** se muestra el valor obtenido en el cálculo de la potencia de enfriamiento  $\dot{Q}_{1-2}$  requerida para la etapa de enfriamiento del aire con deshumidificación, el cual se obtuvo a partir de la **Ecuación 20**, con el valor del flujo másico en  $\text{kg}_{\text{aire seco}}/\text{s}$  de la **Tabla 15** y con el valor de entalpías del **punto**<sub>1-2</sub> mostrado en la **Tabla 16**. En otras palabras, corresponde a la potencia de refrigeración que debe entregar el equipo de deshumidificación de aire para alcanzar las condiciones del punto 2. Seguidamente se muestra dicho cálculo:

- Cálculo de la potencia de enfriamiento requerida para la etapa de deshumidificación del aire:

$$\dot{Q}_{1-2} = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

$$\dot{Q}_{1-2} = 6 \cdot (55.2 - 20.6) = 211$$

**Tabla 16. Energía requerida, etapa de enfriamiento del aire con deshumidificación (1-2).**

Energía requerida en el enfriamiento del aire con deshumidificación (1 - 2)	
$h_1$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	55.2
$h_2$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	20.6
$\dot{Q}_{1-2}$ (kW)	211

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Para ir finalizando este apartado de requerimientos energéticos, en la **Tabla 17** se presenta el cálculo de la potencia de calefacción  $\dot{Q}_{2-3}$  requerida para la etapa de calentamiento del aire sin deshumidificación, donde dicho valor se obtuvo a partir de la **Ecuación 17**, con el valor del flujo másico en kg<sub>aire seco</sub>/s de la **Tabla 15** y con el valor de entalpías del **punto 2-3** mostrado en la **Tabla 17**. Este valor representa la potencia de calefacción termosolar que debe entregar el arreglo o sistema de colectores solares de tubos al vacío, para alcanzar las condiciones del punto 3. Seguidamente se muestra dicho cálculo:

- Cálculo de la potencia de calefacción requerida para la etapa de calentamiento del aire sin deshumidificación:

$$\dot{Q}_{2-3} = \dot{m}(h_3 - h_2)$$

$$\dot{Q}_{2-3} = 6 \cdot (55.2 - 20.6) = 211$$

**Tabla 17. Potencia termosolar requerida, etapa de calentamiento del aire sin deshumidificación.**

Energía requerida en el calentamiento del aire sin deshumidificación (2 - 3)	
$h_2$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	20.6
$h_3$ (kJ/kg <sub>aire</sub> )	55.2
$\dot{Q}_{2-3}$ (kW)	211
$\dot{Q}_{2-3}$ (kJ/h)	757905
1 kJ=	1 kW <sub>s</sub>
Potencia de calefacción (kWh/h)	211

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

#### **Selección de equipo (etapa de deshumidificación del aire).**

De acuerdo con los requerimientos energéticos obtenidos en el cálculo de la etapa de deshumidificación del aire (ver **Tabla 16**), se procede a realizar la búsqueda del equipo que entregue dicha potencia de enfriamiento, considerando que se realizó el estudio partiendo sobre la base de que el proceso de deshumidificación se llevará a cabo a partir de la condensación del agua en el flujo de aire.

Dicho lo anterior, con los valores de  $\dot{Q}_{1-2} = 211 \text{ kW}$  de potencia de refrigeración y  $\dot{V}_{a \text{ total}} = 19506 \text{ (m}^3 \text{ aire seco/h)}$  según la **Tabla 14**, se investiga en el mercado que tipo de equipos son utilizados para este tipo aplicaciones de alta exigencia, donde se logra determinar que se implementan dos tipos, deshumidificadores industriales por condensación y por desecante, donde el primero de estos, son los de interés. Sin embargo, por las condiciones de operación requeridas y las características de esta aplicación, se dificultó la búsqueda de un equipo que entregue dichas exigencias o bien, que se acople en totalidad, esto a nivel del mercado nacional, por consiguiente se realiza la búsqueda directamente con fabricantes en el exterior.

Conforme a lo anterior, seguidamente se indican las principales características de tres equipos que cumplen con la función requerida, incluso un modelo que funciona a través de la deshumidificación por rotor desecante:

***Primer modelo, G-60T.***

- Fabricante: Alto Refrigeration Manufacturing Co., Ltd.
- País: China.
- Potencia de refrigeración: 212 kW
- Caudal máximo: 24 000 m<sup>3</sup>/h
- Método de deshumidificación: Por condensación (punto de rocío).
- Vida útil: 15 años
- Costo: USD 62 822.00

Según lo indicado por los fabricantes, a razón de la naturaleza de este tipo de aplicaciones, dicho equipo cuenta con la capacidad de controlar la temperatura y humedad del aire de retorno, igualmente, la temperatura y humedad de salida del aire del proceso que corresponden a las condiciones requeridas en el punto 2. Adicionalmente, se podría ajustar la capacidad latente y sensible de acuerdo con los requerimientos de la carga a partir del motor del ventilador con el cual cuenta el equipo. En complemento se adjunta la ficha técnica brindada por el fabricante (ver **Anexo F, Anexo G y Anexo H**).

***Segundo modelo, IT 1900.***

De acuerdo con las características del equipo se instalarían dos unidades en paralelo, ya que, una por sí sola no cuenta con la capacidad requerida, e incluso, existe una diferencia entre la potencia de refrigeración y el caudal que entrega el equipo con respecto a lo requerido.

- Fabricante: Fisair.
- País: España.
- Potencia de refrigeración: (96 kW c/u) \* 2 = 192 kW
- Caudal máximo: (15 000 m<sup>3</sup>/h) c/u \* 2 = 30 000 m<sup>3</sup>/h
- Método de deshumidificación: Por condensación (punto de rocío).
- Vida útil: 10 años
- Costo: (35 000 € c/u) \* 2 = 70 000 €.

De acuerdo con las características del equipo el modelo IT, está concebido para aplicaciones de carga latente que requieren operar 24 h/día, además, al contar con un condensador externo, estas

unidades otorgan con control total tanto la humedad como la temperatura, por lo tanto, son especiales para aplicaciones industriales, donde es necesario un control simultáneo de ambos parámetros. Se adjunta la ficha técnica e información adicional brindada por el fabricante (ver **Anexo I, Anexo K, Anexo J y Anexo L**).

*Tercer modelo, DFLEX2900V.*

- Fabricante: Fisair.
- País: España.
- Capacidad de secado: (131.54 kg/h), equivalente a (3157 kg/24h)
- Caudal máximo: 19 047 m<sup>3</sup>/h
- Método de deshumidificación: Por rotor desecante.
- Vida útil: 15 años
- Costo: 86 000 €.

En el caso de este modelo, se expuso solamente en forma de mención como complemento para futuras investigaciones, ya que no se realizó el estudio con base a este método de deshumidificación del aire, por lo tanto, podría ser necesario tomar en cuenta otros aspectos importantes al utilizar este tipo de tecnología de acuerdo con la aplicación en cuestión.

Un dato importante es que incluso se podría requerir menor potencia de calefacción en la etapa<sub>2-3</sub>, según se observa en el **Anexo M**, específicamente en el punto del esquema demarcado en rojo, donde, si se elimina dicha batería de enfriamiento, se tendría a la salida del deshumidificador un aire con la humedad absoluta requerida en el punto<sub>2</sub> (ver **Tabla 10**), pero con una mayor temperatura, saliendo el aire de la rueda desecante a 28.2 °C, por lo tanto, existiría un delta de temperaturas menor en la etapa<sub>2-3</sub> (calentamiento del aire).

Para profundizar sobre el funcionamiento y características de este tipo de deshumidificador, consultar el enlace adjunto en el **Anexo N**.

**Selección de equipo y dimensionamiento del sistema termosolar (etapa de calentamiento del aire).**

Según los requerimientos energéticos obtenidos en el cálculo de la etapa de calentamiento del aire (ver **Tabla 17**), se continua con la selección de los modelos de colectores solares, con el

fin de dimensionar el área del campo solar y la cantidad de unidades requeridas de acuerdo con la potencia de calefacción exigida, la energía disponible por cada m<sup>2</sup> en la zona de estudio y las características de eficiencia del modelo seleccionado. Se realiza el dimensionamiento con un modelo de colector de tubos al vacío y uno de placa plana, también así, se indican las características principales de interés, como se muestra a continuación:

***Primer modelo, colector solar Vitosol 300-TM, tubos al vacío.***

- Coeficientes de la eficiencia de transferencia térmica del colector termosolar:
  - $\eta_0 = 74 \%$
  - $C_1 = 1,668$
  - $C_2 = 0,007$
  - Superficie de absorción: 3,03 m<sup>2</sup>

En el **Anexo P** se adjunta la ficha técnica del modelo. Posterior a la selección del modelo de colector solar tubos de vacío, se procede con la obtención de la irradiancia global media diaria sobre plano fijo y el perfil de temperatura media diaria de la región en estudio, por medio de la base de datos PVGIS, esto para el mes de diciembre, enero, febrero y marzo, temporada del año que trabaja el Beneficio y, eventualmente, trabajaría el sistema termosolar. Ahora bien, contando con los coeficientes de transferencia térmica, la irradiancia media diaria y el perfil de temperatura media diaria, se prosigue con el cálculo de la eficiencia del colector solar de acuerdo con la energía solar disponible en dicha región, a partir de la **Ecuación 32**:

**Ecuación 32. Eficiencia de transferencia térmica de un colector termosolar.**

$$\eta = \eta_0 - C_1 \cdot \frac{T_m - T_a}{G} - C_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G} \quad (32)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021 )

Donde:

- $\eta$  = eficiencia de transferencia térmica de un colector termosolar.
- $\eta_0$  = rendimiento óptico o eficiencia nominal (%) del colector.
- $C_1$  = coeficiente de pérdida de calor 1 (W/m<sup>2</sup>·K) del colector.
- $C_2$  = coeficiente de pérdida de calor 2 (W/m<sup>2</sup>·K<sup>2</sup>) del colector.
- $T_m$ : temperatura media en °C a la que el sistema va a trabajar. Para esta aplicación corresponde a la temperatura  $T_3 = 40$  °C de la etapa<sub>2-3</sub> de calentamiento del aire (ver **Tabla**

11), a diferencia que se consideran más 10 °C, con el fin de amortiguar la inercia del sistema o bien considerando la eficiencia del intercambiador de calor, aplicando un delta de temperatura.

- $T_a$ : temperatura ambiente en °C (perfil de temperatura media diaria).
- $G$ : irradiancia global sobre plano fijo [ $W/m^2$ ]. En promedio son  $1000 W/m^2$ .

Es necesario saber, como consideraciones importantes, que cuando se trabaja con energía termosolar se trabaja con datos horarios a motivo de que la energía se va a captar horariamente y la eficiencia va a decaer o subir durante las horas del día, a diferencia de la energía fotovoltaica que se trabaja con datos promedio mensuales. Asimismo, para la energía termosolar se utiliza la irradiancia global y para fotovoltaica la directa, ya que el sistema fotovoltaico solo actúa con los haz de luz que golpean perpendicularmente la fotocelda, en cambio el sistema termosolar, y una de sus ventajas, es que toma los haz de luz en todas las direcciones.

Se realizó el cálculo de eficiencia para el rango de horas del día de (7:45 – 17:45), en aumentos de una hora, se toma este rango considerando que son las horas del día en las cuales se logra captar energía termosolar según la región en estudio.

A continuación, se muestra el desarrollo del cálculo anteriormente descrito, específicamente para la hora del día 7:45 a.m. y en el cual se implementó la **Ecuación 32**, esto con la finalidad de ejemplificar el procedimiento realizado para obtener cada uno de los valores de eficiencia [ EFF ( $\eta$ ) ] mostrados en **Tabla 18**:

- Cálculo de la eficiencia [ EFF ( $\eta$ ) ] del colector solar de acuerdo con la energía solar disponible en dicha región, obtenida a través de la base de datos PVGIS para el rango de horas anteriormente indicado y para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo:

$$\eta = \eta_0 - C_1 \cdot \frac{T_m - T_a}{G} - C_2 \cdot \frac{(T_m - T_a)^2}{G}$$

$$\eta = 0,74 - 1,668 \cdot \frac{50 - 17,4}{238} - 0,007 \cdot \frac{(50 - 17,4)^2}{238} = 0.48$$

Los valores de la **Tabla 18** correspondientes a  $G(W/m^2)$  y  $T_{amb} = T_a$ , se obtuvieron de las base de datos PVGIS. (Ver **Anexo O**).

Terminado el cálculo de la eficiencia, se calculó los watt hora disponibles por cada metro cuadrado de superficie al día, esto para cada mes y en el mismo rango de horas, a partir de la **Ecuación 33**.

**Ecuación 33. Cálculo de Watts hora por metro cuadrado.**

$$\frac{Q}{S} \left( \frac{Wh}{m^2} \right) = \eta \cdot G \left( \frac{W}{m^2} \right) \quad (33)$$

**Fuente:** (Elaboración propia, 2021)

De la misma forma, se expondrá a continuación el cálculo antedicho para la hora del día 7:45 a.m., con el propósito de ejemplificar el procedimiento realizado para las distintas horas del día indicadas y para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, como se muestra en la **Tabla 18**.

- Cálculo de watts hora disponibles por cada metro cuadrado de superficie al día, hora 7:45 a.m.:

$$\frac{Q}{S} \left( \frac{Wh}{m^2} \right) = \eta \cdot G \left( \frac{W}{m^2} \right)$$

$$\frac{Q}{S} \left( \frac{Wh}{m^2} \right) = 0.48 \cdot 238 = 114.30$$

**Tabla 18. Cálculo de la eficiencia EFF ( $\eta$ ) del colector solar y los Watts hora por metro cuadrado.**

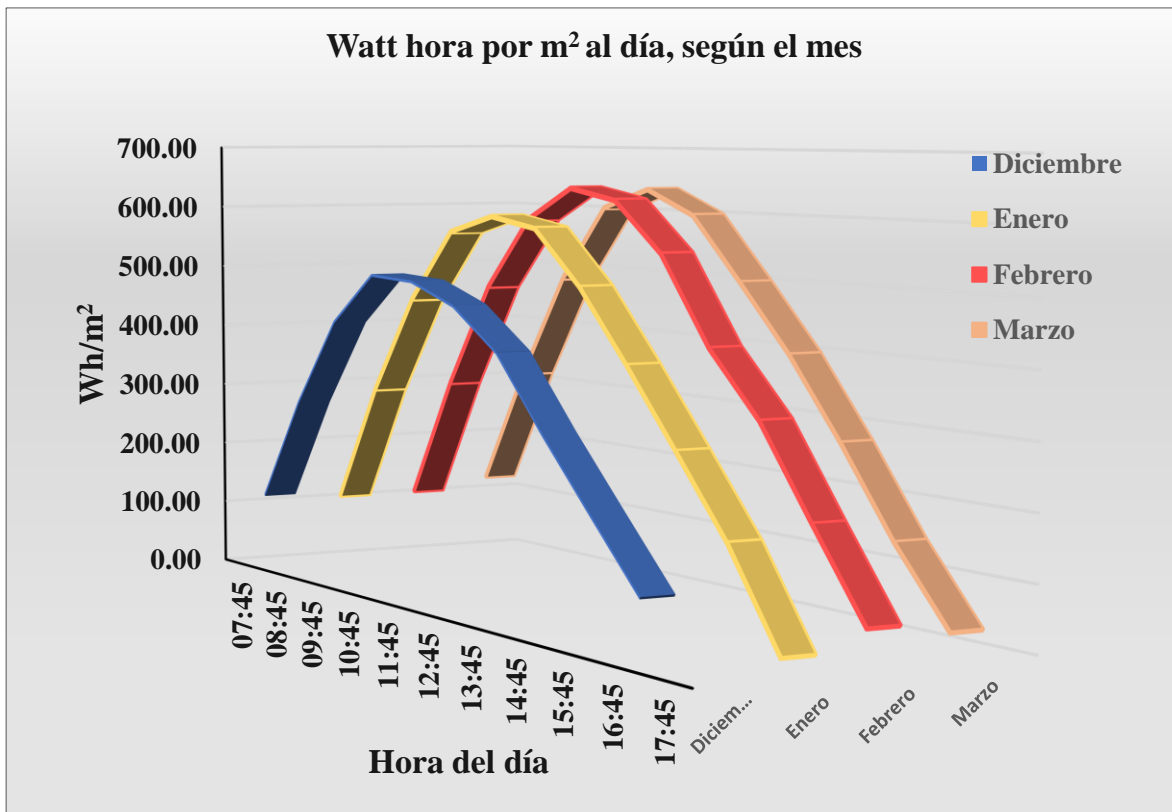
DICIEMBRE				
HORA	G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF ( $\eta$ )	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
07:45	238	17.4	0.48	114.30
08:45	459	19.29	0.61	281.83
09:45	642	21.19	0.66	421.21
10:45	749	21.93	0.67	501.92
11:45	741	22.66	0.67	497.50
12:45	697	23.4	0.67	466.46
13:45	614	22.69	0.66	403.59
14:45	468	21.99	0.63	294.11
15:45	332	21.28	0.58	192.00
16:45	198	20.41	0.46	91.03
17:45	11	19.53	-4.47	-49.18
<b>Total</b>	<b>5138.00</b>	<b>212.24</b>		<b>3263.97</b>

**Fuente:** (Elaboración propia, 2021)

Como se indicó en el procedimiento explicado anteriormente, para el cálculo de la eficiencia del colector solar tubos de vacío y los Watts hora por metro cuadrado para el mes de diciembre, se realizó el mismo procedimiento para los meses de enero, febrero y marzo, donde el resultado final se muestra en el **Apéndice A**.

A continuación, en el **Gráfico 4** y en la **Tabla 19**, se muestran los valores obtenidos de acuerdo con los coeficientes de eficiencia del colector de tubos de vacío. (Ver **Apéndice A**)

**Gráfico 4. Colector solar tubos de vacío (Wh/m<sup>2</sup> al día) según el mes.**



Fuente: Elaboración propia (2021)

**Tabla 19. Colector solar tubos de vacío, Total Q/S (Wh/m<sup>2</sup> al día) por mes.**

Mes	Total Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
Diciembre	3263.97
Enero	3939.27
Febrero	4216.91
Marzo	4095.09

Fuente: Elaboración propia (2021)

Como se observa en el gráfico y tabla anterior, el mes con menos producción de energía solar corresponde a diciembre, por lo tanto, se procede a calcular el área del campo solar ( $m^2$ ) y la cantidad de colectores tubos de vacío (unidades) requeridos en función de dicho mes (ver **Tabla 20**), utilizando la **Ecuación 34** y **Ecuación 35** respectivamente:

**Ecuación 34. Cálculo área del campo solar.**

$$\text{Área del campo solar (m}^2\text{)} = \frac{\text{Energía requerida de secado por hora (Wh)}}{\frac{Q}{S} \left(\frac{Wh}{m^2}\right) \text{ del "mes más crítico"}} \quad (34)$$

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

- Cálculo del área del campo solar:

$$\text{Área del campo solar (m}^2\text{)} = \frac{211\,000}{3263.97} = 65$$

Posteriormente se realizó el cálculo de la cantidad de colectores (unidades):

**Ecuación 35. Cálculo cantidad de colectores (unidades).**

$$\text{Cantidad de colectores (unidades)} = \frac{\text{Área del campo solar (m}^2\text{)}}{\text{Superficie de absorción del colector solar (m}^2\text{)}} \quad (35)$$

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

- Cálculo de la cantidad de colectores (unidades):

$$\text{Cantidad de colectores (unidades)} = \frac{65}{3.03} = 22$$

**Tabla 20. Cálculo de área del campo solar (m<sup>2</sup>) y cantidad de colectores (unidades).**

Concepto	valor
Energía requerida de secado por hora (KWh)	211
Área del campo solar (m <sup>2</sup> )	65
Cantidad de colectores solares tubos al vacío (unidades)	22
Área disponible nave industrial (m <sup>2</sup> )	2755
% Área disponible utilizada	2%

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

El área disponible de la nave industrial (m<sup>2</sup>), se obtuvo a partir del programa informático Google Earth, como se muestra en la **Figura 39**. El % de área disponible utilizada se calculó a partir de la **Ecuación 36**.

**Ecuación 36 %Área disponible utilizada.**

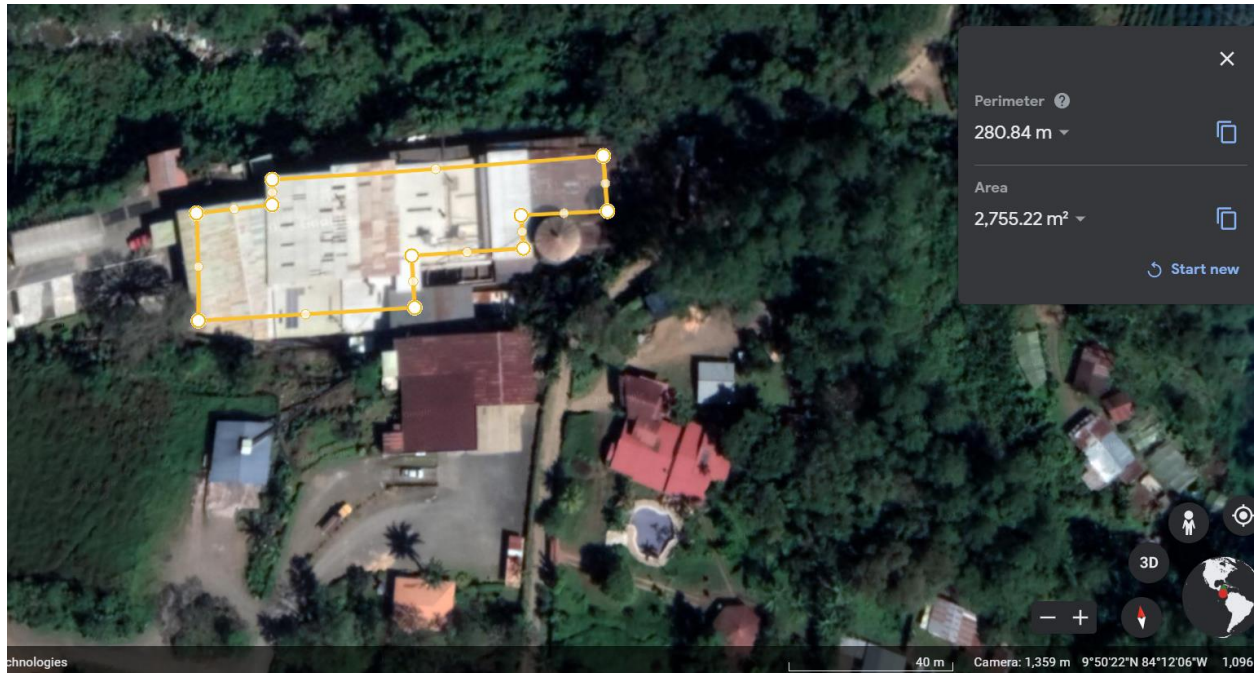
$$\% \text{ Área disponible utilizada} = \frac{\text{Área del campo solar (m}^2\text{)}}{\text{Área disponible nave industrial (m}^2\text{)}} \cdot 100$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

- Cálculo del porcentaje de área disponible utilizada:

$$\% \text{ Área disponible utilizada} = \frac{65}{2755} \cdot 100 = 2\%$$

**Figura 39. Área disponible de la nave industrial (m2).**



**Fuente:** Google Earth, (s.f.)

***Segundo modelo, colector solar Saclima L-21, placa plana.***

- Coeficientes de la eficiencia de transferencia térmica del colector termosolar:
  - $\eta_0 = 0.785$
  - $C_1 = 3.722 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
  - $C_2 = 0,012 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^2$
  - Superficie de absorción:  $2.43 \text{ m}^2$

Ver **Anexo Q**, donde se adjunta la ficha técnica del modelo. Con respecto al colector solar de placa plana, el procedimiento de cálculo corresponde al mismo desarrollado con el modelo Vitosol de tubos de vacío, a diferencia que cambian los valores de los coeficientes de la eficiencia de transferencia térmica y la superficie de absorción, por lo tanto, se obtendrán resultados finales distintos.

Dicho lo anterior, de igual manera se utilizó los mismos datos obtenidos de la base de datos PVGIS (ver **Anexo O**) y la **Ecuación 32** para el cálculo de la eficiencia del colector solar de acuerdo con la energía solar disponible en la región y una vez finalizado el cálculo de la eficiencia para el rango de horas del día de (7:45 – 17:45), se obtuvieron los watt hora disponibles por cada metro cuadrado de superficie al día, esto para cada mes y en el mismo rango de horas, a través de la **Ecuación 33**.

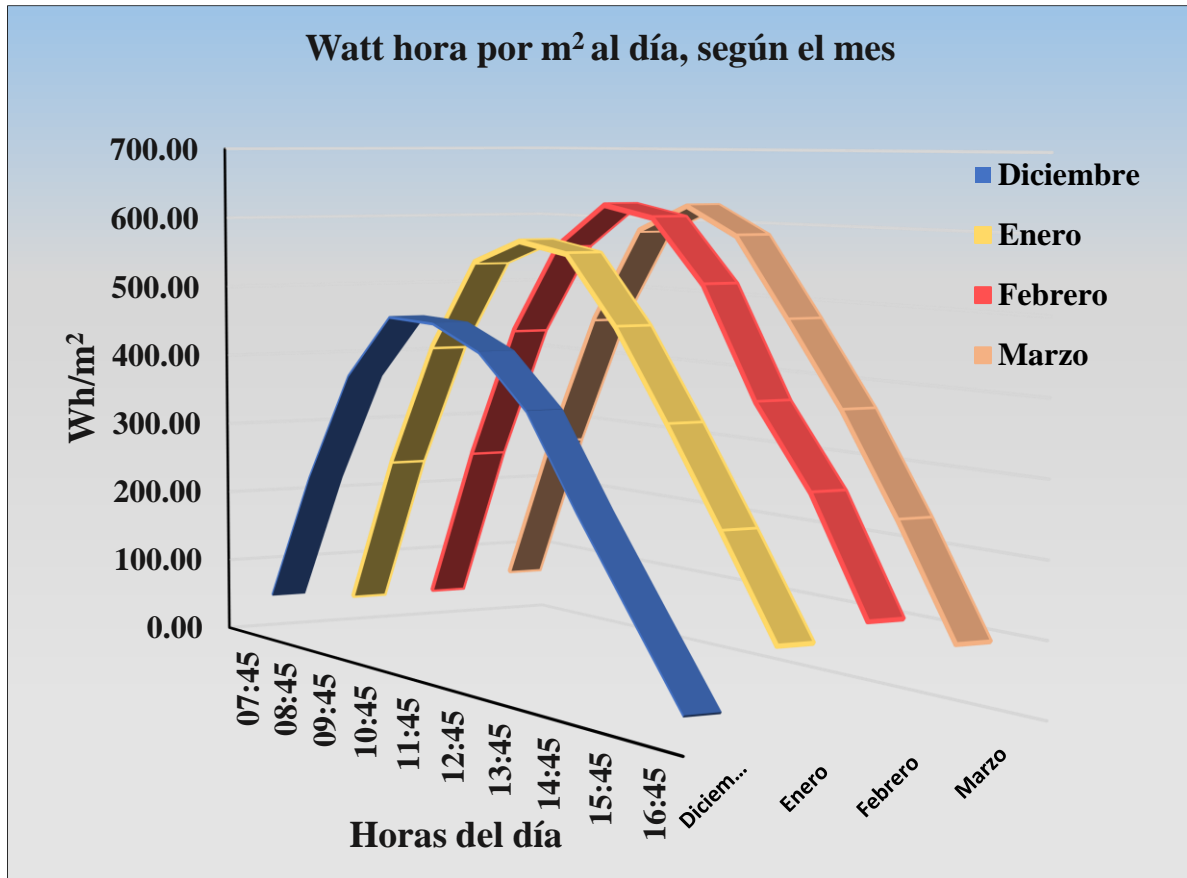
Según lo dicho anteriormente, en la **Tabla 21**, **Gráfico 5** y en la **Tabla 22**, se muestran los valores obtenidos de acuerdo con los coeficientes de eficiencia del colector solar de placa plana. Se debe dejar en claro que, para el caso de los cálculos del colector de placas planas, se llevó a cabo bajo el mismo procedimiento explicado para el colector de tubos al vacío, por lo tanto, no se muestra en dicho apartado el desarrollo de los mismos. En el **Apéndice B** se presentan los resultados obtenidos para los meses de diciembre, enero, febrero y marzo según los coeficientes del colector de placa plana.

**Tabla 21. Cálculo de la eficiencia EFF ( $\eta$ ) del colector solar de placa plana y los Watts hora por metro cuadrado.**

DICIEMBRE				
HORA	G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF ( $\eta$ )	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
07:45	238	17.4	0.22	52.74
08:45	459	19.29	0.51	234.70
09:45	642	21.19	0.60	386.78
10:45	749	21.93	0.63	474.03
11:45	741	22.66	0.64	470.96
12:45	697	23.4	0.63	439.65
13:45	614	22.69	0.60	371.39
14:45	468	21.99	0.54	253.71
15:45	332	21.28	0.43	143.83
16:45	198	20.41	0.18	34.79
17:45	11	19.53	-10.54	-115.92
<b>Total</b>	5138.00	212.24		<b>2862.57</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

**Gráfico 5. Colector solar de placa plana (Wh/m<sup>2</sup> al día) según el mes.**



Fuente: Elaboración propia (2021)

**Tabla 22. Colector solar de placa plana, Total Q/S (Wh/m<sup>2</sup> al día) por mes.**

Mes	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
Diciembre	2862.57
Enero	3588.05
Febrero	3867.15
Marzo	3761.44

Fuente: Elaboración propia (2021)

De la misma forma al modelo anterior, es posible observar en el gráfico y tabla anterior, que el mes con menos producción de energía solar es diciembre, esto al ser la misma región en estudio. Por lo tanto, se procede a calcular el área del campo solar ( $m^2$ ) y la cantidad de colectores de placa plana (unidades) requeridos en función de dicho mes (ver **Tabla 23**), utilizando la **Ecuación 34** y **Ecuación 35**.

**Tabla 23. Cálculo de área del campo solar ( $m^2$ ) y cantidad de colectores (unidades).**

Concepto	valor
Energía requerida de secado por hora (KWh)	211
Área del campo solar ( $m^2$ )	74
Cantidad de colectores placa plana (unidades)	31
Área disponible nave industrial ( $m^2$ )	2755
% Área disponible utilizada	2.7%

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

El área disponible de la nave industrial ( $m^2$ ), corresponde a la misma analizada en el modelo anterior, como se observa en la **Figura 39**, y el % de área disponible utilizada se calculó aplicando la **Ecuación 36**.

### **Propuestas de diseño de control automático para el sistema de secado de café.**

En esta sección se desarrollará una propuesta de sistema de control automático para las dos etapas mencionadas, esto con el fin de alcanzar un ambiente controlado que facilite la operación del secador de café de acuerdo con las condiciones ambientales al momento de ser utilizado, además, alcanzando un funcionamiento más eficiente y seguro. Es importante mencionar que en el apartado de **Control automático**, desarrollado en el marco teórico, se expone información fundamental para entender y complementar cada una de las propuestas que a continuación se presentan.

En el caso de la primera etapa, a motivo de su naturaleza de acondicionamiento de aire, el equipo deshumidificador para aplicaciones industriales seleccionado, tiene como función entregar a la salida de este, el aire con las condiciones requeridas, por tanto, trae incorporado elementos de

control que permitirán eventualmente la manipulación de las variables que forman parte de su funcionamiento, hablese de mantener la temperatura y humedad del aire en los valores objetivos, ajustar la capacidad sensible y latente de acuerdo a los requisitos de la carga, esto a través del motor del ventilador. Lo anterior, se pudo determinar según las fichas técnicas de los equipos y lo conversado con los fabricantes de cada modelo.

No obstante, el sistema de secado de café cuenta con una etapa de acondicionamiento del aire, posterior a la deshumidificación del mismo, que corresponde al proceso de calentamiento de este y requiere un sistema de control que garantice la confiabilidad de su funcionamiento. Siendo así, a continuación, se desarrollarán tres propuestas de control, sin entrar en el diseño de estas. Se plantearán de forma justificada con argumentos, recomendaciones y/o consideraciones basadas en ingeniería de control e instrumentación y que, finalmente, facilite la selección de aquella que mejor se ajuste, conforme a las características de funcionamiento de esta etapa, de la cual se indicarán los pasos para realizar el diseño y su diagrama.

A continuación, en la **Tabla 24**, **Tabla 25**, **Tabla 26** se plantean las tres propuestas de control, posteriormente en la **Tabla 27** y **Tabla 28** se realiza una comparación de los elementos finales de control y una comparación de transductores, respectivamente.

**Tabla 24. Propuesta de control 1.**

Variable controlada	Temperatura del aire.
Variable manipulada	Caudal de agua caliente a través del serpentín.
Setpoint o consigna	Temperatura del aire = 40 °C.
Elemento final de control	Variador de velocidad.
Transductor de temperatura	Termocupla.
Lógica de funcionamiento	Consiste en variar la rotación de la bomba con el elemento final de control, logrando la aceleración o desaceleración de esta y equivale a un aumento o disminución del caudal.
Método de diseño	Para alcanzar el control con variador de velocidad de un motor trifásico se debe partir de la determinación del diámetro de la tubería y del serpentín, el caudal requerido y caudales máximos, con el caudal y la presión total requerida se selecciona la bomba y de acuerdo con las características del motor de la bomba se dimensiona el variador de velocidad.
Modelado del sistema de control	A partir de cálculos de hidráulica y termodinámica, establecer un modelo matemático de transferencia de calor entre el serpentín y el aire seco que pasa por el ducto, posteriormente realizar una función de transferencia caudal-temperatura, con dicha función de transferencia se modela el sistema, donde se aplicaría un control PID.

La naturaleza de un sistema de control de temperatura es presentar una inercia alta, por lo tanto, para esta propuesta se aplicaría un control en cascada temperatura-flujo, donde la consigna es la temperatura del aire seco con su respectivo sensor de medición, el sistema controla el caudal a través de la línea del serpentín, se coloca un sensor medidor de caudal en la línea del fluido caloportador y se mejora la exactitud de medición en un gran porcentaje.

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

**Tabla 25. Propuesta de control 2.**

Variable controlada	Temperatura del aire.
Variable manipulada	Caudal de agua caliente a través del serpentín.
Setpoint o consigna	Temperatura del aire = 40 °C.
Elemento final de control	Válvula de control
Transductor de temperatura	Termocupla.
Lógica de funcionamiento	El funcionamiento de este diseño se reduce en la instalación de una válvula en la línea del serpentín, el motor se arrancaría por medio de un contactor, el motor trabaja a velocidad nominal y el caudal se regula con la válvula de control.
Método de diseño	Para este diseño el motor trabajaría a rotación plena, donde se colocaría una válvula de control en la descarga, a su vez, el control de la apertura o cierre de esta sería a través de un sistema hidráulico o aire comprimido, o bien implementar una válvula eléctrica (electroválvula), las cuales cuentan con posicionadores eléctricos y su alimentación es de 24V AC, las mismas se controlan con corriente de (4 a 20) mA.
Modelado del sistema de control	Para esta propuesta se plantea utilizar una bomba de rotación fija, donde se podría colocar una válvula en el circuito de recirculación, luego partiendo de la posición de la válvula o bien de la curva de funcionamiento de esta, establecer una relación entre la posición de la válvula, cantidad de caudal a través del circuito según la posición de la anterior y la temperatura alcanzada del aire seco.

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

**Tabla 26. Propuesta de control 3.**

Variable controlada	Temperatura del aire.
Variable manipulada	Caudal de agua caliente a través del serpentín.
Setpoint o consigna	Temperatura del aire = 40 °C.
Elemento final de control	Válvula de control
Transductor de temperatura	Termistor.
Lógica de funcionamiento	Como tercer y última propuesta se expone un circuito de recirculación presurizado, considerando que (existen colectores para líneas presurizadas), de igual forma, la consigna es la temperatura del aire seco. De acuerdo a lo anterior, cuando la temperatura cae se abre una válvula de paso, donde la válvula funcionaría como control on/off (todo/nada), de manera que al caer la temperatura por debajo de los 40 °C la válvula se abre, seguidamente comienza a fluir el agua caliente, por consiguiente se despresuriza la línea, la bomba arranca activando el circuito de recirculación hasta alcanzar nuevamente la temperatura de 40 °C, momento en el cual la válvula se vuelve a cerrar, el circuito se presuriza, se detiene la bomba y el sistema vuelve a reposo. Según lo anterior el sistema se mantendría en esta lógica de funcionamiento u operación, y quizás se podría lograr una mayor eficiencia energética.
Método de diseño	Para el diseño, perfectamente, se podría utilizar un tanque presurizado y la línea se tomaría desde el reservorio. El tipo de transductor se selecciona ya que el funcionamiento se basa en un rango de medición de temperaturas más pequeño o exacto, el cual daría un mejor ajuste para la operación con histéresis.
Modelado del sistema de control	En este sistema de diseño se trabajaría bajo histéresis (la bomba enciende o apaga de acuerdo con un máximo y mínimo de presión en la línea), logrando disminuir la cantidad de veces que el sistema enciende y apaga, si esta no se implementa sería una opción poco viable.

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

**Consideraciones generales.**

- Para las tres propuestas se debe medir el efecto que tendría el aire seco a través del ducto con respecto a la relación (a mayor caudal en la tubería, mayor temperatura en el aire seco o viceversa), ya que, en algunas aplicaciones, el mucho caudal de un fluido tiende a enfriar la superficie que se utiliza para su transporte. En otras palabras, determinar si aumentar o disminuir el caudal, aumenta o disminuye la transferencia de calor y, eventualmente, la temperatura en el aire. Al final del día este diseño de control claramente depende del caudal de operación en la línea, por tanto, es indispensable determinar cuánto caudal, produce tanta temperatura.
- Eventualmente, se podría cumplir la relación anterior, si se garantiza el mantener el agua en el reservorio o en el circuito cerrado siempre caliente, de lo contrario la recirculación del producto podría tender a generar el efecto contrario. Lo ideal sería modelar y simular o experimentar lo anterior, para determinar con exactitud dicho comportamiento, garantizándose el funcionamiento del sistema de control propuesto.
- En el caso de la propuesta tres, a raíz de la naturalidad del sistema, hay que analizar si esta técnica se ajusta o funcionaría correctamente, ya que podría requerirse con frecuencia el encendido y apagado del motor de la bomba, esto al ser un sistema de secado que operaría alrededor de 8 horas al día y 6 días a la semana durante toda la temporada de cosecha del café, cosa que, en términos de ahorro de energía y cuidado del equipo, no es eficiente. Al trabajar un sistema bajo histéresis se genera mucha inercia, ya que la temperatura no se mantiene fija, esta se mantiene oscilando en el rango establecido con tiempos muertos prolongados.
- Para medir la temperatura en el ducto del aire seco, lo ideal es el uso de un sensor intrusivo (Termocupla o RTD) y que realice la acción de medición lo más cerca posible del punto donde se requiere la temperatura del aire a (40 °C), para este caso, lo más cercano a la guardiola. Incluso se puede pensar en un sensor inalámbrico, donde la instalación de estos, en sistemas rotativos, es una de las aplicaciones más importantes. Siendo así, se lograría medir dentro de la guardiola la temperatura del

aire en contacto con los granos de café, sin dejar de lado el análisis de los esfuerzos mecánicos a los cuales se vería sometido el sensor.

- En las aplicaciones donde se mide la temperatura del aire, existe un gradiente o diferencia entre la temperatura real del aire y la que capta el sensor, por otra parte, con más razón, al utilizar un sensor intrusivo, por lo tanto, se genera una desviación en la medición. Con el fin de corregir lo anterior se podría, a través de un termómetro o medidor de láser, medir la temperatura real del aire en el punto de aplicación y compararla con la medición del sensor, de esta forma se determinaría el porcentaje de desviación en la medición de temperatura y corregirla posteriormente en el sistema de control.

**Tabla 27. Comparación de los elementos finales de control.**

<b>Elemento</b>	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>Variador de velocidad</b>	Ahorro energético. Disminución en la vibración de las máquinas. Ayuda a alcanzar la vida útil establecida del equipo.	Ocupan mayor espacio. Generan mucha temperatura. Requiere de circuitería electrónica muy compleja.
<b>Válvula de control</b>	Se reduce por mucho la instalación. No se requiere del variador de frecuencia. No se tienen problemas de temperatura que generaría el variador en el punto de instalación.	Pérdidas de energía considerables que son ocasionadas al operar la bomba en la oposición del fluido contra la válvula de control. Deterioro de la bomba por las condiciones de operación.

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

**Tabla 28. Comparación de transductores.**

<b>Transductor</b>	<b>Aplicación</b>
<b>Termistor</b>	Los termistores están diseñados para ser muy efectivos en cierto rango de temperaturas, por lo tanto, son útiles para aplicaciones específicas donde se requiere exactitud en un rango de temperaturas. En un rango mide muy bien, pero en el resto es poco eficiente.
<b>RTD</b>	Los RTD son utilizados para un rango amplio de temperaturas y con niveles de exactitud elevados, por ejemplo, cuando se requiere medir de (0 a 100) °C con exactitudes del 0.01 grados.
<b>Termocupla</b>	Cuando los requerimientos están dentro de las dos aplicaciones anteriores, el idóneo es la termocupla, siempre que no se requiera tanta exactitud como un RTD y a su vez medir en un amplio rango de temperaturas y siendo relativamente preciso.

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

### **Análisis financiero**

A continuación se indicarán los supuestos realizados para llevar a cabo el análisis financiero, el cual se desarrolla únicamente para el sistema haciendo uso del **Primer modelo, G-60T**. para la etapa de deshumidificación industrial, ya que las características de este son las que mejor se adaptan a las condiciones de operación del sistema y, adicionalmente, el que cuenta con mayor vida útil (15 años) y menor costo para su adquisición con respecto al **Segundo modelo, IT 1900**. En relación al **Tercer modelo, DFLEX2900V.**, en su respectivo apartado se indica el motivo por el cual no se toma en cuenta para el diseño del sistema.

Para la etapa del calentamiento del aire se realiza el análisis a partir del **Primer modelo, colector solar Vitosol 300-TM, tubos al vacío**. Por otra parte, se estiman los costos de la bomba, el variador de frecuencia y el PLC en relación con los precios consultados con proveedores de estos equipos a nivel nacional, ya que no se contaba con la información necesaria para dimensionar la bomba, donde las características de esta son indispensables para la selección del variador de frecuencia y el PLC.

Se debe poner en claro que, en cuanto al costo del equipo de deshumidificación industrial y los colectores solares, el monto utilizado corresponde al precio **FOB**, a diferencia del monto de la bomba, variador de frecuencia y PLC, que atañe al precio **CIF**. Según a lo anterior, se debe tener en cuenta que el resultado final del análisis financiero será distinto dependiendo de, si se utiliza o no, el precio CIF para la totalidad del equipo. Adicionalmente se consideraron otros supuestos que, conforme se desarrolle este apartado. se van a indicar.

Inicialmente, se solicitó la información del costo y facturación de producción por temporada del equipo de secado a la empresa CECA S.A, que en total utilizan 14 guardiolas; facilitaron dicha información para la temporada 2019-2020 y 2020-2021, en cada temporada se trabaja los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. De acuerdo con lo anterior se promedió el costo y facturación de ambas temporadas para lograr mayor exactitud, como se muestra en la **Tabla 30**.

Es importante aclarar que para la conversión de dólares a colones o bien de euros a colones, se utilizó el tipo de cambio disponible en la página del Banco Nacional de Costa Rica [www.bncr.fi.cr](http://www.bncr.fi.cr) en la fecha 27/6/2021 (Ver **Tabla 29**). También así, se consideró un aumento anual del 5% en la facturación de electricidad y leña, claramente para el año uno no se toma en cuenta.

**Tabla 29. Tipo de cambio.**

Moneda	Colones
Tipo de cambio del dólar =	624
Tipo de cambio del euro =	750.36

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

**Tabla 30. Costo y facturación promedio por temporada.**

Costo y facturación promedio "temporada 2019-2020 y 2020-2021"		
Diciembre, enero, febrero y marzo		
Concepto	Monto (\$)	Monto (¢)
Electricidad	94428.275	¢58,923,243.60
Leña	29806.425	¢18,599,209.20
Mantenimiento y reparación de maquinaria	66138.095	¢41,270,171.28
Mano de obra	29303.115	¢18,285,143.76
Aumento anual facturación electricidad	5%	¢0.00
Aumento anual facturación leña	5%	¢0.00
Total aumento anual	0.00	¢0.00
Total facturación por año (temporada)	219,675.91	¢137,077,767.84

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Ahora bien, para llevar a cabo el análisis financiero se estimó el costo y facturación promedio por guardiola, ya que el sistema de secado vendría a sustituir solamente una de estas y no las 14 guardiolas. Según lo anterior, se dividieron los valores de la tabla anterior entre 14, obteniendo los resultados de la **Tabla 31**.

**Tabla 31. Estimación costo y facturación promedio por guardiola.**

<b>Costo y facturación promedio por guardiola "temporada 2019-2020 y 2020-2021"</b>		
<b>Diciembre, enero, febrero y marzo</b>		
Cantidad de guardiolas	14	
Electricidad	6,744.88	¢4,208,803.11
Leña	2,129.03	¢1,328,514.94
Mantenimiento y reparación de maquinaria	4,724.15	¢2,947,869.38
Mano de obra	2,093.08	¢1,306,081.70
Aumento anual facturación electricidad	5%	¢0.00
Aumento anual facturación leña	5%	¢0.00
Total aumento anual	0.00	¢0.00
Total facturación	15,691.14	¢9,791,269.13

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 32** se muestra el total de la inversión inicial según los equipos a implementar en el sistema de secado, también así, se supone un costo de materiales y mano de obra de instalación de un 12% del costo total del equipo.

**Tabla 32. Inversión inicial.**

<b>Rubro</b>	<b>Porcentaje considerado</b>	<b>Precio unitario</b>			<b>Cantidad</b>	<b>Total</b>
		Dolares	Euros	Colones		
	%					
Deshumificador industrial		62822	0	¢39,200,928.00	1	¢39,200,928.00
Colector solar vitosol		0	2362.38	¢1,772,635.46	22	¢38,997,980.05
Bomba		1500	0	¢936,000.00	1	¢936,000.00
Variador de frecuencia		0	0	¢500,000.00	1	¢500,000.00
PLC		0	0	¢200,000.00	1	¢200,000.00
Materiales y mano de obra instalación	12%					¢9,580,188.97
Inversión inicial						¢89,415,097.02

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Con respecto al mantenimiento preventivo del equipo, se asume un monto del 3% anual del costo total del equipo, siendo específicos: deshumidificador industrial, bomba, variador de frecuencia y PLC. Hay que mencionar que el mantenimiento de los colectores solares se puede considerar nulo, esto según lo indicado por expertos en dicha área. (Ver **Tabla 33**).

<b>Tabla 33. Mantenimiento preventivo anual.</b>	
<b>Mantenimiento preventivo anual (Por temporada)</b>	
Costo del equipo que requiere mantenimiento (Deshumidificador, bomba, variador de frecuencia y PLC)	¢40,836,928.00
3% del costo del equipo	¢1,225,107.84

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

La **Tabla 34** muestra la potencia total consumida por el equipo del sistema de secado en kW.

<b>Tabla 34. Potencia consumida por el equipo.</b>	
<b>Potencia (kW) = I*V</b>	
Total	85.22

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Como se indicó en el análisis energético, el equipo se va a operar 8 horas al día, por lo tanto, se consideran dichas horas en el rango de 07:00 a.m. a 3:00 p.m., esto para poder determinar la cantidad de horas valle y punta que el equipo va a trabajar y obtener el costo respectivo del consumo eléctrico por día, según la **Tabla 35** y **Figura 40**.

**Tabla 35. Tarifas eléctricas Coopesantos R.L.**

Periodo	Costo
<b>Punta por cada kWh (10:00 a 12:30 y de 17:30 a 20:00)</b>	¢71.32
<b>Valle por cada kWh (6:01 a 10:00 y de 12:30 a 17:30)</b>	¢28.53
<b>Nocturno por cada kWh (20:00 a 6:00)</b>	¢18.34

Fuente: Elaboración propia (2021)

**Figura 40. Horas valle y punta de operación del sistema.**

Valle	→	07:00
Valle	→	08:00
Valle	→	09:00
Punta	→	10:00
Punta	→	11:00
Punta	→	12:30
Valle	→	13:00
Valle	→	14:00
Valle	→	15:00

Fuente: Elaboración propia (2021)

De acuerdo con la tabla anterior se determinan las horas valle y punta al día, así como la equivalencia en porcentaje, donde se demuestra en la **Tabla 36**.

**Tabla 36. Cantidad de horas valle y punta, según las 8 horas de operación**

Total de horas/día	
8	
Horas valle/día	Horas punta/día
5.5	2.5
Horas valle/día	Horas punta/día
68.75%	31.25%

Fuente: Elaboración propia (2021)

Ahora bien, los resultados que se muestran en la **Tabla 37** se obtuvieron de la siguiente manera:

**Ecuación 37. Total kW/h/día**

$$Total (kW/h/día) = Potencia (kW) * Total (h/día) \quad (37)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

Por otra parte, para el cálculo de kW/h/mes, se consideran 24 días al mes, ya que, los domingos el Beneficio no opera. Dicho lo anterior, el cálculo por mes se realizó con la **Ecuación 38**.

**Ecuación 38. Total kW/h/mes**

$$Total (kW/h/mes) = (kW/h/día) * 24 \text{ días} \quad (38)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

Una vez obtenido el total (kW/h/día) se procedió al cálculo de los kW/h/día valle y punta, básicamente a partir del producto entre el total (kW/h/día) y el porcentaje correspondiente a horas valle y punta descrito en la **Tabla 36**. De igual manera al procedimiento anterior, se calculó los kW/h/mes valle y punta.

<b>Tabla 37. Total de facturación por consumo eléctrico al mes</b>		
<b>Total de facturación según el consumo eléctrico por mes</b>		
<b>Total kW/h/día</b>	<b>kW/h/día valle</b>	<b>kW/h/día punta</b>
681.76	468.71	213.05
<b>Total kW/h/mes</b>	<b>kW/h/mes valle</b>	<b>kW/h/mes punta</b>
16362.24	11249.04	5113.2
<b>Total facturación al mes (₡)</b>	<b>facturación al mes, horas valle (₡)</b>	<b>facturación al mes, horas punta (₡)</b>
₡685,608.54	₡320,935.11	₡364,673.42

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

La facturación al mes en horas valle y punta (₡), se obtuvo con la **Ecuación 39** y **Ecuación 40**, el costo por kWh según la **Tabla 35**.

**Ecuación 39. Facturación al mes, horas valle (₡)**

$$\text{facturación al mes, horas valle (₡)} = (\text{kW/hora/mes valle}) * (\text{costo por kWh valle}) \quad (39)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

**Ecuación 40. Facturación al mes, horas punta (₡)**

$$\text{facturación al mes, horas punta (₡)} = (\text{kW/hora/mes punta}) * (\text{costo por kWh punta}) \quad (40)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

Finalmente el total de facturación al mes (₡) se obtuvo con la

**Ecuación 41:****Ecuación 41. Total de facturación al mes (₡)**

$$\text{Total de facturación (₡)} = \text{facturación al mes (horas valle + horas punta)} \quad (41)$$

**Fuente:** Elaboración propia, (2021)

Una vez calculado el consumo eléctrico por mes del nuevo sistema de secado, se debe considerar el consumo eléctrico del motor de la guardiola, ya que, eventualmente se podrían utilizar los mismos equipos en caso de implementar el sistema de secado. El consumo eléctrico de la guardiola se asumió a partir del consumo brindado por la empresa, donde se obtuvo primeramente el promedio por mes y finalmente el promedio por guardiola, para un total de consumo eléctrico indicado en la **Tabla 38**.

**Tabla 38. Consumo eléctrico total por mes.**

<b>Consumo eléctrico total por mes</b>	
<b>Equipo</b>	<b>Monto</b>
Nuevo sistema de secado	₡685,608.54
Guardiola	₡75,157.20
<b>Total</b>	<b>₡760,765.73</b>

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 39** se muestra en el costo y facturación por temporada, esto al implementar el nuevo sistema de secado de acuerdo con los cálculos anteriormente argumentados. Donde, el total de consumo eléctrico por temporada corresponde a la suma del consumo en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo. Con respecto al aumento anual por facturación eléctrica no se toma en cuenta para la facturación del año 1.

<b>Tabla 39. Estimación costo y facturación por temporada, nuevo sistema de secado</b>				
<b>Costo y facturación anual (por temporada) para el nuevo sistema de secado</b>				
<b>Año 1</b>				
Mes	<b>Diciembre</b>	<b>Enero</b>	<b>febrero</b>	<b>Marzo</b>
Electricidad	¢760,765.73	¢760,765.73	¢760,765.73	¢760,765.73
Aumento anual facturación electricidad	5%			
Mantenimiento preventivo	¢1,225,107.84			
Total de facturación	¢4,268,170.77			

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 40** se presenta un resumen del costo y facturación del sistema actualmente implementado y del nuevo sistema, donde para el año 1, se obtiene un ahorro anual de cuatro millones trescientos cincuenta y tres mil ciento cincuenta y ocho colones. Una vez obtenido el costo y facturación para el año 1 en ambas condiciones, se procede con el cálculo del Valor Actual Neto y la Tasa Interna de Retorno de acuerdo con las ecuaciones definidas en el Marco Referencial, específicamente en el apartado **Tasa Interna de Retorno (TIR) y Valor Actual Neto (VAN)**.

Es de relevancia indicar que en el caso del cálculo de las proyecciones del sistema actual se considera el aumento del 5% anual sobre la facturación eléctrica y sobre la facturación de la leña, también así para las proyecciones del sistema nuevo se considera el aumento del 5% anual sobre la facturación eléctrica, esto a partir del año 2, de esta forma se convierte a valor futuro a lo largo de los quince años, tiempo establecido según la vida útil del equipo de deshumidificación industrial.

Así también, se requiere utilizar un costo de capital, para el cual se selecciona el 9.35% que corresponde a la tasa de interés brindada por BN PYMES del BNCR (Banco Nacional de Costa

Rica), para financiamientos de proyectos que implementen pequeñas y medianas empresas. Claramente, como se indicó al inicio del apartado de resultados y análisis de la investigación, se utilizó el programa informático Excel de Microsoft Corporation para realizar los cálculos del VAN y la TIR.

**Tabla 40. Resumen costo y facturación sistema actual y sistema nuevo**

<b>Resumen costo y facturación sistema actual</b>	
<b>Año 1</b>	
Electricidad	¢4,208,803.11
Leña	¢1,328,514.94
Mantenimiento y reparación de maquinaria	¢2,947,869.38
Mano de obra	¢1,306,081.70
Total facturación por año	¢9,791,269.13
<b>Resumen costo y facturación sistema nuevo</b>	
<b>Año 1</b>	
Electricidad	¢3,043,062.93
Aumento anual facturación electricidad	¢0.00
Mantenimiento preventivo	¢1,225,107.84
Total de facturación	¢4,268,170.77
<b>Ahorro anual</b>	
¢5,523,098.36	

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 41** se presenta el flujo neto de efectivo que se obtuvo una vez realizadas las proyecciones a 15 años y calcular la diferencia entre el total de facturación de cada año (costo y facturación), del sistema actual y el nuevo sistema.

<b>Flujo neto de efectivo</b>	
<b>Inversión</b>	<b>-C\$89,415,097.02</b>
<b>Año 1</b>	C\$5,523,098.36
<b>Año 2</b>	C\$5,647,811.11
<b>Año 3</b>	C\$5,778,759.51
<b>Año 4</b>	C\$5,916,255.32
<b>Año 5</b>	C\$6,060,625.92
<b>Año 6</b>	C\$6,212,215.06
<b>Año 7</b>	C\$6,371,383.65
<b>Año 8</b>	C\$6,538,510.67
<b>Año 9</b>	C\$6,713,994.04
<b>Año 10</b>	C\$6,898,251.58
<b>Año 11</b>	C\$7,091,722.00
<b>Año 12</b>	C\$7,294,865.94
<b>Año 13</b>	C\$7,508,167.07
<b>Año 14</b>	C\$7,732,133.27
<b>Año 15</b>	C\$7,967,297.77

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Posterior a obtener el flujo neto de efectivo, se calculó el VAN de ahorro, VAN del proyecto y la TIR, como se evidencia en la **Tabla 42**.

**Tabla 42. VAN de ahorro, VAN de proyecto y TIR**

<b>15 años</b>	
<b>Costo de capital</b>	
<b>9.35%</b>	
VAN AHORRO	¢50,067,828.21
VAN PROYECTO	<b>-¢39,347,268.80</b>
TIR	1%

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

De acuerdo con la teoría, dice que, un proyecto se debe implementar si la tasa interna de retorno es mayor al costo de capital, claramente, como se observa en la tabla anterior la TIR obtenida es del **uno por ciento**, por lo que es inferior al costo de capital. Por lo tanto, no se recomienda o bien no es viable implementar el presente proyecto con los costos actuales.

A continuación, se muestra en la **Tabla 43** el cálculo por año del VAN de ahorro y VAN del proyecto que eventualmente permite visualizar el año donde se recupera la inversión inicial de un proyecto, claro está que en este caso, no es posible recuperar la inversión inicial a lo largo de los 15 años, como era de esperar según la TIR obtenida.

**Tabla 43. Tiempo de recuperación del proyecto**

<b>Tiempo de recuperación</b>		
<b>Año</b>	<b>VAN ahorro</b>	<b>VAN proyecto</b>
1	¢5,050,844.40	-¢84,364,252.61
2	¢9,774,112.41	-¢79,640,984.60
3	¢14,193,664.52	-¢75,221,432.50
4	¢18,331,486.08	-¢71,083,610.93
5	¢22,207,841.07	-¢67,207,255.94
6	¢25,841,412.97	-¢63,573,684.04
7	¢29,249,433.84	-¢60,165,663.18
8	¢32,447,802.62	-¢56,967,294.40
9	¢35,451,193.55	-¢53,963,903.46
10	¢38,273,155.51	-¢51,141,941.50
11	¢40,926,203.11	-¢48,488,893.90
12	¢43,421,900.17	-¢45,993,196.85
13	¢45,770,936.27	-¢43,644,160.74
14	¢47,983,196.99	-¢41,431,900.03
15	¢50,067,828.21	-¢39,347,268.80

**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Según los valores conseguidos en el análisis anterior, el VAN de ahorro es de cincuenta millones sesenta y siete mil ochocientos veintiocho colones, pero es insuficiente para recuperar la inversión inicial de ochenta y nueve millones cuatrocientos quince mil noventa y siete colones.

## CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- Una vez desarrollada la presente investigación se logró determinar que los principales parámetros y requerimientos para un adecuado secado del grano de café de acuerdo con las exigencias del mercado son los siguientes: el porcentaje de humedad promedio contenido en el grano de café pergamino húmedo antes de la etapa de secado se encuentra en el rango de (50-55)% de humedad en base húmeda, el porcentaje de humedad final requerido y alcanzado en el grano de café pergamino después de la etapa de secado debe de estar en el rango de (10-12)% de humedad en base húmeda, esto para evitar el cultivo de hongos y bacterias por alto contenido de agua una vez que se almacene.
- Por otra parte, las temperaturas a las cuales se puede someter el grano sin dañar sus propiedades organolépticas en un tiempo determinado para lograr el secado de este son las siguientes: el café tolerará 40°C por un día o dos, el café tolerará 50°C por pocas horas en un rango de (4-10) horas y la tolerancia a 60°C es por un período menor a 1 hora.
- A partir del uso de la base de datos PVGIS, aplicación y análisis de procesos psicrométricos de la termodinámica, uso de la herramienta Visor de diagramas psicrométricos de Daikin Industries y cálculos de ingeniería, fue posible establecer y desarrollar la secuencia que describe el funcionamiento del sistema de secado, teniendo que, en el punto<sub>1-2</sub> se da un enfriamiento con deshumidificación del aire, punto<sub>2-3</sub> se da un Calentamiento sin deshumidificación del aire, punto<sub>3-4</sub> se da una humidificación adiabática del aire, donde, el proceso se definió con las siguientes condiciones del aire: punto 1 ( $T_{m1}= 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_1= 94.13\text{ }%$ ), punto 2: ( $T_2= 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\phi_2= 100\%$ ), punto 3 ( $T_3= 40\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $\omega_3= 0.0058\frac{\text{kg agua}}{\text{kg aire seco}}$ ), punto 4 ( $T_4= 22.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $h_4= 55.2\text{ (kJ/kg aire)}$ ) y suponiendo  $P_{\text{atm}}= 101.325\text{ kPa}$  constante para cada etapa.
- Se logró dimensionar el sistema de acuerdo con los requerimientos energéticos obtenidos en cada punto del sistema y realizando cálculos de termodinámica e ingeniería, donde se llegó a la conclusión que para extraer 1227 kg de agua de una

carga de café de 60 quintales o bien 2760 Kg de biomasa húmeda, en un tiempo de 8 horas, se requiere de un flujo volumétrico de aire igual a 19 506 m<sup>3</sup> de aire seco por hora, una potencia de enfriamiento en la etapa de deshumidificación del aire igual a 211 kW y una potencia de calefacción en la etapa de calentamiento del aire de 211 kWh/h.

- Según la oferta del mercado en equipos para aplicaciones industriales, fue posible concluir que el equipo que mejor ajuste da para la etapa de deshumidificación del aire es un deshumidificador industrial para altas exigencias, dicho esto, para efectos de la investigación se seleccionó el **Primer modelo, G-60T**, que entrega una potencia de refrigeración de **212 kW**, un caudal máximo igual **24 000 m<sup>3</sup>/h** y una vida útil de **15 años**. Para el sistema de colectores solares que se implementaría en la etapa de calentamiento del aire, se seleccionó el **Primer modelo, colector solar Vitosol 300-TM, tubos al vacío.**, ya que este tipo de colectores por sus características alcanzan mayor captación de energía solar con respecto a los colectores de placa plana. También así se determinó que la nave industrial cuenta con un área total de 2755 m<sup>2</sup> para la instalación de colectores solares y del cual solo se estaría utilizando un 2% de dicho total. La bomba, el variador de frecuencia y el PLC no fue posible seleccionarlos al carecer de información importante para la dimensión de los mismos.
- Realizando un análisis teórico e investigativo se concluyó que, para la etapa del calentamiento del aire, el implementar un sistema de control en cascada sería lo idóneo, esto controlando la temperatura del aire y a su vez la cantidad de flujo del líquido caloportador a través del serpentín, estableciendo una relación de transferencia de calor entre ambos, según la cantidad de fluido caloportador a través del serpentín. El control se llevaría a cabo con un sensor de temperatura en la línea del flujo del aire y un sensor de caudal en la línea del flujo del agua caliente e implementando un variador de frecuencia y un PLC para sus respectivas funciones. Con relación al control en la etapa de deshumidificación del aire, el equipo seleccionado cuenta con el propio sistema de control, según lo indicado por el fabricante.

- Una vez llevado a cabo el análisis financiero de la investigación, fue posible determinar que de acuerdo con los costos del equipo seleccionado, principalmente el deshumidificador industrial y su consumo de potencia eléctrica al ser un equipo de alta exigencia, no es viable la implementación del sistema de secado, ya que se debe realizar una inversión inicial por **₡89 415 097.02**, donde utilizando un costo de capital del 9.35% a 15 años, se obtiene un VAN de ahorro por **₡50 067 828.21**, el cual es insuficiente para recuperar la inversión inicial, logrando un VAN del proyecto por menos **₡39 347 268.80**, a lo que se resume una TIR igual a **1%**, notoriamente no es factible bajo estas condiciones.
- En función de la investigación realizada, se pudo concluir que, para el diseño de un sistema idóneo de secado de granos de café implementando energías renovables, es posible sustituir la biomasa (leña y/o cascarilla), utilizada como combustible para llevar el aire a la temperatura requerida, por un arreglo de colectores solares. Así también, incorporar una etapa de deshumidificación del aire previo al calentamiento, que permite aumentar la capacidad del aire para arrastrar el agua evaporada proveniente de la carga de café. En efecto, dadas las características de diseño y operación del nuevo sistema, se lograría una disminución en el tiempo de secado para una carga de café de 60 quintales, de 28 a 32 horas que tarda en promedio el sistema actualmente implementado, a 8 horas que tardaría el nuevo diseño. Sin embargo, por los altos costos de inversión en los que se tendrían que incurrir al implementar un deshumidificador industrial, la propuesta del nuevo sistema de secado se vuelve económicamente inviable de implementar.

## Recomendaciones

Finalmente, según los resultados obtenidos mediante el presente estudio, se recomienda para futuras investigaciones lo siguiente:

- Para efectos de la determinación del porcentaje de humedad inicial en los granos de café, realizar una medición en campo, con el equipo conveniente para dicha aplicación y así obtener valores más exactos que mejoren los resultados del estudio.
- En relación con la etapa de deshumidificación del aire, buscar un equipo de menor costo y una mayor vida útil, con el fin de alcanzar la viabilidad económica al implementar el sistema de secado de café anteriormente dimensionado.
- Asimismo, realizar el estudio basándose únicamente en la etapa de calentamiento del aire, dicho de otra forma, omitiendo la aplicación de la etapa de deshumidificación y adicionalmente la implementación de un sistema fotovoltaico para cubrir la demanda o consumo eléctrico del equipo que lo requiere, posteriormente analizar la viabilidad energética y económica con dichas características del sistema. De ser el caso, tomar en cuenta que el ventilador del sistema se debe incorporar y las condiciones para el diseño del sistema de control automático van a cambiar, ya que, de acuerdo con la presente investigación, este elemento es parte del deshumidificador industrial.
- Si es posible, por el tema del factor económico, desarrollar un prototipo a pequeña escala, ya sea para el sistema con la etapa de deshumidificación del aire y calentamiento o bien, considerando solamente un sistema con la etapa de calentamiento del aire, con el propósito de demostrar experimentalmente el funcionamiento del secador de café y mejorar el diseño.
- Por otra parte, analizar la posibilidad de implementar deshumidificadores industriales con la tecnología de rotor desecante en un sistema de secado de café.
- Respecto al sistema de control, llevar a cabo pruebas de forma experimental, esto con el fin de determinar si la relación de mayor o menor caudal a través de la línea del serpentín tiene un efecto, ya sea de menor o mayor temperatura en el aire. Así también, ubicar el sensor temperatura lo más cercano posible al punto de aplicación del aire a la temperatura requerida. Por último, desarrollar el sistema de control siguiendo las distintas pautas y recomendaciones planteadas en la propuesta de la presente investigación.

## CAPÍTULO VI: PROPUESTA

### Descripción

La presente investigación busca determinar la viabilidad de diseñar un nuevo sistema para el secado de granos del proceso industrial de beneficiado de café, implementando energías renovables, siendo específicos energía termosolar que vendría a sustituir los hornos encargados de la etapa de calentamiento, los cuales son alimentados con leña y/o cascarilla del café ya procesado. Y de modo complementario, se pretende incorporar una nueva etapa al proceso de secado que consiste en extraer del aire atmosférico la humedad, antes de la etapa de calentamiento de este, para finalmente ser llevado hasta la secadora rotatoria o de tipo guardiola que es la que contiene los granos de café y se mantiene en constante movimiento rotario, permitiendo alcanzar un nivel mayor de homogeneidad en el secado.

La idea principal del diseño es disminuir la contaminación generada por el proceso de combustión que se da en los hornos al utilizar como combustible la biomasa anteriormente mencionada, bajar los tiempos de secado al lograr un aire de proceso con menor porcentaje de humedad que equivale a una mayor capacidad de arrastre del agua evaporada contenida en la carga de café, en consecuencia una reducción en los costos de producción del beneficio final y potenciar la competitividad de los sectores productivos agrícolas en el país. La planta industrial elegida como modelo para la investigación corresponde al Beneficio de Palmichal CECA S.A, ubicado en Palmichal de Acosta, San José, el cual pertenece a Neumann Kaffee Gruppe de Alemania.

### Propuesta

Para iniciar la investigación se tomó como muestra de análisis una carga de 60 quintales (qq) de café, lo que equivale a 2760 kg de biomasa húmeda de granos de café. Lo anterior, según la capacidad de las 14 guardiolas que utiliza el Beneficio de Palmichal, donde cada una cuenta con la capacidad mencionada. Posteriormente se determinó la cantidad de agua o humedad necesaria a extraer de dicha carga, específicamente 1227 kg. Seguidamente se seleccionó la temperatura del aire para llevar a cabo el secado de los granos de café, la anterior igual a 40 °C.

Luego se realizó el análisis psicrométrico del aire, que permitió describir el funcionamiento del sistema de secado de café y por consiguiente dimensionar el equipo con base en las exigencias energéticas de cada etapa, donde se estableció un tiempo de secado de 8 horas. Según lo anterior,

se determinó los siguientes requerimientos: un flujo volumétrico de aire para el secado igual a 19506 m<sup>3</sup> de aire seco/hora, una potencia de enfriamiento para la etapa de deshumidificación del aire igual a 211 kW y para la etapa de calentamiento del aire 211 kWh/h de potencia de calentamiento.

En función de lo antedicho, se seleccionó el equipo del sistema de secado, para la etapa de deshumidificación del aire el **Primer modelo, G-60T.**, este equipo de deshumidificación industrial cuenta con el ventilador requerido. Para la etapa de calentamiento del aire se elige el modelo de **Primer modelo, colector solar Vitosol 300-TM, tubos al vacío.** Esta última etapa requiere de una bomba, un variador de velocidad y un PLC, sin embargo, a falta de información indispensable para dimensionar estos tres equipos, se parte de ciertas suposiciones de sus características para dar continuidad con la investigación.

Teniendo claro las características y funciones de los equipos seleccionados, se procede a realizar una propuesta de control automático. Esta se plantea únicamente para la etapa de calentamiento del aire, misma se describe a continuación (**Propuesta de control**), ya que, de acuerdo con los fabricantes del equipo de deshumidificación industrial, el mismo cuenta con su propio sistema de control como fue descrito en el apartado de resultados y análisis de la investigación. Es importante aclarar que para el sistema de control se plantea la propuesta, brindando un procedimiento de diseño, recomendaciones, diagrama de bloques y esquema del sistema, pero sin entrar en el diseño de la misma.

### **Propuesta de control**

Según el análisis planteado en el apartado de resultados y análisis de la investigación se selecciona la propuesta 1, a continuación, se muestra el diagrama de su funcionamiento y pasos para llevar a cabo su diseño.

- 1. Método de medición de la temperatura:** implementando una termocupla (tipo J), cumple con condiciones indispensables para la aplicación en cuestión, hablase de (robustez, simplicidad y flexibilidad de utilización, relativamente económico, rango de temperaturas aceptable, funcionamiento por lazo de control a dos hilos, apto para ambientes con mucha vibración, entre otros).
- 2. Método de control:** Con un lazo de control de dos hilos. ¿por qué?, de acuerdo con el transductor, este va a entregar una señal de (4 - 20) mA, considerando que la termocupla

genera un milivoltaje, luego se hace pasar la señal por un acondicionador de corriente (transmisor de temperatura), el cual toma la señal de la termocupla y las transforma en una señal estándar de (4 - 20) mA. Posteriormente se setea un rango de temperaturas a la termocupla de (0 a 100) °C y finalmente se normaliza este rango a (4 - 20) mA, señal que entrará al controlador, misma lógica anterior para llevar la señal del transmisor de flujo hasta el controlador, posteriormente, este último dará la orden de corrección al elemento final de control, de acuerdo con la señal de error que se debe corregir.

3. **Controlador a utilizar:** se selecciona un controlador específico para la aplicación o un PLC, la entrada y salida de este debe ser de una señal de (4 a 20) mA, la cual sería llevada hacia el elemento final de control.
4. **Elemento final de control a implementar:** se exponen dos opciones:
  - a. Válvula de control la cual abre o cierra en un rango de tal manera que permita variar el caudal de acuerdo con el rango establecido,
  - b. o un variador de velocidad que varíe la rotación de la bomba y, por tanto, el caudal a través de la línea del serpentín.

Se selecciona la opción b, la misma está sujeta a la propuesta de control 1 y permitirá un control más exacto sobre el caudal del fluido caloportador, a su vez se eliminan las pérdidas de carga en la línea que podría generar una válvula de control, al mismo tiempo permite un ahorro en el consumo energético.

#### 5. Dimensiones:

- a. Elementos principales del circuito de control: se dimensiona el serpentín de acuerdo con el caudal requerido, con el caudal requerido y la cabeza total o presión requerida se selecciona la bomba, de acuerdo con la bomba, se tienen las características del motor (caballos de fuerza HP), y con las características del motor se selecciona el variador requerido. Resumen:
  - i. Se establece el caudal máximo del serpentín.
  - ii. Se establece el caudal máximo de la bomba.
  - iii. Se obtiene la potencia máxima del motor de la bomba.
  - iv. Se selecciona o dimensiona el variador con base a la potencia del motor.

- b. Válvula: esta se dimensiona con base a las dimensiones de la tubería y el delta de presión máximo, al cual va a ser sometida la válvula para su correcto funcionamiento.

En este apartado evidentemente se toma la opción “a”, la cual corresponde a la propuesta de control 1.

#### 6. Desarrollo de la función de transferencia de control:

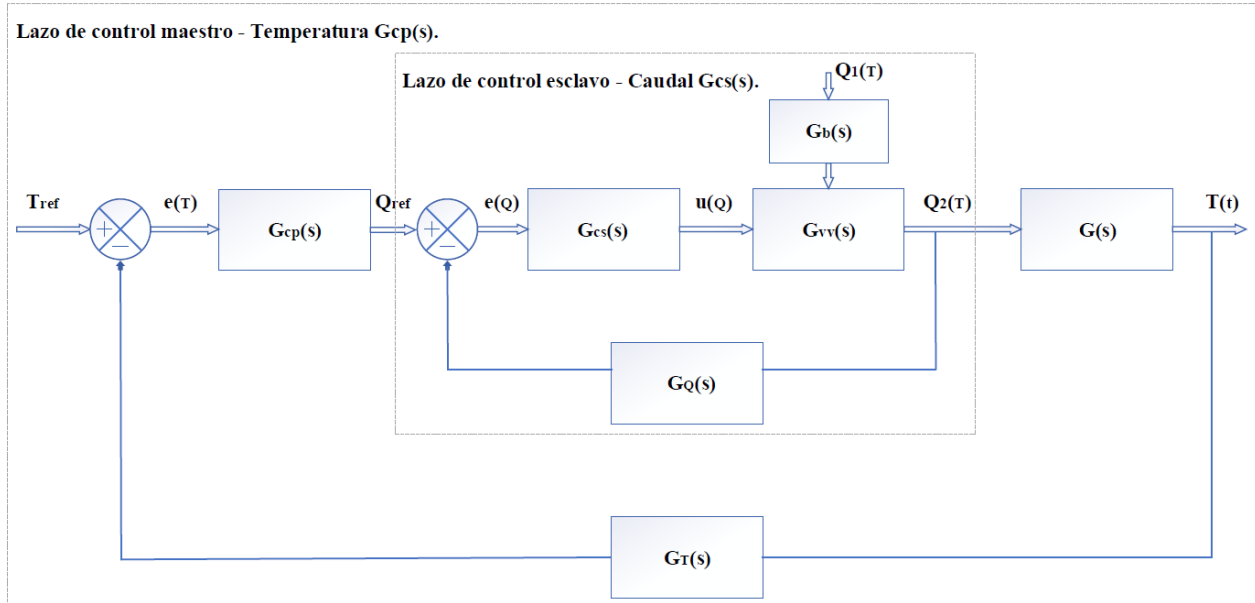
Realizar una función de transferencia del sistema de control donde la entrada es el caudal y la salida es la temperatura del sistema. Lo primero que se debe modelar es, cuánto caudal genera cuanta temperatura en el serpentín, luego establecer una relación de la transferencia de calor entre el serpentín y el aire, ahora bien, con ambas ecuaciones es posible relacionar el caudal que la bomba entrega, con la transferencia de calor que entrega el serpentín y cuál es la temperatura alcanzada en el aire del proceso, con esta relación de ecuaciones es posible concretar la función de transferencia y posteriormente desarrollar un modelado matemático del sistema que describa su funcionamiento. Los controladores para diseñar serían del tipo PID.

#### 7. Pasos para el diseño del controlador:

- a. Definir la estructura del controlador (en la **Figura 41** se muestra el diagrama de bloques del sistema de control).
- b. Sintonizar el controlador (determinar la ganancia de los controladores), primeramente, el esclavo y posterior el maestro.
- c. Determinar un modelo matemático del proceso dentro del lazo de control secundario.
- d. En este punto se podría implementar un control (PI), ya que la respuesta de este se debe anticipar a la respuesta del primario. Este se puede sintonizar a través de la técnica oscilatoria de Ziegler-Nichols.
- e. Definir el modelo matemático que relaciona la variable controlada del sistema con el *setpoint* o consigna del lazo de control secundario, tomando en cuenta que el control secundario es de lazo cerrado.

f. Finalmente, ajustar el controlador principal (PID).

**Figura 41. Diagrama de bloques, sistema de control en cascada temperatura-flujo.**



**Fuente:** Elaboración propia (2021)

En la **Tabla 44** se define cada una de las variables del diagrama de bloques expuesto en la **Figura 41**:

**Tabla 44. Variables del diagrama de bloques del sistema de control en cascada temperatura - flujo.**

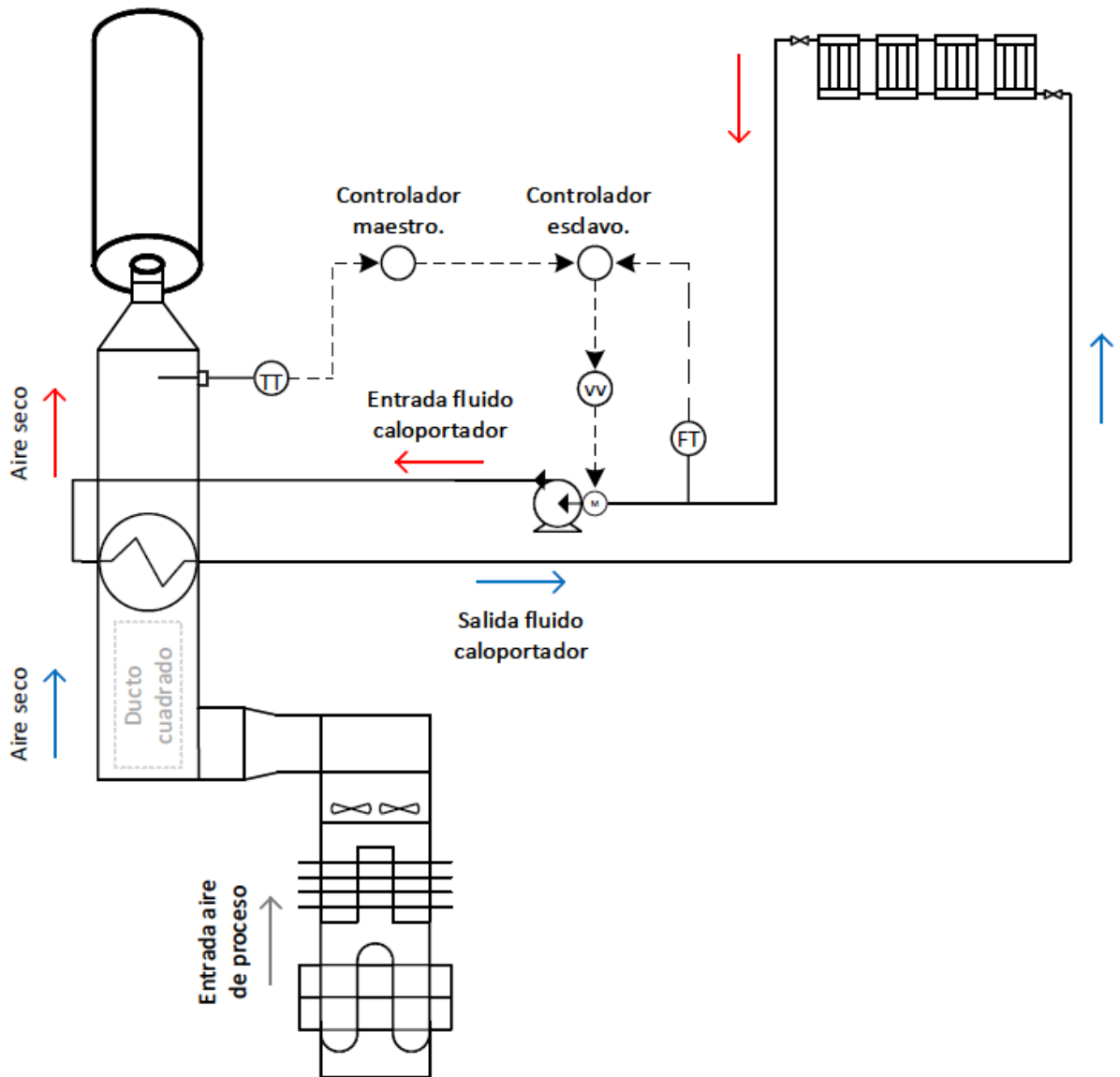
Variable	Definición	Variable	Definición
$T_{ref}$	Temperatura de referencia o <i>setpoint</i> del lazo de control primario.	$Q_2(T)$	Variable manipulada (caudal del fluido caloportador) y variable controlada para el lazo secundario.
$e(T)$	Señal de error de temperatura.	$G(s)$	Función de transferencia del proceso.
$G_{cp}(s)$	Función de transferencia del controlador primario.	$T(t)$	Temperatura del aire de proceso y variable controlada.

$Q_{ref}$	Caudal de referencia o <i>setpoint</i> del lazo de control secundario.	$Q_1(T)$	Perturbación del lazo secundario.
$e(Q)$	Señal de error de caudal.	$G_b(s)$	Función de transferencia de la perturbación.
$G_{cs}(s)$	Función de transferencia del controlador secundario.	$G_Q(s)$	Elemento primario / Función de transferencia del transmisor de caudal.
$u(Q)$	Señal de control de caudal.	$G_T(s)$	Elemento primario / Función de transferencia del transmisor de temperatura.
$G_{vv}(s)$	Función de transferencia del variador de velocidad.		

**Fuente:** Elaboración propia, (2021 )

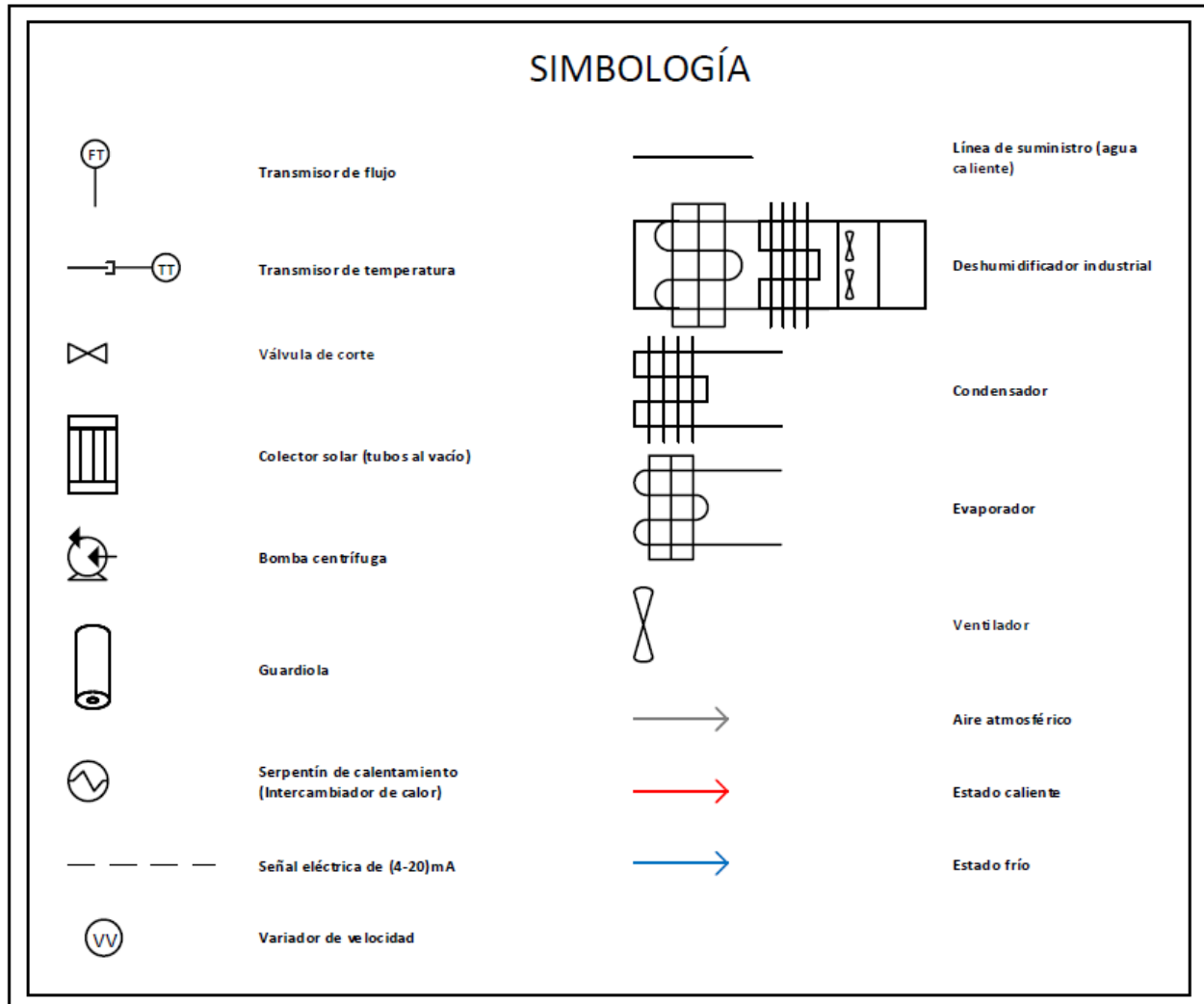
Seguidamente, se muestra en la **Figura 42** y **Figura 43** el esquema de la lógica de funcionamiento del sistema de control y la simbología correspondiente a los elementos utilizados, respectivamente.

Figura 42. Esquema: lógica de funcionamiento del sistema de control.



Fuente: Elaboración propia (2021)

**Figura 43. Elementos del esquema de control.**



**Fuente:** Elaboración propia (2021)

Finalizada la etapa de dimensionamiento y diseño del sistema de secado, fue posible efectuar el análisis financiero, en el cual se logró determinar que, económicamente el proyecto no es viable, al dar una Tasa Interna de Retorno igual a 1%, un VAN de ahorro igual a **¢50 067 828.21** y un VAN del proyecto por menos **¢39 347 268.80**. Lo anterior a motivo del alto costo del deshumidificador industrial y su exigente consumo energético, que se traduce en un aumento en la facturación de electricidad.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acedo Sánchez, J. (2007). *Instrumentación y control básico de procesos*. Ediciones Díaz de Santos. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/53133>
- Allen, F., Myers, S., Brealey, R. (2010). *Principios de finanzas corporativas*. (9<sup>na</sup>. ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Apuy, M., Belhumeur, Sebastien. (2015). *Optimización del proceso de deshumidificación del producto CHISPA enciendefuegos mediante el diseño de un secador para la empresa EMERGE S.A.* (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/7469/1/39347.pdf>
- Balestrini, M. (2006). *Cómo se elabora el proyecto de investigación*. (7<sup>a</sup>. Ed.). Caracas, Venezuela: BL Consultores Asociados.
- Barboza, S. (2016). *Estudio de prefactibilidad para la instalación de un microbeneficio de café en Patarrá de Desamparados*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/5391/1/39636.pdf>
- Caballero, J. (2015). *Diseño de una secadora de cacao para almacenaje con capacidad de 2 T/día*. (Tesis de bachillerato). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Recuperado de: <http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/6199>
- Cahuana, M. (2014). *Psicrometría y acondicionamiento del aire, análisis de alimentos y preparación de muestra, elaboración de néctar, zumos y concentrados*. (Tesis de bachillerato). Universidad Nacional de San Agustín, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/4170/IAatoms021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Camacho, S., Ramírez, O. (2015). *Diseño de un secador para café mediante el calentamiento del aire en dos etapas utilizando energía solar*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/3125/1/38678.pdf>
- Cambronero, A. (2019). *Diseño de un sistema de energía solar para agua de reposición de calderas*. (Tesis de maestría). Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de:

<http://www.kerwa.ucr.ac.cr/bitstream/handle/10669/79117/Dise%C3%B1o%20de%20un%20Sistema%20de%20Energ%C3%ADa%20Solar%20para%20Agua%20de%20Reposici%C3%B3n%20de%20Calderas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cárdenas, R., Hernández, Christian. (2003). *Construcción de un prototipo de humidificación adiabática de aire para ensayos en el laboratorio de refrigeración y aire acondicionado de la Tecnológica de Bolívar*. (Tesis de ingeniero mecánico). Universidad Tecnológica de Bolívar, Colombia. Recuperado de: <https://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0018980.pdf>

Castro, M., Tomas, Á., Ortolá, M., Fito, S. (2018). *Utilización del diagrama de Mollier de presión-entalpía para sistemas frigoríficos*. Universitat Politècnica de València, España. Recuperado de: <https://riunet.upv.es/handle/10251/104051>

Cengel, Y., & Boles, M. (2006). *Termodinámica*. (5<sup>ta</sup> ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.

Cengel, Y., & Boles, M. (2012). *Termodinámica*. (7<sup>ma</sup> ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.

COOPESANTOS R.L. (2020). Recuperado de: <https://www.coopesantos.com/tarifas/>

De la O, V. (2006). *Diseño e implementación de un sistema de control automático de temperatura y sensado de humedad para secadora de granos y semillas*. (Tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/536/De%20la%20O%20Vargas%20Alonso.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Empresa consultora Consulsantos S.R.L. (2010). *Manual de buenas prácticas de manufactura en el Beneficio Don Mayo*. MAG, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q02-5841.pdf>

Espinoza, V., Menjívar, A., Najarro, Á. (2018). *Diseño, construcción y caracterización de un secador de granos de café, utilizando la energía térmica contenida en fluidos geotérmicos*. (Tesis de ingeniero mecánico). Universidad de El Salvador, El Salvador. Recuperado de: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/16294/1/Dise%C3%B1o%20construcci%C3%B3n%20y%20caracterizaci%C3%B3n%20de%20secador%20de%20granos%20de%20café%20C%20utilizando%20la%20energ%C3%ADa%20t%C3%A9rmica%20contenida%20en%20fluidos%20geot%C3%A9rmicos.pdf>

European Commission. (2020). *Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS)*. Recuperado de: <https://ec.europa.eu/jrc/en/pvgis>

- García Gutiérrez, L. (2014). *Instrumentación básica de medida y control*. AENOR - Asociación Española de Normalización y Certificación. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/53600>
- García Moreno, E. (2020). *Automatización de procesos industriales: robótica y automática*. Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/129686>
- Gómez, A. (2013). *Climatología y series climáticas*. Recuperado de: <http://www.andresgomezmeteo.com/climatologia-y-series-climaticas/#:~:text=Las%20series%20clim%C3%A1ticas%20son%20por,%3A%20anual%2C%20mensual%20o%20diaria>
- Grajales, W. (2019). *Diseño, construcción y evaluación de un secador solar rotatorio*. (Tesis de maestría). Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, México. Recuperado de: <https://repositorio.unicach.mx/bitstream/handle/20.500.12753/723/2261.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Granda Miguel, M. y Mediavilla Bolado, E. (2015). *Instrumentación electrónica: transductores y acondicionadores de señal*. Editorial de la Universidad de Cantabria. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/53391>
- Guerrero, V. (2015). *Análisis estadístico de series de tiempo para investigación sobre cambio climático*. Instituto Tecnológico Autónomo de México, México. Recuperado de: [http://www.pincc.unam.mx/rednacionaldecc/DOCU\\_CLIMARED/economia/ITAM\\_victor\\_guerrero.pdf](http://www.pincc.unam.mx/rednacionaldecc/DOCU_CLIMARED/economia/ITAM_victor_guerrero.pdf)
- Hernández, R., Fernández, C., Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6<sup>ma</sup>. ed.). México: McGraw Hill.
- Huamán, L., Mamani, E. (2019). *Diseño e implementación de un prototipo de secador de café automatizado*. (Tesis de bachillerato). Universidad Ricardo Palma, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.urp.edu.pe/handle/URP/2444>
- Ing. Umaña, G. (2014). *Guía para el establecimiento de módulos para microbeneficio de café*. MAG, Costa Rica. Recuperado de: <http://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/Q70-10721.pdf>
- Instituto del Café de Costa Rica. (2020). *Informe Sobre la Actividad Cafetalera de Costa Rica*. (XLIX Congreso Nacional Cafetalero Ordinario). Icafe. Recuperado de:

[http://www.icafe.cr/wp-](http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera.pdf)

[content/uploads/informacion\\_mercado/informes\\_actividad/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera.pdf](http://www.icafe.cr/wp-content/uploads/informacion_mercado/informes_actividad/actual/Informe%20Actividad%20Cafetalera.pdf)

Inteva Energía Solar. (2018). *Colector solar de 30 tubos de vacío*. Recuperado de: <https://inteva.com.ar/producto/colector-solar-de-tubos-de-vacio-30-tubos/>

Jiménez Bernal, J. A. y Claudia del Carmen Gutiérrez Torres. (2015). *Termodinámica*. Grupo Editorial Patria. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/39466>

Lara, J. (2018). “Inversión se aleja de Costa Rica para no pagar la electricidad más cara del Istmo”. *La Nación*. Recuperado de: <https://www.nacion.com/el-pais/infraestructura/inversion-se-aleja-de-costa-rica-para-no-pagar-la/MGUYTB5IBVC5ZPFR5NWKJAEEM/story/>

Loja, G. (2019). *Sistema automático de secado de granos de café accionado con energía solar*. (Tesis de bachillerato). Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú. Recuperado de: [http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14882/LOJA\\_ACU%203%91A\\_GILBERTH\\_ANDRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/14882/LOJA_ACU%203%91A_GILBERTH_ANDRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Mauricio, J. A. (2007). *Introducción al análisis de Series Temporales*. Universidad Complutense de Madrid, España. Recuperado de: <https://www.ucm.es/data/cont/docs/518-2013-11-11-JAM-IASST-Libro.pdf>

Ministerio de Comunicación. (2019). País afina su camino a la carbono neutralidad con nuevo programa país. Presidencia de la República de Costa Rica, Gobierno del Bicentenario, 2018-2022. Recuperado de: <https://www.presidencia.go.cr/comunicados/2017/09/pais-afina-su-camino-a-la-carbono-neutralidad-con-nuevo-programa-pais/#:~:text=El%20nuevo%20Programa%20Pa%C3%ADs%20de,cero%20emisiones%20de%20gases%20de>

Molina, J. (2016). *Evaluación de un sistema de flujo forzado para secado de granos de café con uso de colectores solares elaborados con latas de aluminio*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/8886/1/39805.pdf>

Mora, A. (2014). *Dimensionamiento, construcción y puesta en marcha de un sistema de secado de granos de café con uso de colectores solares*. (Tesis de licenciatura). Universidad de Costa

- Rica, Costa Rica. Recuperado de:  
<http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/3501>
- Muñoz Razo, C. (2018). *Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*. (2<sup>da</sup> ed.). Pearson Educación. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/37852>
- Ogata, K. (2010). *Ingeniería de control moderna*. (5<sup>ta</sup> ed.). España: Pearson.
- Onosi Solar. (2019). Colector solar de placa plana. Recuperado de: [https://es.onosisolar.com/flat-plate-collector\\_46.html](https://es.onosisolar.com/flat-plate-collector_46.html)
- Organización Internacional del Café (OIC). Recuperado de:  
[http://www.ico.org/mission07\\_e.asp?section=About\\_Us](http://www.ico.org/mission07_e.asp?section=About_Us)
- Organización Mundial de la Salud. (2018). Micotoxinas. OMS. Recuperado de:  
<https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/mycotoxins>
- Pacheco M. (2019). *Diseño de un secador geotérmico de café*. (Tesis de ingeniero mecánico). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de:  
[https://repositorio.unam.mx/contenidos/disen-de-un-secador-geotermico-de-cafe-3455317?c=4EkvQp&d=false&q=\\*&i=1&v=1&t=search\\_0&as=0](https://repositorio.unam.mx/contenidos/disen-de-un-secador-geotermico-de-cafe-3455317?c=4EkvQp&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0)
- Procuraduría General de la República. (2005, 28 de abril). *Ley de Incentivos para la Producción Industrial Anexo A del Arancel Centroamericano de importación. Sistema Costarricense de Información Jurídica*. Recuperado de:  
[http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=55099&nValor3=102345&strTipM=TC](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=55099&nValor3=102345&strTipM=TC)
- Procuraduría General de la República. (2019, 14 de mayo). Metodología costo variable de generación o CVG. Sistema Costarricense de Información Jurídica. Recuperado de:  
[http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=88836&nValor3=116334&strTipM=TC#:~:text=El%20CVG%20es%20un%20componente,de%20combustible%20para%20la%20operaci%C3%B3n](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=88836&nValor3=116334&strTipM=TC#:~:text=El%20CVG%20es%20un%20componente,de%20combustible%20para%20la%20operaci%C3%B3n)
- Puerta, G. (2006). La humedad controlada del grano preserva la calidad del café. Cenicafé. <https://biblioteca.cenicafe.org/handle/10778/418>
- Red de Técnicos de Beneficiado de PROMECAFE. (2010). Guía técnica para el beneficiado de café protegido bajo una indicación geográfica o denominación de origen. IICA, Guatemala.

- Recuperado de:  
<https://repositorio.iica.int/bitstream/handle/11324/14124/BVE21011258e.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ríos, G. (2008). Series de tiempo. Universidad de Chile, Chile. Recuperado de:  
[https://www.ucursos.cl/ingenieria/2010/1/CC52A/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=296003](https://www.ucursos.cl/ingenieria/2010/1/CC52A/1/material_docente/bajar?id_material=296003)
- Siles, D. (2007). *Investigación sobre el efecto de la humedad, la temperatura y el caudal de aire en el tiempo de secado del café en guardiola*. Tesis de licenciatura para optar por el título de Ingeniero en Electrónica. Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de:  
<https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/319/Informe%20Final.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Smith, C. (2002). AUTOMATED CONTINUOUS PROCESS CONTROL. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.
- Soto, M. (2014). *Diseño de un modelo de gestión de mantenimiento para el equipo mecánico del beneficio de café, diseño de un taller y bodega de mantenimiento del beneficio de café*. (Tesis de licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica. Recuperado de:  
[https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3349/modelo\\_gestion\\_beneficio\\_cafe.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/3349/modelo_gestion_beneficio_cafe.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Tobajas, M. C. (2017). *Energía solar térmica para instaladores*. (5<sup>ta</sup>. ed.). Cano Pina. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/45042>
- Torres, V. (2019). “Tiempo, clima y los fenómenos atmosféricos: desde torbellinos hasta cambio climático”. *Publicación*. (Revista Digital Universitaria UNAM), vol. 20, Núm. 1. Recuperado de: <http://doi.org/10.22201/codeic.16076079e.2019.v20n1.a3>
- Umaña, V. (2021). “El sesgo antiagrícola”. *La Nación*. Recuperado de:  
<https://www.nacion.com/opinion/columnistas/pagina-quince-el-sesgo-antiagricola/FFZ2ASOJ7BDWJMLAVSR5MH7LU4/story/>
- Villalobos Ordaz, G. (2006). *Medición y control de procesos industriales*. Instituto Politécnico Nacional. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/101703>

Zabalza Bribián, I. y Aranda Usón, A. (2009). Energía solar térmica. Prensas de la Universidad de Zaragoza. Recuperado de: <https://elibro.net/es/lc/bibliouia/titulos/42322>

## ANEXOS

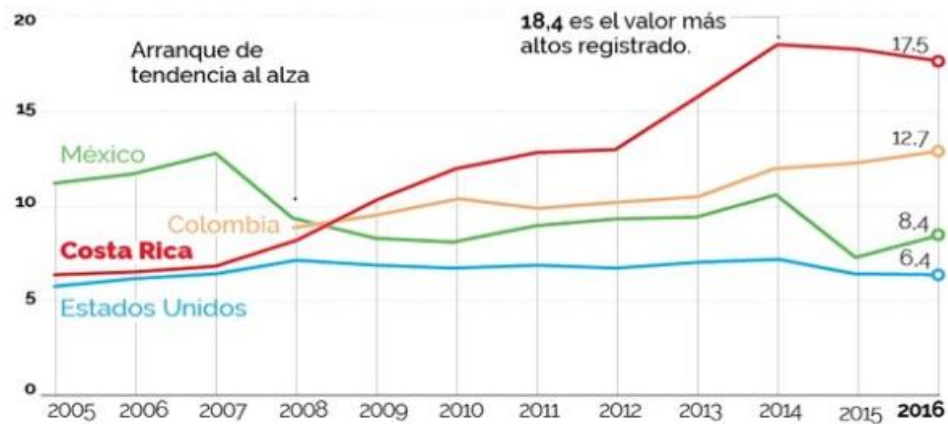
### Anexo A. Comportamiento de las Tarifas Eléctricas en cada país

#### Competitividad energética se apaga

El costo de la electricidad ha crecido en Costa Rica tanto que, en los últimos años, países vecinos y fuera de la región han ganado terreno atrayendo empresas que requieren uso intensivo de energía.

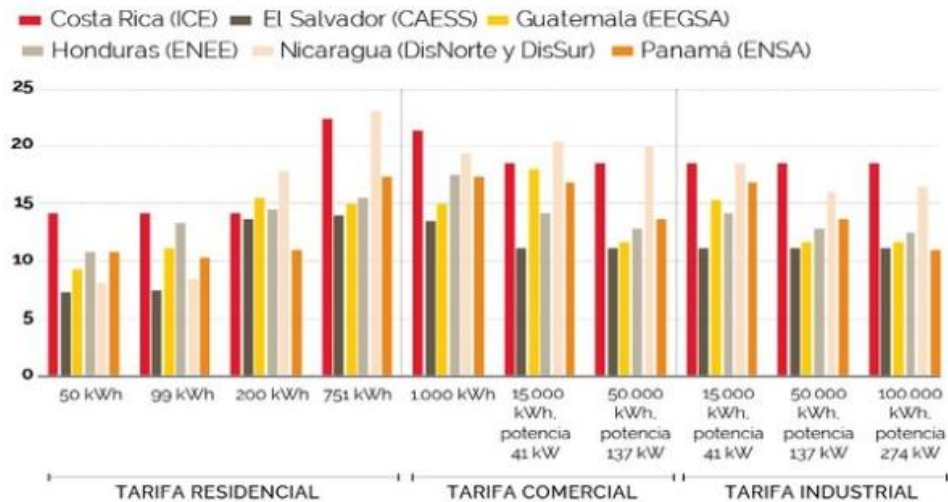
#### Tarifas eléctricas para el sector industrial

CIFRAS EN CENTAVOS DE DÓLAR POR KILOVATIO HORA (kWh)



#### Vecinos son más baratos

CIFRAS EN CENTAVOS DE DÓLAR POR KWH



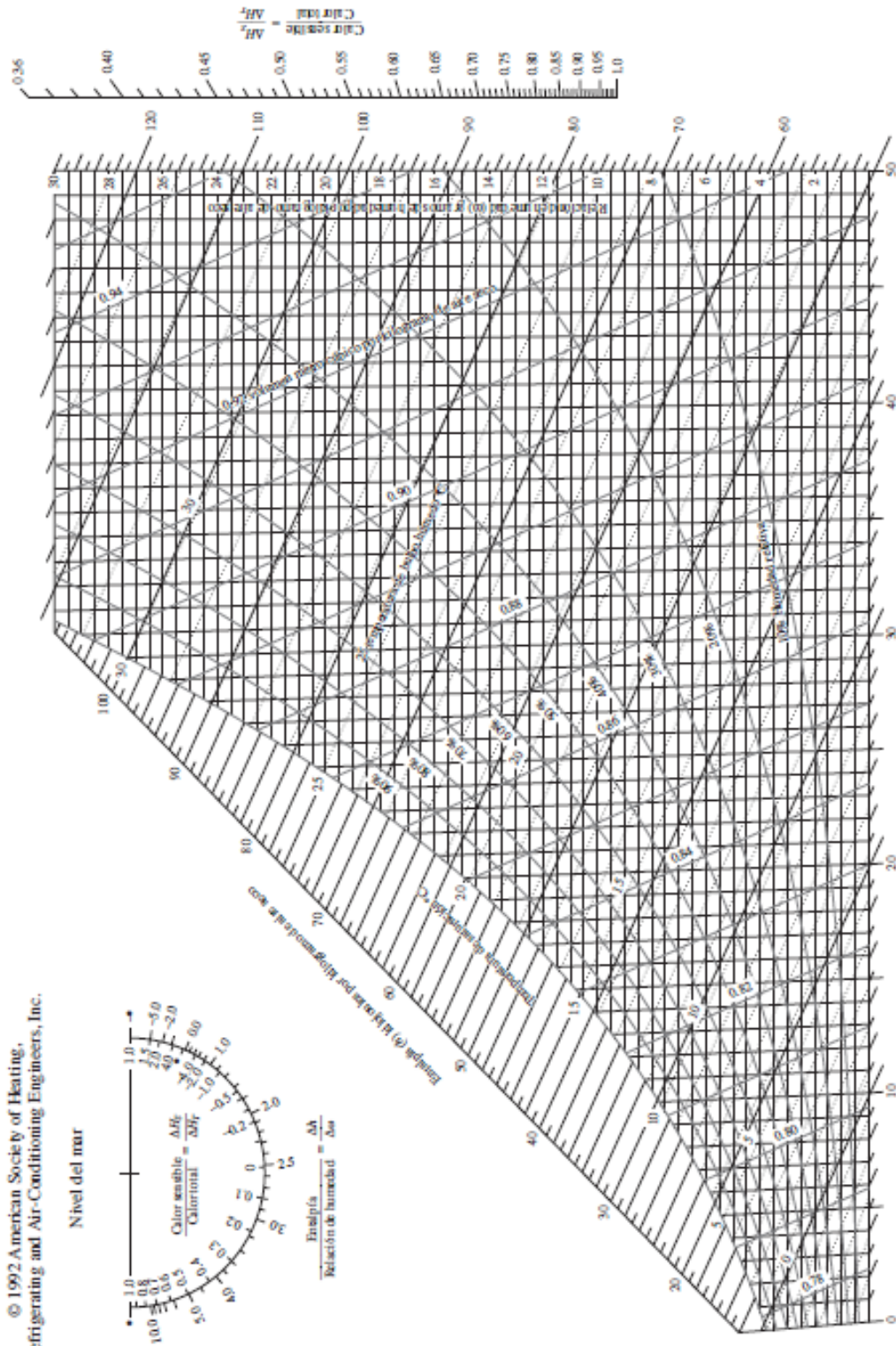
**Fuente:** La Nación (2018), citando a CEPAL y Coalición Costarricense de Iniciativas para el Desarrollo, CINDE.

Anexo B. Carta psicrométrica a 1 atm de presión total



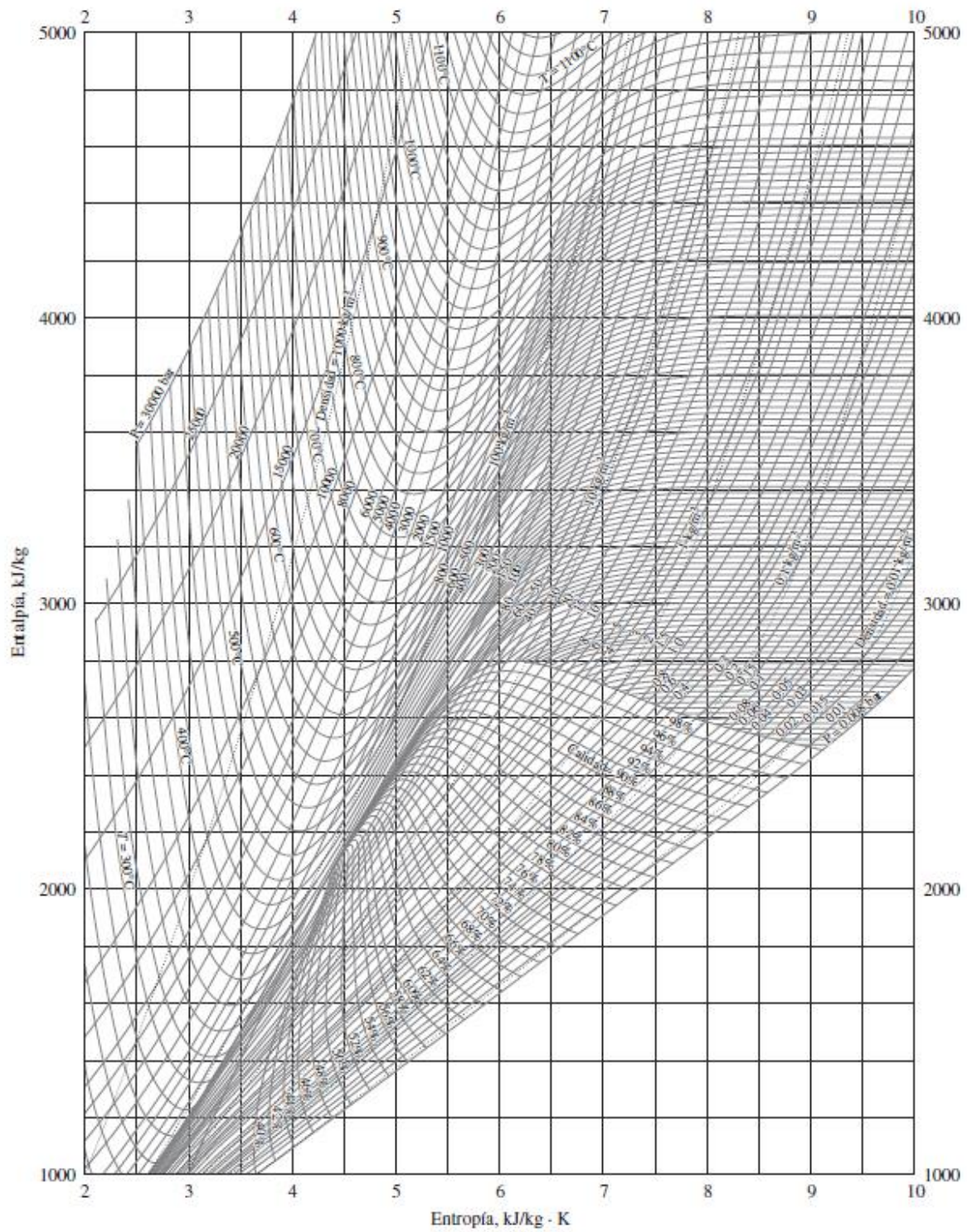
ASHRAE Gráfica psicrométrica núm. 1  
 Temperatura normal  
 Presión barométrica 101.325 kPa

© 1992 American Society of Heating,  
 Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.



Fuente: Cengel & Boles (2012)

### Anexo C. Diagrama de Mollier para el agua.



Fuente: Cengel & Boles (2012)

## Anexo D. Interfaz de interacción, herramienta de radiación solar (PVGIS)

The screenshot displays the PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System) web interface. At the top, there is a header with the European Commission logo and the text "PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM". Below the header, a navigation bar includes links for "Home", "Herramientas", "Descargas", "Documentación", and "Contáctanos".

The main area features a map of Ecuador with a location pin placed over Palmichal. The map includes a scale bar (5 km) and a search bar. Below the map, there are input fields for "Dirección:" (with "Eg. Ispra, Italy" and an "Iri" button) and "Lat/Lon:" (with "Eg. 45.815" and "Eg. 8.611" and an "Iri" button).

Below the map, there is a section for "Cursor:" with "Seleccionado: 9.837, -84.203" and "Elevación (m): 1155". To the right, there is a section for "Utilizar las sombras del terreno:" with a checked "Horizonte calculado" option and a "Cargar archivo de horizonte" option. There are also buttons for "csv" and "json" exports.

The "DATOS MENSUALES DE IRRADIACIÓN" panel is visible, showing a "Base de datos de radiación solar" dropdown set to "PVGIS-NSRDB". The "Año inicial:" and "Año final:" are both set to "2005". Under "Irradiación:", the "Irradiación global horizontal" option is checked. Under "Ratio:", the "Ratio difusa/global" option is unchecked. Under "Temperatura:", the "Temperatura media" option is checked.

At the bottom, there are buttons for "Visualizar resultados", "csv", and "json".

Fuente: (EU Science Hub, 2020)

## Anexo E. Tarifas eléctricas Coopesantos R.L

Alcance N° 83 del 28-04-2021 II TRIMESTRE

	Estructura sin CVG	29 de abril al 31 de junio	Diferencia II trimestre
<b>T-RE RESIDENCIAL</b>			
Primeros 200 kWh	78,22	77,42	0,8
Por cada kWh adicional	126,59	125,30	1,29
<b>T-GE GENERAL</b>			
<i>Menos de 3000 kWh</i>			
Por cada kWh	151,30	149,76	1,54
<i>Más de 3000 kWh</i>			
Mínimo 15 Kw	225 037,05	222 741,60	2 295,45
Por cada kW +	15 002,47	14 849,44	153,03
Mínimo 3000 kWh	274 770,00	271 980,00	2 790
Por cada kWh +	91,59	90,66	0,93
<b>T-CS PREFERENCIAL</b>			
Por cada kWh	108,07	106,97	1,1
de 251 kwk y más	151,30	149,76	1,54
<b>T-MT MEDIA TENSIÓN</b>			
<i>Cargo por Potencia</i>			
Periodo punta Por cada kW	11 007,92	10 895,64	112,28
Periodo valle por cada Kw	7 996,31	7 914,75	81,56
Periodo nocturno por cada kW	5 034,11	4 982,76	51,35
<i>Cargo por energía</i>			
Periodo punta por cada kWh	72,05	71,32	0,73
Periodo valle por cada kWh	28,85	28,53	0,32
Periodo nocturno por cada kWh	18,53	18,34	0,19
<b>T-AP ALUMBRADO PÚBLICO</b>	€ 3,78	€ 3,89	-€0,11

Fuente: (COOPESANTOS R.L, 2021)

**Anexo F Ficha técnica deshumidificador industrial, fabricante Alto**



**ALTAQUA Dehumidification system(G Series) specification**

Specification		G-60T
Total cooling capacity	kW	212.0
	ton	60.3
Sensible cooling capacity	kW	120.0
Total heat rejection	kW	271.8
Dehumidification capacity	L/hr	113.0
Supply air	cmh	24000
External static	Pa	200
Compressor consumption power	kW	59.8
Fan Motor consumption power	kW	7.2
Total consumption power	kW	67.0
Rated current	A	102.6
F.L.A	A	131.2
Power supply	V/Hz/Ph	440/60/3
Refrigerant	type	R410A
Air filter	type	G4
Protections	type	Phase Protection, High/Low Pressure Protection, Overload Protection, Compressor staged start, Compressor Auto-Protection, Fan Motor Auto-
Condenser drain pipe diameter	inch	1 1/2
Net Weight	kg	1900
Dimension(L*W*H)	mm	3500*2100*2350
<b>Air cooling with air cooled condenser</b>		
Total fan moter power	kW	4.8
Dimension(L*W*H)	mm	1460*760*1060
Net Weight	kg	130
Quantity to dehumidification system	Pcs	4
Unit Price (Exw Foshan)	USD	US\$55,980.00
Surcharge on air cooled condenser	USD	US\$6,842.00

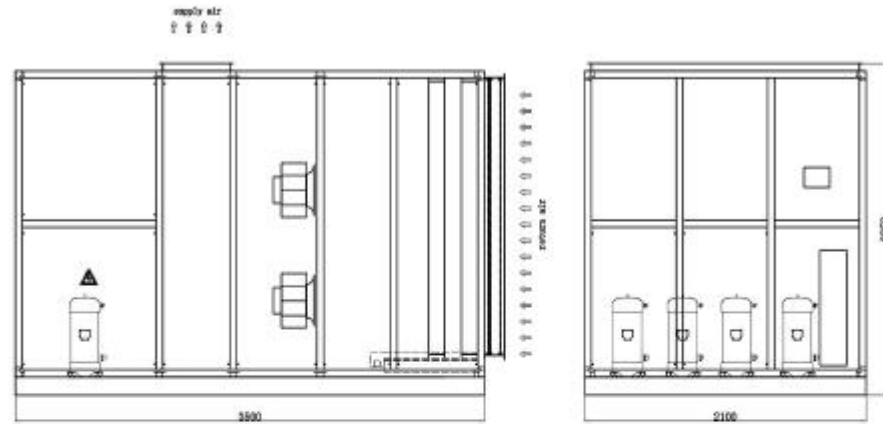
\*Test standard: Dry bulb temperature of 25℃, relative humidity of 60RH%.

**Main components for reference:**

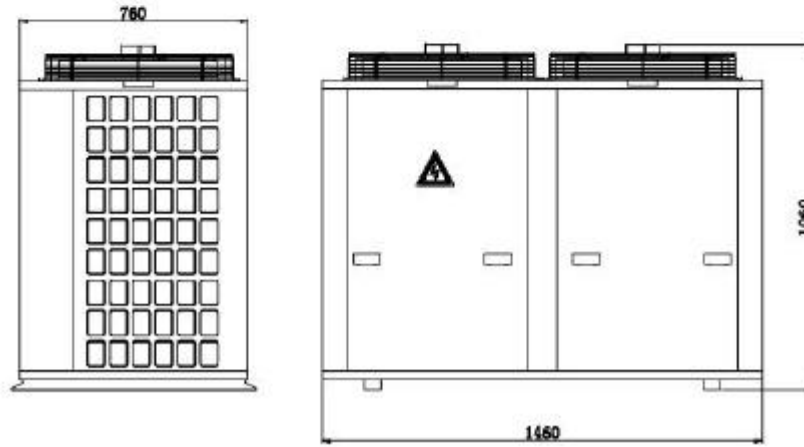
- 1.Compressor: Panasonic
- 2.Controller: German brand Siemens PLC controller
- 3.Expansion valve: Danfoss/ Emerson
- 4.Temperature/Humidity sensor: Swiss brand Vector
- 5.AC contactor:Siemens/Schneider
- 6.Relay:Siemens/Schneider
- 7.Cabinet: Galvalized double layer cabinet with 30mm polyester insulation
- 8.Filter dryer: Emerson
- 9,Oil separator:Emerson
- 10,Supply fan motor: German brand EBM EC fan

**Fuente:** (Alto Refrigeration Manufacturing Co., Ltd., 2021)

**Anexo G Representación gráfica del equipo, fabricante Alto**



Air cooled condenser



**Fuente:** (Alto Refrigeration Manufacturing Co., Ltd., 2021)

**Anexo H Deshumidificador industrial, fabricante Alto**

**Fuente:** (Alto Refrigeration Manufacturing Co., Ltd., 2021)

## Anexo I Deshumidificador industrial, fabricante Fisair, modelo IT 1900



14

# IT / ST

deshumidificadores para industria / piscinas  
con control de temperatura



### TECHNICAL DATA

### ID-SP-IT-ST

		1500	1700	1900	2200
Dehumidifying capacity	L/day	1480	1710	1870	2180
Refrigerant circuits	nr	2	2	2	2
Refrigerant	type	R410A	R410A	R410A	R410A
Supply air flow	m <sup>3</sup> /h	13000	15000	15000	17000
Available static pressure	Pa	200	200	200	200
Av. static pressure (high)	Pa	300	300	300	300
Av. static pressure (radial fan)	Pa	450	480	480	450
Cooling capacity (only model IT & ST)	kW	75	86	96	110
Water coil heating capacity	kW	98	107	107	118
Electrical heaters capacity ON/OFF	kW	upon request	upon request	upon request	upon request
Power supply	V/ph/Hz	400/3+N/50	400/3+N/50	400/3+N/50	400/3+N/50
Sound pressure level (1 m from source, free field)	dB(A)	70	71	71	72
Dimensions ID SP – LxDxH	mm	1000x2500x1640	1000x2500x1640	1000x2500x1640	1000x2500x1640
Dimensions IT ST – LxDxH	mm	1000x2500x1900	1000x2500x1900	1000x2500x1900	1000x2500x1900
Weight	Kg	780	840	900	950
Remote condenser dimensions – LxPxH	mm	3800x900x1144	3800x900x1144	3800x900x1144	3800x900x1144
Condenser Weight	Kg	332	332	332	332

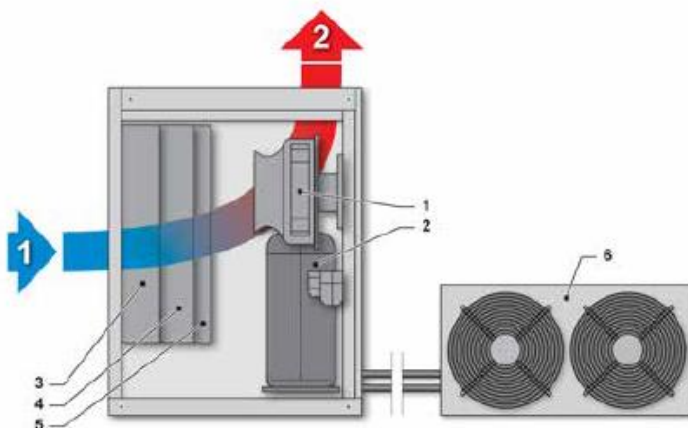
Fuente: (Fisair air humidity control, 2021)

### Anexo K Funcionamiento deshumidificador industrial, fabricante Fisair

serie DFC IT / ST deshumidificadores para industria / piscinas con control de temperatura



- 1. Ventilador de recirculación
- 2. Compresor
- 3. Bateria del evaporadora
- 4. Bateria del condensadora
- 5. Bateria de post-calentamiento (opcional)
- 6. Condensador externo



Fuente: (Fisair air humidity control, 2021)

### Anexo J Precios en (euros), modelos Fisair



**María Fernanda Rojas**

para mí ▾

Buen día Francisco,

Adjunto documento con la información técnica de los modelos solicitados.

El modelo 1500 está disponible con conexión a 230/3/60 ó 460/3/60

El 1700, 1900 y 2200 sólo con conexión a 380/3/60 ó 460/3/60

Estos son los precios (Euros) para conexión a 400/3/50, entregados en nuestra fábrica de Madrid

1500	1700	1900	2200
32.650,00 €	34.000,00 €	35.000,00 €	38.300,00 €
33.300,00 €	34.700,00 €	35.650,00 €	39.700,00 €

Los precios varían un poco dependiendo de la conexión requerida.

Quedo atenta.

Cordial saludo,

Fuente: (Fisair air humidity control, 2021)

## Anexo L Vida útil, modelos del fabricante Fisair

María Fernanda Rojas  
para mí ▾

15 jun 2021 8:15 (hace 9 días) ☆ ↶ ⋮

Buenos días Francisco,

La vida útil, tanto de los deshumidificadores por condensación como los de adsorción (rotor desecante), depende mucho del cuidado que tengan los equipos, del mantenimiento y el ambiente donde operen.

Si a los equipos se les hace un buen mantenimiento (mínimo dos veces por año) y funcionan en ambientes poco contaminados pueden durar hasta 10 años (los de condensación) y podría ser hasta 15 años (los de rotor).

Adjunto la ficha técnica del equipo DFLEX2900V, donde podrá encontrar el consumo de vapor (ya que la reactivación es con vapor) y la potencia eléctrica. El precio de lista de este equipo está alrededor de 86.000€ EXW – Madrid, tiene unas dimensiones aproximadas de: Largo: 6m. Ancho: 2,2m. Alto: 1,9m.

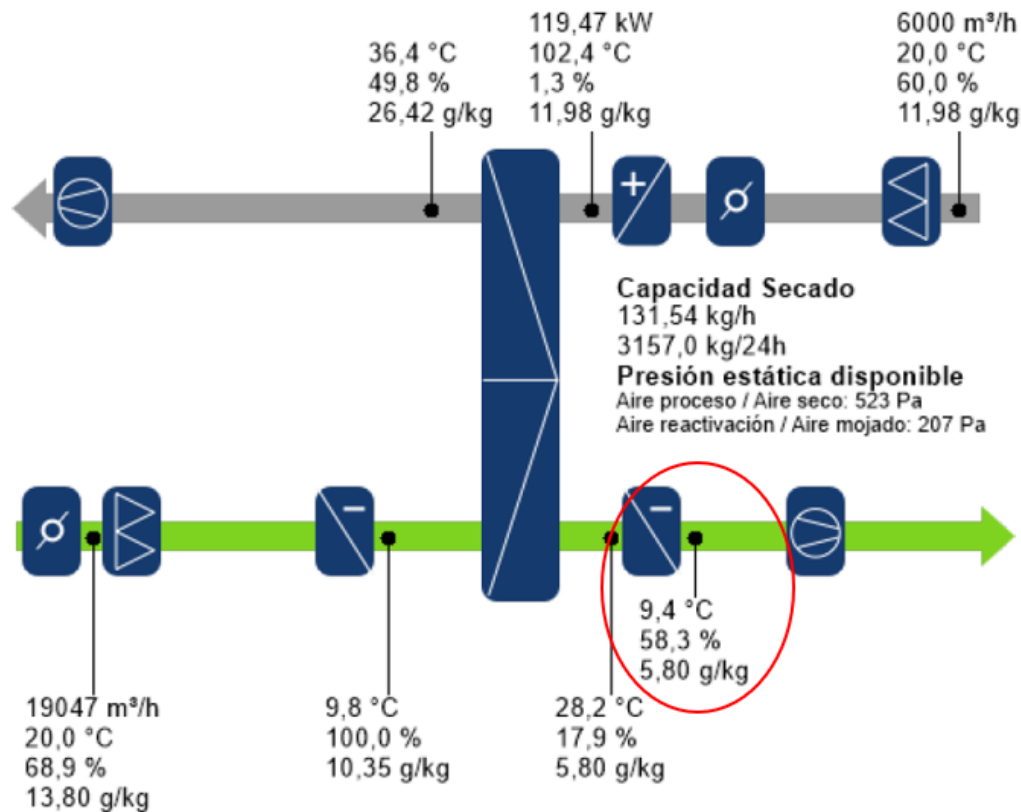
Espero esta información sea de utilidad.

Recibe un cordial saludo,

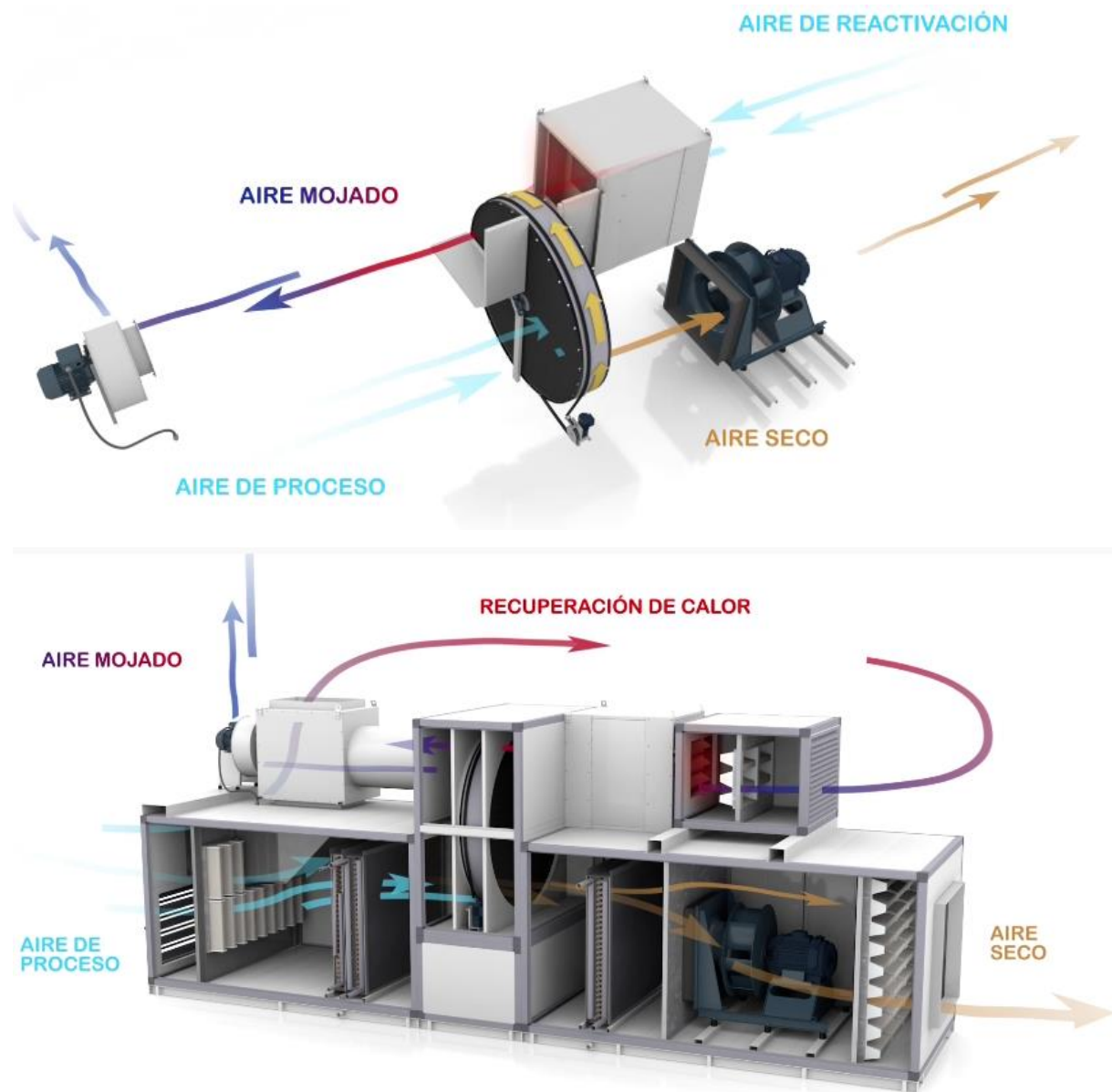
...

**Fuente:** (Fisair air humidity control, 2021)

## Anexo M Esquema de funcionamiento deshumidificador industrial por rotor desecante, fabricante Fisair, modelo DFLEX2900V



**Fuente:** (Fisair air humidity control, 2021)

**Anexo N Principio operativo rotor desecante, fabricante Fisair.**

Enlace de consulta, <https://fisair.com/wp-content/uploads/2021/04/CTSX-ES-21-1EU.pdf>.

**Fuente:** (Fisair air humidity control, 2021)

**Anexo O Temperatura ambiente en °C (perfil de temperatura media diaria) e irradiancia global sobre plano fijo [W/m2]. Obtenidos a través de la base de datos PVGIS.**

**DICIEMBRE**

**Irradiancia media diaria sobre plano fijo**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>G(i)</b>	0	0	0	0	0	0	11	238	459	642	749	741	697	614	468	332	198	11	0	0	0	0	0	0

**Perfil de temperatura media diaria**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>T2m</b>	16.02	15.87	15.72	15.57	15.55	15.53	15.5	17.4	19.29	21.19	21.93	22.66	23.4	22.69	21.99	21.28	20.41	19.53	18.63	18.04	17.46	16.87	16.59	16.3

T2m: Perfil de temperatura media diaria [°C].

**ENERO**

**Irradiancia media diaria sobre plano fijo**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>G(i)</b>	0	0	0	0	0	0	0	226	479	685	836	870	847	736	592	440	286	96	0	0	0	0	0	0

**Perfil de temperatura media diaria**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>T2m</b>	15.58	15.37	15.17	14.97	15.01	15.06	15.1	17.36	19.63	21.89	22.98	24.07	25.15	24.43	23.71	22.98	21.73	20.47	19.21	18.4	17.58	16.76	16.37	15.97

T2m: Perfil de temperatura media diaria [°C].

**FEBRERO**

**Irradiancia media diaria sobre plano fijo**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>G(i)</b>	0	0	0	0	0	0	1	226	485	706	858	925	900	797	617	488	309	135	0	0	0	0	0	0

**Perfil de temperatura media diaria**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>T2m</b>	15.6	15.36	15.13	14.89	14.92	14.95	14.98	17.56	20.15	22.74	23.87	24.96	26.12	25.33	24.53	23.74	22.38	21.03	19.67	18.77	17.87	16.97	16.52	16.06

T2m: Perfil de temperatura media diaria [°C].

**MARZO**

**Irradiancia media diaria sobre plano fijo**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>G(i)</b>	0	0	0	0	0	0	18	249	499	718	879	919	865	734	598	437	262	113	0	0	0	0	0	0

**Perfil de temperatura media diaria**

<b>Hora</b>	00:45	01:45	02:45	03:45	04:45	05:45	06:45	07:45	08:45	09:45	10:45	11:45	12:45	13:45	14:45	15:45	16:45	17:45	18:45	19:45	20:45	21:45	22:45	23:45
<b>T2m</b>	16.07	15.77	15.47	15.18	15.24	15.3	15.37	18.04	20.72	23.39	24.41	25.43	26.45	25.48	24.52	23.56	22.34	21.12	19.89	19.1	18.31	17.51	17.03	16.5

T2m: Perfil de temperatura media diaria [°C].

**Fuente: (EU science hub, 2020)**

## Anexo P Colector solar tubos de vacío, modelo vitosol 300-TM

### Datos técnicos

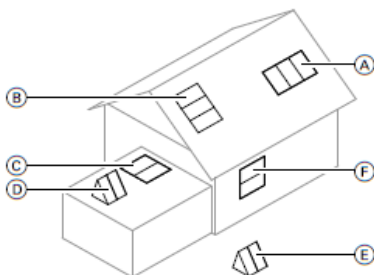
#### Datos técnicos

Modelo SP3C		1,25 m <sup>2</sup> HW	1,51 m <sup>2</sup>	3,03 m <sup>2</sup>
Número de total:		10	12	24
Superficie bruta	m <sup>2</sup>	1,98	2,36	4,61
Superficie de absorción	m <sup>2</sup>	1,25	1,51	3,03
Superficie de apertura	m <sup>2</sup>	1,33	1,60	3,19
<b>Dimensiones</b>				
Anchura a	mm	885	1052	2060
Altura b	mm	2244	2244	2244
Profundidad c	mm	150	150	150
Los siguientes valores hacen referencia a la superficie de apertura:				
- Rendimiento óptico	%	75,0	75,2	74,0
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K)	1,432	1,906	1,668
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0,025	0,006	0,007
Los siguientes valores hacen referencia a la superficie total::				
- Rendimiento óptico	%	50,4	51,0	51,4
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K)	0,962	1,292	1,158
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0,017	0,004	0,005
Capacidad térmica	kJ/(m <sup>2</sup> · K)	4,20	3,98	6,34
Peso	kg	33	39	79
Volumen de líquido (medio portador de calor)	Litros	0,75	0,87	1,55
Presión de servicio admisible	bar/MPa	6/0,6	6/0,6	6/0,6
Durante la instalación de una válvula de seguridad de 8 bar (accesorio)	bar/MPa	8/0,8	8/0,8	8/0,8
Temperatura máx. de inactividad	°C	155	155	155
Capacidad de producción de vapor	W/m <sup>2</sup>	0	0	0
Conexión	Ø mm	22	22	22

#### Datos técnicos para determinar la clase de eficiencia energética (etiqueta ErP)

Modelo SP3C		1,25 m <sup>2</sup> HW	1,51 m <sup>2</sup>	3,03 m <sup>2</sup>
Superficie total:	m <sup>2</sup>	1,33	2,36	4,61
Los siguientes valores hacen referencia a la superficie de apertura:				
- Rendimiento del colector η <sub>col</sub> , con una diferencia de temperatura de 40 K	%	43	45	46
Rendimiento óptico	%	49,9	50,4	51,3
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>1</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K)	0,96	1,29	1,16
- Coeficiente de pérdida de calor k <sub>2</sub>	W/(m <sup>2</sup> · K <sup>2</sup> )	0,017	0,004	0,005
Factor de corrección de ángulo IAM		1,02	1,02	1,03

Posición de montaje (consultar la siguiente figura) (F) (A, B, C, D, E, F)



**VISSMANN**

**VITOSOL 300-TM**

Colector de tubos de vacío según el principio Heatpipe para el uso de la energía solar

Fuente: (Viessmann, 2021)

## Anexo Q Colector solar de placa plana, modelo SACLIMA L-21

CAPTADORES MODELO E-21 / L-21

SACLIMA

### E-21

Dimensiones	mm	1988X1041X90
Peso en Vacío	Kg	37,2
Capacidad primario	Lit.	1,7
Superficie total	m <sup>2</sup>	2,07
Superficie de apertura	m <sup>2</sup>	1,92
Rendimiento		0,785
Contraseña de certificación		NPS-10013

### L-21

Dimensiones	mm	1990X1222X91
Peso en Vacío	Kg	44
Capacidad primario	Lit.	1,7
Superficie total	m <sup>2</sup>	2,43
Superficie de apertura	m <sup>2</sup>	2,23
Rendimiento		0,785
Contraseña de certificación		NPS-46613

### CARCASA

Material Aluminio 6603-60 (AlMgSiO5) según norma EN 12975-1-2

### ABSORBEDOR

Tipo		Parrilla de tubos
Material tubo/aleta		cobre
Ø Colector sup./inf.	mm	18/22/24
Presión máxima	bar	10
Acabado absorbedor		Almecco-Tinox
Área total	m <sup>2</sup>	2,07
Área de apertura	m <sup>2</sup>	1,92
Caudal recomendado	Lit./hm <sup>2</sup>	50-60
Pérdida de carga	mm.c.a	16 (Tª amb. y 2 l/min)
Espesor	mm	0,40
Absorbancia	%	95
Reflectancia	%	3
Soldadura		Laser

### ASLAMIENTO

Material		Lana de roca
Espesor	mm	40
Conductividad Térmica	W/(mk)	0,037

### RACORES UNIÓN

Tipo		Flexible metálica en acero inoxidable
Diámetro ext. unión	mm	18/22/24
Longitud unión	mm	40
Distancia entre captadores	mm	66

### CRISTAL

Tipo		Vidrio templado bajo en hierro
Espesor	mm	4
Transmitancia del vidrio	%	91

### RENDIMIENTO

Norma		UNE EN 12975
Rendim. Óptico		0,785
a <sub>0</sub>	W/m <sup>2</sup> C	3,722
a <sub>1</sub>		0,012
Tª de estancamiento	°C	203



Ensayado y testado por el Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial INTA

Fuente: SACLIMA (2021)

## APÉNDICES

### Apéndice A Valores del cálculo energético del sistema termosolar (Modelo Vitosol)

DICIEMBRE				
HORA	G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
07:45	238	17.4	0.48	114.30
08:45	459	19.29	0.61	281.83
09:45	642	21.19	0.66	421.21
10:45	749	21.93	0.67	501.92
11:45	741	22.66	0.67	497.50
12:45	697	23.4	0.67	466.46
13:45	614	22.69	0.66	403.59
14:45	468	21.99	0.63	294.11
15:45	332	21.28	0.58	192.00
16:45	198	20.41	0.46	91.03
17:45	11	19.53	-4.47	-49.18
<b>Total</b>	<b>5138.00</b>	<b>212.24</b>		<b>3263.97</b>

ENERO			
G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
226	17.36	0.47	105.34
479	19.63	0.62	297.35
685	21.89	0.66	454.48
836	22.98	0.68	568.46
870	24.07	0.68	595.84
847	25.15	0.69	581.01
736	24.43	0.68	497.41
592	23.71	0.66	389.39
440	22.98	0.63	275.42
286	21.73	0.56	158.89
96	20.47	0.16	15.68
<b>6093.00</b>	<b>244.40</b>		<b>3939.27</b>

FEBRERO			
G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
226	17.56	0.47	105.76
485	20.15	0.62	302.87
706	22.74	0.67	471.77
858	23.87	0.68	586.56
925	24.99	0.69	638.40
900	26.12	0.69	622.18
797	25.33	0.68	544.37
617	24.53	0.66	409.55
488	23.74	0.64	312.49
309	22.38	0.57	177.25
135	21.03	0.34	45.70
<b>6446.00</b>	<b>252.44</b>		<b>4216.91</b>

MARZO				
G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )	HORA
249	18.04	0.50	123.80	07:45
499	20.72	0.63	314.42	08:45
718	23.39	0.67	481.98	09:45
879	24.41	0.69	603.19	10:45
919	25.43	0.69	634.85	11:45
865	26.45	0.69	596.94	12:45
734	25.48	0.68	498.05	13:45
598	24.52	0.66	395.47	14:45
437	23.56	0.63	274.38	15:45
262	22.34	0.54	142.39	16:45
113	21.12	0.26	29.61	17:45
<b>6273.00</b>	<b>255.46</b>		<b>4095.09</b>	<b>Total</b>

**Fuente:** (Elaboración propia, 2021)

### Apéndice B Valores del cálculo energético del sistema termosolar (Modelo Saclima)

DICIEMBRE				
HORA	G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
07:45	238	17.4	0.22	52.74
08:45	459	19.29	0.51	234.70
09:45	642	21.19	0.60	386.78
10:45	749	21.93	0.63	474.03
11:45	741	22.66	0.64	470.96
12:45	697	23.4	0.63	439.65
13:45	614	22.69	0.60	371.39
14:45	468	21.99	0.54	253.71
15:45	332	21.28	0.43	143.83
16:45	198	20.41	0.18	34.79
17:45	11	19.53	-10.54	-115.92
<b>Total</b>	<b>5138.00</b>	<b>212.24</b>		<b>2862.57</b>

ENERO			
G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
226	17.36	0.19	43.14
479	19.63	0.53	251.91
685	21.89	0.62	423.62
836	22.98	0.65	546.93
870	24.07	0.66	578.37
847	25.15	0.67	564.99
736	24.43	0.65	474.74
592	23.71	0.61	358.57
440	22.98	0.54	236.07
286	21.73	0.38	109.70
96	20.47	-0.47	-45.01
<b>6093.00</b>	<b>244.40</b>		<b>3588.05</b>

FEBRERO			
G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )
226	17.56	0.19	44.04
485	20.15	0.53	258.93
706	22.74	0.63	443.83
858	23.87	0.66	568.08
925	24.99	0.68	625.53
900	26.12	0.68	610.78
797	25.33	0.66	526.52
617	24.53	0.62	381.76
488	23.74	0.57	277.07
309	22.38	0.42	130.61
135	21.03	-0.09	-11.92
<b>6446.00</b>	<b>252.44</b>		<b>3867.15</b>

MARZO				
G(W/m <sup>2</sup> )	T amb ©	EFF (η)	Q/S (Wh/m <sup>2</sup> )	HORA
249	18.04	0.26	64.25	07:45
499	20.72	0.55	272.45	08:45
718	23.39	0.64	456.09	09:45
879	24.41	0.67	586.91	10:45
919	25.43	0.68	622.72	11:45
865	26.45	0.68	584.72	12:45
734	25.48	0.65	477.71	13:45
598	24.52	0.61	366.80	14:45
437	23.56	0.54	236.25	15:45
262	22.34	0.36	93.54	16:45
113	21.12	-0.25	-28.80	17:45
<b>6273.00</b>	<b>255.46</b>		<b>3761.44</b>	<b>Total</b>

Fuente: (Elaboración propia, 2021)