



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Modernización de la cámara climática utilizada para el proceso de calibración de
instrumentos de medición de temperatura y humedad de la empresa
METASDELECUADOR CIA. LTDA.**

Moreira Toapaxi, Edison Javier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero en Electrónica,
Automatización y Control

Ing. Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro, MSc.

21 de agosto del 2023



Plagiarism and AI Content Detection Report

Tesis_JavierMoreira_Urkund.pdf

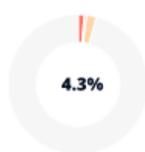


HUGO RAMIRO
ORTIZ TULCAN

Scan details

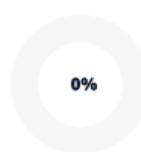
Scan time: August 21th, 2023 at 16:16 UTC Total Pages: 164 Total Words: 40919

Plagiarism Detection



Types of plagiarism		Words
Identical	1.4%	592
Minor Changes	0.5%	213
Paraphrased	2.3%	921
Omitted Words	0.9%	348

AI Content Detection



Text coverage		Words
AI text	0%	0
Human text	100%	40571

[Learn more](#)

🔍 Plagiarism Results: (40)

🌐 **Microsoft PowerPoint - PORTADAVIM6.ppt** 1.3%

<http://paginaspersonales.unam.mx/app/webroot/files/5404/...>

Sevilla

08 3a edición 2008 BIPM OFICINA INTERNACIONAL DE PESAS Y MEDIDAS IEC
COMISIÓN ELECTROTÉCNICA INTERNACIONAL IFCC FEDERACIÓN INTERNAC...

🌐 **procedimiento-especifico-pec16-calibracion-de-5f5d...** 0.5%

<https://xdoc.mx/preview/procedimiento-especifico-pec16-cal...>

Copia No Controlada Instituto Nacional de Tecnología Industrial Centro de
Desarrollo e Investigación en Física y Metrología Procedimient...

🌐 **RT03-P21_V4_copia_no_controlada.pdf** 0.5%

https://sigi.sic.gov.co/sigi/files/mod_documentos/documento...

Windows User

Código: RT03-P21 PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE
TERMOHIGRÓMETROS Versión: 4 Página 1 de 24 CONTENIDO 1 OBJETIVO...



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: **"Modernización de la cámara climática utilizada para el proceso de calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA."** fue realizado por el señor **Moreira Toapaxi, Edison Javier**; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 21 de agosto de 2023

Firma:



HUGO RAMIRO
ORTIZ TULCAN

Ing. Ortiz Tulcán, Hugo Ramiro, Mgs.

C. C. 1707721591



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Responsabilidad de Auditoría

Yo, **Moreira Toapaxi Edison Javier** con cédula de ciudadanía N° 1721346326, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **"Modernización de la cámara climática utilizada para el proceso de calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA."**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 21 de agosto del 2023

Moreira Toapaxi Edison Javier

C. C. 1721346326



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control

Autorización de Publicación

Yo, **Moreira Toapaxi Edison Javier** con cédula de ciudadanía N° 1721346326, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **"Modernización de la cámara climática utilizada para el proceso de calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA."**, en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 21 de agosto del 2023

Moreira Toapaxi Edison Javier

C. C. 1721346326

Dedicatoria

El presente trabajo lo quiero dedicar en primer lugar a Dios, que cuida y bendice mi camino todos los días, mantiene unida a mi familia, nos libra de enfermedades y a pesar de las adversidades siempre nos brinda una segunda oportunidad, una segunda oportunidad para mejorar lo que fuimos ayer, para tener la fortaleza de alcanzar aquellas metas propuestas o simplemente para sonreír :)

Va dedicado a usted Mom que jamás me ha dejado solo, que siempre ha estado ahí para mí, para reír, para llorar, para molestarnos, para abrazarnos. Este trabajo es producto de sus enseñanzas, de que el esfuerzo es bien recompensado, de que el sacrificio es lo único que nos saca adelante.

Va dedicado a usted Papito por ese amor al educarme, esa firmeza al enseñarme lo bueno y lo malo, esa paciencia para sobrellevar mi carácter, esa sonrisa y ese buen humor ante cualquier situación y ese ejemplo de honestidad, esfuerzo, sentido de justicia, liderazgo y resiliencia.

Va dedicado a ustedes Mamita Cochi y Papito Gin, mis abuelitos queridos que los amo con todo mi corazón, que siempre han estado ahí para mí, para brindarme algún consejo, un abrazo, un plato de comida, una sincera sonrisa, y lo más importante, por brindarme su bendición todos los días; Así también se lo quiero dedicar a toda mi familia, a todos sin excepción, por su confianza y apoyo incondicional en cada uno de mis logros y fracasos.

Va dedicado a mis queridas hermanas Liz y Damaris, las cuales siempre han cuidado de mí, yo confío mucho en ustedes porque estoy convencido de que son capaces de lograr lo que se propongan.

Agradecimiento

Mamita y Papito les agradezco el haberme educado como un hombre de bien, por educarme con valores y principios basados en el ejemplo, por enseñarme el valor del trabajo, del esfuerzo, del poder de una sonrisa y cómo influye en los demás: Mamita le agradezco por su apoyo incondicional, por su amor... “Íbamos los dos, en un gran barco de vapor, y que yo era el capitán hacía el país de la ilusión, y que orgullosa estabas tú”; Papito le agradezco por su amor, su cariño, su alegría, su carisma y empatía para tratar los demás, vivimos cantando: “pronto llegará el día de mi suerte” sin saber que soy el hombre más afortunado por tenerlo a mi lado. Agradezco a toda mi familia sin excepción, agradezco su cariño incondicional, sus consejos, sus regaños cuando no me portaba bien y sus felicitaciones cuando conseguía algún logro. Quiero agradecer infinitamente a la persona que sin tener ningún vínculo conmigo me hizo sentir como parte de su familia, como uno más de sus hijos, el cariño de una madre es único, pero hay ocasiones donde el cariño incondicional se siente tan familiar, tan cálido, Dios le pague Señora Lolita (+) por sus palabras de aliento cuando más lo necesité, cuando quise abandonar todo usted me alentó para seguir adelante para no abandonar mis sueños, que por más lejanos que parezcan algún día llegan a suceder, físicamente ya no está con nosotros, pero créame que he sentido su bendición y su abrazo en todo momento. La quiero mucho. A mis amigos de toda la vida, Pablo, Joha, Eri, Edwin, Jhosu, Kari, Isra, gracias por todos los momentos vividos, gracias por su cariño, gracias por las risas compartidas, por los viajes, las jodas, el baile, las anécdotas y lo que más nos gusta, la comida y la bebida Jaja Los quiero con todo mi corazón. Finalmente, agradezco infinitamente al Ing. Hugo Ortiz, MSc. por su orientación, ayuda constante y compromiso con la educación de calidad en la etapa profesionalizante de la carrera, ya que sus enseñanzas como profesor y tutor de tesis representan un aporte significativo para mi desarrollo profesional. Así también agradezco a la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE, por su compromiso con la educación ecuatoriana de calidad y su constante crecimiento para el beneficio de la educación ecuatoriana.

Índice de Contenido

Informe de Originalidad	2
Certificación de Trabajo de Titulación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimiento	7
Resumen.....	25
Abstract.....	26
Capítulo I.....	27
Generalidades.....	27
Antecedentes	27
Justificación e Importancia.....	30
Alcance.....	34
<i>Etapa de Análisis Metodológico</i>	35
<i>Etapa de Diseño</i>	35
<i>Etapa de Implementación</i>	38
<i>Etapa de Pruebas</i>	38
Objetivos	39
<i>Objetivo General</i>	39
<i>Objetivos Específicos</i>	39

Capítulo II.....	40
Marco Referencial	40
Metrología	40
<i>Fundamentos.....</i>	<i>40</i>
<i>Cantidades/Magnitudes</i>	<i>40</i>
<i>Unidades y escalas.....</i>	<i>42</i>
<i>Trazabilidad metrológica.....</i>	<i>42</i>
<i>Incertidumbre.....</i>	<i>43</i>
<i>Tolerancia.....</i>	<i>44</i>
<i>Exactitud y precisión de medición.....</i>	<i>45</i>
<i>Repetibilidad y reproducibilidad (de los resultados de medición)</i>	<i>46</i>
<i>Errores en la medida</i>	<i>47</i>
<i>Sistemas de unidades.....</i>	<i>47</i>
<i>Conversión de unidades</i>	<i>48</i>
<i>Prefijos para múltiplos y submúltiplos</i>	<i>49</i>
Calibración de Instrumentos de Medición	50
<i>Certificado de Calibración.....</i>	<i>51</i>
Propiedades Térmicas y Equivalente Mecánico del Calor	52
<i>Temperatura</i>	<i>52</i>
<i>Métodos Termométricos</i>	<i>53</i>
<i>Equivalente mecánico del calor y Capacidad Calorífica.....</i>	<i>55</i>

<i>Capacidad calorífica específica</i>	55
<i>Calor latente</i>	56
<i>Transmisión de calor</i>	56
<i>Energía interna</i>	57
<i>Trabajo termodinámico</i>	58
<i>Primera ley de la Termodinámica</i>	59
<i>Segunda ley de la Termodinámica</i>	60
Cámara Climática	60
<i>Generalidades</i>	60
<i>Criterios estadísticos de desempeño</i>	62
Sistema de Calefacción	63
<i>Calefacción eléctrica</i>	63
<i>Calefacción por gas</i>	64
Sistema de Refrigeración	65
<i>Refrigeración por compresión</i>	65
<i>Refrigeración por absorción</i>	67
<i>Refrigerantes</i>	68
<i>El Efecto Termoeléctrico</i>	69
<i>Efecto Seebeck</i>	69
<i>Efecto Peltier</i>	70
<i>Efecto Thomson</i>	71

	11
<i>Refrigeración Termoeléctrica – Celda de Peltier</i>	71
Sistema de Humidificación.....	73
<i>Humedad Relativa</i>	73
<i>Humidificación</i>	73
<i>Humidificadores de vapor caliente</i>	74
<i>Humidificadores de vapor frío</i>	74
Instrumentación	75
<i>Sensores</i>	75
<i>Sensor de temperatura y humedad</i>	76
<i>Transductores</i>	79
<i>Actuadores</i>	79
<i>Normativa para el Diseño Eléctrico y de Control</i>	80
Sistema de Control	81
<i>Técnicas de Control</i>	82
<i>Control On-Off</i>	82
<i>Controlador Proporcional – Integral</i>	83
<i>Controlador Lógico Programable PLC</i>	83
Monitoreo	84
<i>Interfaz Humano Máquina – HMI</i>	84
<i>Norma ISA 101</i>	85
Normas ASHRAE	85

	12
Capítulo III	87
Marco Metodológico	87
Definición de QFD	87
La Casa de la Calidad	87
<i>Lista y análisis de los QUÉ</i>	88
<i>Ponderación y análisis de los “QUÉ”</i>	89
<i>Lista de “CÓMO”</i>	92
<i>Matriz de relación entre los “QUÉ” y “CÓMO”</i>	92
<i>Análisis de los “CÓMO”</i>	93
Análisis Funcional	95
Matriz Morfológica	100
<i>Módulo 1: Readecuación de la cabina</i>	100
<i>Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción</i>	101
<i>Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación</i>	101
<i>Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración</i>	102
<i>Módulo 5: Programación del Controlador</i>	102
<i>Módulo 6: Programación de la HMI</i>	103
Matriz de Criterios Ponderados	103
<i>Módulo 1: Readecuación de la cabina</i>	103
<i>Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción</i>	104
<i>Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación</i>	105

<i>Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración</i>	105
<i>Módulo 5: Programación del Controlador</i>	106
<i>Módulo 6: Programación de la HMI</i>	106
Solución Final	107
<i>Módulo 1: Readecuación de la cabina</i>	107
<i>Módulo 2: Mejora de la uniformidad del sistema de calefacción</i>	107
<i>Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación</i>	107
<i>Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración</i>	108
<i>Módulo 5: Programación del Controlador</i>	108
<i>Módulo 6: Programación de la HMI</i>	108
Capítulo IV	109
Cálculos y Diseño.....	109
Análisis de las Dimensiones de la Cámara Climática.....	109
Diseño del Aislamiento Interno de la Cámara Climática.....	110
<i>Generalidades</i>	110
<i>Dimensionamiento del espesor del aislante</i>	113
Diseño del Sistema de Calefacción	116
<i>Generalidades</i>	116
<i>Cálculo de Carga de Calefacción por Transmisión</i>	116
<i>Cálculo de Carga de Producto</i>	121
<i>Cálculo de Carga Interna</i>	121

<i>Cálculo de Carga por Infiltración de Aire</i>	121
<i>Carga Total de Calefacción</i>	122
<i>Selección de Componentes</i>	122
Diseño del Sistema de Refrigeración.....	122
<i>Cálculo de Carga de Refrigeración por Transmisión</i>	122
<i>Cálculo de Carga de Producto</i>	124
<i>Cálculo de Carga Interna</i>	124
<i>Cálculo de Carga por Infiltración de Aire</i>	125
<i>Cálculo de Carga por Equipo Relacionado</i>	127
<i>Carga Total de Refrigeración</i>	127
<i>Selección del Módulo Termoeléctrico (Celda de Peltier)</i>	128
Diseño del Sistema de Humidificación.....	132
<i>Cálculo de Carga de Humificación</i>	132
<i>Selección del Humidificador</i>	133
Sistema de Control	133
<i>Etapa de Sensado</i>	134
<i>Controlador</i>	138
<i>Lógica de Control</i>	140
<i>Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración</i>	142
<i>Diagrama Funcional del Control del Proceso</i>	143
<i>Diseño de la HMI</i>	146

	15
Diseño Eléctrico.....	154
<i>Cálculo del Calibre de los Cables</i>	154
<i>Diagrama Esquemático de Conexiones</i>	156
<i>Diagrama de Borneras</i>	156
Capítulo V	157
IMPLEMENTACIÓN	157
Adecuaciones Físicas de la Cámara Climática	157
Sistema de Calefacción	163
Sistema de Refrigeración	163
Sistema de Humidificación.....	165
Sistema de Control	166
<i>Ensayos de Identificación de la Planta</i>	166
<i>Diseño del Controlador</i>	183
<i>Sintonización</i>	184
<i>Programación del LOGO!</i>	185
<i>Programación de la Pantalla HMI</i>	188
Capítulo VI	192
Validación, Pruebas y Resultados	192
Pruebas y Análisis de Funcionamiento	192
<i>Prueba 1: T = 30 °C</i>	193
<i>Prueba 2: T = 45 °C</i>	197

<i>Prueba 3: T = 60 °C</i>	199
<i>Prueba 4: T = 80 °C</i>	201
<i>Prueba 5: H = 10 % HR</i>	204
<i>Prueba 6: H = 30 % HR</i>	206
<i>Prueba 7: H = 60 % HR</i>	208
<i>Prueba 8: H = 80 % HR</i>	210
Características de Funcionamiento.....	212
Evaluación de la Interfaz HMI	213
<i>Resultados de la evaluación de la interfaz HMI</i>	216
Conclusiones.....	220
Recomendaciones.....	222
Trabajos Futuros	222
Bibliografía	224
Acrónimos	229
Apéndices	231

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Lista de los “QUÉ” de la voz del usuario.....</i>	88
Tabla 2 <i>Ponderación de los “QUÉ” de la voz del usuario</i>	90
Tabla 3 <i>Análisis de los “QUÉ” de la voz del usuario.....</i>	91
Tabla 4 <i>Análisis de los “QUÉ” de la voz del usuario.....</i>	92
Tabla 5 <i>Evaluación de criterios del Módulo 1: Readecuación de la cabina.....</i>	103
Tabla 6 <i>Evaluación de criterios del Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción.....</i>	104
Tabla 7 <i>Evaluación de criterios del Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación</i>	105
Tabla 8 <i>Evaluación de criterios del Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración</i>	105
Tabla 9 <i>Evaluación de criterios del Módulo 4: Programación del Controlador.....</i>	106
Tabla 10 <i>Evaluación de criterios del Módulo 5: Programación de la HMI</i>	106
Tabla 11 <i>Comparación de sensores aplicables a la cámara climática.....</i>	135
Tabla 12 <i>Comparación de los modelos de PLCs de gama baja aplicables a la cámara climática</i>	139
Tabla 13 <i>Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	195
Tabla 14 <i>Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	196
Tabla 15 <i>Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	198
Tabla 16 <i>Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	198
Tabla 17 <i>Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	200

Tabla 18	<i>Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	200
Tabla 19	<i>Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	202
Tabla 20	<i>Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$</i>	202
Tabla 21	<i>Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 10\text{ \%HR}$</i>	204
Tabla 22	<i>Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 10\text{ \%HR}$</i>	205
Tabla 23	<i>Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 30\text{ \%HR}$</i>	207
Tabla 24	<i>Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 30\text{ \%HR}$</i>	207
Tabla 25	<i>Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 60\text{ \%HR}$</i>	209
Tabla 26	<i>Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 60\text{ \%HR}$</i>	209
Tabla 27	<i>Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 80\text{ \%HR}$</i>	211
Tabla 28	<i>Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 80\text{ \%HR}$</i>	211
Tabla 29	<i>Indicadores de evaluación para la interfaz HMI implementada en el proyecto con sus respectivos pesos</i>	213
Tabla 30	<i>Subindicadores de evaluación para la interfaz HMI implementada en el proyecto con sus respectivos pesos</i>	214

Tabla 31 <i>Resultados obtenidos de la evaluación de la interfaz HMI implementada en el proyecto por parte del primer técnico de calibración</i>	216
Tabla 32 <i>Resultados obtenidos de la evaluación de la interfaz HMI implementada en el proyecto por parte del segundo técnico de calibración.....</i>	218

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Alcance de calibración de la cámara climática</i>	34
Figura 2	Diagrama de bloques del QFD considerando requisitos de la empresa	35
Figura 3	<i>Relación lógica entre conceptos metrológicos usados para estandarización</i>	41
Figura 4	<i>Casos de variación de la incertidumbre con respecto a la tolerancia</i>	45
Figura 5	<i>Diferencia entre precisión y exactitud</i>	46
Figura 6	<i>Tendencia de doblado de una lámina bimetálica de latón-hierro</i>	54
Figura 7	<i>Principio de funcionamiento del sistema de calefacción por gas</i>	64
Figura 8	<i>Sistema de refrigeración mecánica mediante ciclo de compresión de vapor</i>	66
Figura 9	<i>Ciclo de refrigeración por absorción</i>	68
Figura 10	<i>Esquema de aplicación del Efecto Seebeck</i>	70
Figura 11	<i>Esquema de aplicación del Efecto Peltier</i>	70
Figura 12	<i>Esquema de aplicación del Efecto Thomson</i>	71
Figura 13	<i>Composición de una celda de Peltier estándar</i>	72
Figura 14	<i>Diferencia de polarización de las celdas Peltier</i>	73
Figura 15	<i>Esquema general de un proceso</i>	81
Figura 16	<i>Esquema general de un sistema de control</i>	82
Figura 17	<i>Estructura gráfica de la "Casa de la calidad"</i>	88
Figura 18	<i>Objetivos técnicos obtenidos del análisis de la matriz de relación</i>	94
Figura 19	<i>Nivel 0 del análisis funcional del proyecto de automatización</i>	95
Figura 20	<i>Nivel 1 del análisis funcional</i>	96
Figura 21	<i>Matriz morfológica del módulo 1: Readecuación de la cabina</i>	100
Figura 22	<i>Matriz morfológica del módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción</i>	101
Figura 23	<i>Matriz morfológica del módulo 3: Modificación del sistema de humidificación</i>	101
Figura 24	<i>Matriz morfológica del módulo 3: Modificación del sistema de refrigeración</i>	102

Figura 25	<i>Matriz morfológica del módulo 4: Programación del controlador</i>	102
Figura 26	<i>Matriz morfológica del módulo 5: Programación de la HMI</i>	103
Figura 27	<i>Guía de las propiedades de rendimiento de los materiales aislantes</i>	112
Figura 28	<i>Conductividad térmica aparente vs densidad de varios aislantes utilizados en la industria</i>	113
Figura 29	<i>Propiedades térmicas típicas de materiales aislante</i>	115
Figura 30	<i>Factores U para varios productos de fenestración en $W/(m^2 K)$</i>	120
Figura 31	<i>Ganancia de calor sensible por intercambio de aire</i>	126
Figura 32	<i>Rs para infiltración desde el exterior a espacios refrigerados</i>	127
Figura 33	<i>Gráficas de rendimiento para la celda TEC-12706</i>	131
Figura 34	<i>Diagrama de Grafcet jerarquizado</i>	141
Figura 35	<i>Diagrama de flujo del proceso completo según los modos de funcionamiento</i>	143
Figura 36	<i>Grafcet de seguridad</i>	144
Figura 37	<i>Grafcet de modos de funcionamiento</i>	145
Figura 38	<i>Grafcet de operación</i>	146
Figura 39	<i>Arquitectura de la HMI de la cámara climática</i>	147
Figura 40	<i>Distribución de los elementos de la pantalla de ingreso</i>	149
Figura 41	<i>Distribución de los elementos de la pantalla de Menú / Selección</i>	150
Figura 42	<i>Distribución de elementos en la pantalla de seteo de valores de temperatura y humedad</i>	150
Figura 43	<i>Distribución de los elementos de la pantalla de proceso de calefacción / refrigeración / humidificación</i>	151
Figura 44	<i>Distribución de los elementos de la pantalla del proceso de experimentación y configuración de parámetros</i>	151
Figura 45	<i>Distribución de los elementos de la pantalla de históricos</i>	152
Figura 46	<i>Distribución de elementos de la pantalla de registro</i>	153

Figura 47	<i>Distribución de los elementos de la pantalla de alarmas y eventos</i>	153
Figura 48	<i>Interior antiguo de la cámara climática</i>	157
Figura 49	<i>Estructura externa diseñada y hecha de Tool</i>	158
Figura 50	<i>Cubierta de lana de vidrio como aislante térmico</i>	159
Figura 51	<i>Fijación de caucho en el contorno de la cabina</i>	160
Figura 52	<i>Puerta con las adecuaciones de cámara USB, luces LED y relleno de lana de vidrio como material aislante</i>	161
Figura 53	<i>Base superficial desmontable en el interior de la cabina</i>	162
Figura 54	<i>Soportes laterales y rejilla para colocar los instrumentos dentro de la cabina</i>	162
Figura 55	<i>Ventilador y resistencia eléctrica de calefacción colocados en la base de la cabina</i>	163
Figura 56	<i>Módulo de celdas Peltier</i>	164
Figura 57	<i>Módulo de celdas Peltier adaptado a la cabina</i>	164
Figura 58	<i>Adaptación de sumidero como ingreso de vapor (humedad)</i>	165
Figura 59	<i>Humidificador</i>	166
Figura 60	<i>Esquema de módulo dimmer para el establecimiento de velocidad de mezcla del ventilador</i>	167
Figura 61	<i>Esquema de módulo dimmer para control de voltaje AC en la resistencia eléctrica calefactora</i>	168
Figura 62	<i>Posición de los sensores para adquisición de datos preliminares</i>	169
Figura 63	<i>Ubicación de los sensores para pruebas preliminares de estabilidad y uniformidad</i>	169
Figura 64	<i>Detección de los dataloggers PT-104</i>	170
Figura 65	<i>Configuración de sensores</i>	171
Figura 66	<i>Selección de pantalla para visualización gráfica de los datos y grabación</i>	172
Figura 67	<i>Registro de los datos para análisis posteriores</i>	172

Figura 68	<i>Gráfica obtenida de la primera prueba realizada a la cámara climática</i>	173
Figura 69	<i>Datos obtenidos de la primera prueba</i>	174
Figura 70	<i>Datos obtenidos el segundo día de pruebas</i>	175
Figura 71	<i>Datos obtenidos de la segunda prueba preliminar</i>	176
Figura 72	<i>Datos obtenidos de la tercera prueba preliminar</i>	177
Figura 73	<i>Datos obtenidos de la cuarta prueba preliminar</i>	178
Figura 74	<i>Datos obtenidos de la quinta prueba preliminar</i>	179
Figura 75	<i>Herramienta de identificación de sistemas Ident</i>	180
Figura 76	<i>Exportación de los datos experimentales</i>	181
Figura 77	<i>Selección de rango para estimar el modelo del proceso</i>	181
Figura 78	<i>Selección del modelo de proceso a estimar</i>	182
Figura 79	<i>Comparación de la función de transferencia estimada con el proceso real</i>	182
Figura 80	<i>Resultados de la estimación del proceso</i>	183
Figura 81	<i>Obtención de los valores de las constantes K_p y K_i del controlador PI diseñado mediante el PIDTuner</i>	184
Figura 82	<i>Sintonización del controlador diseñado en la herramienta PIDTuner</i>	185
Figura 83	<i>Esquema de conexión para envío de datos de temperatura y humedad mediante protocolo Modbus</i>	186
Figura 84	<i>Configuración del bloque de entrada analógica de red para lectura de valor de temperatura y humedad</i>	187
Figura 85	<i>Configuración del bloque de control PI del MiniPLC LOGO!</i>	188
Figura 86	<i>Inicialización del LOGO! Web Editor mediante el aplicativo LWE y creación de nuevo proyecto</i>	189
Figura 87	<i>Menús de selección y herramientas del aplicativo LWE</i>	190
Figura 88	<i>Pantallas diseñadas</i>	191

Figura 89 <i>Disposición de los sensores PT100 de los dataloggers pico para estudios de uniformidad y estabilidad con respecto a la temperatura.....</i>	192
Figura 90 <i>Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	193
Figura 91 <i>Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	194
Figura 92 <i>Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	197
Figura 93 <i>Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=60\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	199
Figura 94 <i>Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=80\text{ }^{\circ}\text{C}$.....</i>	201
Figura 95 <i>Disposición de los sensores SHT30 del Datalogger de 8 canales para estudios de uniformidad y estabilidad con respecto a la humedad.....</i>	203
Figura 96 <i>Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de $H=10\text{ \%HR}$.</i>	204
Figura 97 <i>Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de $H=30\text{ \%HR}$.</i>	206
Figura 98 <i>Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de $H=60\text{ \%HR}$.</i>	208
Figura 99 <i>Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de $H=80\text{ \%HR}$.</i>	210

Resumen

Todo proceso industrial basa su eficiencia en el grado de exactitud con la cual mide sus variables lo que permite cumplir satisfactoriamente los requerimientos del mercado, establecer diferencias competitivas, obtener excelentes resultados productivos y conseguir un mayor rédito económico por ello, es decir, la calidad en la industria radica la capacidad de medición y control. Para esto la metrología a través de sus organismos reguladores como el SAE basa sus esfuerzos en mejorar los procedimientos de calibración brindando al cliente total certeza de que sus instrumentos miden valores fidedignos, sin embargo, para casos particulares es necesario generar condiciones de temperatura y humedad adecuadas para que la calibración ofrezca resultados fiables y de pleno interés. Bajo estas consideraciones la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA. incentiva la repotenciación de su cámara climática con el objetivo de reducir tiempos de estabilidad, mejorar la uniformidad del volumen útil y aprovechar la totalidad del espacio disponible, para ello se realiza un trabajo de mejora basado en una metodología de gestión de calidad la cual es implementada según ingeniería de detalle, que incluye cálculos basados en la normativa ASHRAE para sistemas de calefacción, refrigeración y humidificación, diseño de controladores basados en teoría de control, programación estructurada de lógica de PLC basado en GRAFCET, diseño de interfaz HMI basado en normativa ISA 101 y desarrollo de pruebas de funcionamiento que certifican excelentes condiciones de operación para temperatura en un rango de 0 °C a 80 °C y para humedad en un rango de 10 %HR a 90 %HR.

Palabras clave: Calibración, casa de la calidad, cámara climática, Servicio de Acreditación Ecuatoriano, medio isoterma

Abstract

Every industrial process bases its efficiency on the degree of accuracy with which it measures its variables, which allows it to satisfactorily meet market requirements, establish competitive differences, obtain excellent productive results and achieve a greater economic return for it, that is, the quality in industry lies the ability to measure and control. For this, metrology, through its regulatory bodies such as the SAE, bases its efforts on improving the calibration procedures, providing the client with total certainty that their instruments measure reliable values, however, for particular cases it is necessary to generate adequate temperature and humidity conditions. so that the calibration offers reliable and interesting results. Under these considerations the company METASDELECUADOR CIA. LTDA. encourages the repowering of its climatic chamber with the aim of reducing stability times, improving the uniformity of the useful volume and taking advantage of all the available space, for which improvement work is carried out based on a quality management methodology which is implemented according to detailed engineering, which includes calculations based on ASHRAE standards for heating, cooling and humidification systems, controller design based on control theory, structured programming of PLC logic based on GRAFCET, HMI interface design based on ISA 101 standards and development of performance tests that certify excellent operating conditions for temperatures in a range from 0 °C to 80 °C and for humidity in a range from 10% RH to 90% RH.

Keywords: Calibration, house of quality, climatic chamber, Ecuadorian Accreditation Service, isothermal medium

Capítulo I

Generalidades

Antecedentes

La empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA. tiene como finalidad el brindar servicios de calibración, caracterización y ensayos de diversos instrumentos de medición incluido el asesoramiento y capacitación en las magnitudes de: temperatura, humedad, tiempo, volumen, masa, mecánica de momentos y variables eléctricas como voltaje, corriente, resistencia y frecuencia, considerando los estándares nacionales e internacionales y garantizando la trazabilidad en todas sus mediciones, teniendo como principales ejes la satisfacción de las necesidades de los clientes y la mejora continua del sistema de gestión de calidad. Así mismo, asegura buenas prácticas profesionales (competencia técnica) en la ejecución de las actividades que desempeña, demostrando imparcialidad del personal en todas las áreas del laboratorio (EMIS, 2022).

La temperatura es una de las magnitudes físicas más comunes en la experiencia diaria y más importantes para el diseño de sistemas mecánicos, electrónicos, eléctricos y para el análisis térmico. Según (Coluccio Leskow, 2021) es una magnitud escalar que se define como la cantidad de energía cinética de las partículas de una masa gaseosa, líquida o sólida, en donde el incremento de la velocidad de las partículas es considerado como un incremento de temperatura, y viceversa. Existen distintos tipos de temperatura, las cuales tienen su propia herramienta de medición, una de ellas es la ambiental definida como la temperatura del aire de cualquier objeto o entorno en el cual se desenvuelve el ser humano (el adjetivo “ambiente” significa «relativo al entorno inmediato»), denominada también como temperatura ordinaria o de referencia, y su importancia radica en que es un componente crucial para maximizar la longevidad de los dispositivos, prevenir averías de los componentes de un proceso y evitar daños a los diferentes instrumentos, así como aseguran la correcta medición de las demás variables físicas.

Según (Alzate & Guerrero, 2018) la humedad relativa se define como la relación entre la cantidad real y la cantidad posible de agua en forma de vapor presente en el aire, es decir, es el porcentaje de humedad que contiene el aire en comparación con la capacidad del aire para retener la humedad. De la misma manera, (AniSalud, 2019) indica que un control inadecuado de la humedad relativa puede provocar variaciones permanentes de temperatura, lo que a su vez puede ocasionar daños en el inmueble, la edificación, los sistemas eléctricos y mecánicos de los equipos pertenecientes a la planta de producción, así como efectos adversos en la salud de los trabajadores como alergias o asma.

En todo tipo de industria, la estabilidad de los productos y procesos bajo diversas condiciones de temperatura y humedad es la clave para el control de calidad y aquí juega un papel muy importante la calibración de los instrumentos con los cuales se están midiendo dichas condiciones ambientales. Actualmente existe una gran variedad de instrumentos utilizados para medir temperatura y humedad, para diversos tipos de aplicaciones y entornos, basados en los higrómetros convencionales que en su forma más básica utiliza cabello humano, pelo animal o lana para realizar la medición de la cantidad de humedad del aire, ya que cuando se humedecen tienden a expandirse o contraerse (cambio de su longitud) moviendo una aguja indicadora de una manera precisa. Según (SensoresTOP, 2019) algunos de los tipos de termómetros higrómetros más utilizados en la industria son según:

- Termómetro Higrómetro Eléctrico.
- Psicrómetros.
- Higrómetros de bobina de metal y papel.
- Espejo enfriado.
- Higrómetros gravimétricos.
- Higrómetro térmico.
- Higrómetro óptico.

- Tarjetas de humedad.

La mayoría de estos instrumentos al ser fácilmente transportables y de tamaño relativamente pequeño, deben ser enviados a laboratorios acreditados para su calibración, con lo cual se garantiza la trazabilidad en todas sus mediciones en campo. En el Ecuador, la entidad responsable de esta actividad es el SAE (Servicio de Acreditación Ecuatoriano) el cual acredita laboratorios en función de la norma internacional NTE INEN ISO/IEC 17025:2018.

Requisitos generales para la competencia de los laboratorios de ensayo y calibración, según lo indicado por la (SAE, 2022) esta acreditación cuenta con una validez de 5 años, en cuyo lapso se realizan evaluaciones de vigilancia, y con modificaciones de alcances cuando se desee, siempre y cuando se aprueben las evaluaciones y demostraciones de conformidad respectivas. Esta normativa es el estándar de calidad mundial para laboratorios de ensayos y calibraciones, el cual contempla dos cláusulas principales:

- Requisitos de Gestión: Hace referencia a la efectividad del funcionamiento del laboratorio y su sistema de gestión de calidad, considerando requisitos similares a los presentados en la norma ISO 9001.
- Requisitos Técnicos: Se refiere a la competencia técnica del personal encargado de los laboratorios, la cual contempla la metodología de los ensayos, los equipos utilizados y los informes correspondientes a los resultados de los ensayos y calibraciones.

La calibración al ser un proceso de comparación entre los valores obtenidos por el instrumento bajo prueba y la medida correspondiente de un patrón de referencia, necesita que se establezcan las condiciones adecuadas para realizar dichas mediciones, en este caso, al tratarse de instrumentos utilizados para medir valores de temperaturas y humedades, las condiciones adecuadas hacen referencia a un medio isoterma el cual pueda reproducir condiciones específicas de temperatura y/o humedad. El medio isoterma más comúnmente utilizado para ensayos y calibraciones de instrumentos en laboratorios de metrología, es el generado por una cámara de estabilidad térmica, también llamada “cámara climática” o

“cámara climatizada”, la cual genera un espacio aislado del medio exterior donde se pueden simular condiciones ambientales controladas, tanto de temperatura como de humedad, mediante la manipulación de las propiedades físicas que posee el aire.

El laboratorio de temperatura y humedad (acreditado por el SAE) de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA. cuenta con una cámara climática artesanal para la calibración de termómetros de temperatura analógicos y digitales, higrómetros, termohigrómetros, dataloggers y medidores de estrés térmico, en la cual se han ido adaptando diferentes sensores, controladores y actuadores para realizar el control de la temperatura (calefacción y refrigeración) mientras que para la humidificación y deshumidificación se utiliza un humidificador y un extractor, respectivamente. El proceso de calefacción utiliza un controlador PID auto sintonizable comercial que controla la potencia de una resistencia calefactora, mientras que la humidificación se realiza mediante la inyección de vapor generado por un humidificador el cual es transportado mediante una red de tuberías hacia el interior de la cámara.

Justificación e Importancia

La norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2018 define al proceso de calibrar como una comparación de las mediciones obtenidas por un instrumento bajo prueba con una medida correspondiente a un patrón de referencia conocido, que debe ser trazable a entidades superiores según estándares reconocidos, y es ahí donde radica su importancia, ya que si el instrumento en cuestión presenta un valor de incertidumbre que esté dentro del rango recomendado en la norma, se puede tener total certeza y confiabilidad de que las mediciones obtenidas son verídicas y que el funcionamiento del instrumento es óptimo.

El control de la temperatura y humedad es de vital importancia en los procesos de elaboración, producción y almacenamiento en la mayor parte de la industria, diferenciándose únicamente en el grado de exactitud que deben tener dichas variables al momento de realizarse los procesos mencionados, por lo que cualquier instrumento que se utilice para la

obtención de mediciones críticas tanto en temperatura como en humedad, debe ser calibrado periódicamente para garantizar que se cumplan las buenas prácticas de manufactura y los sistemas de gestión de calidad implementados. Al mejorar los sistemas de medición se pueden mejorar los procesos, con lo que se genera ventajas competitivas las cuales pueden ser aprovechadas por las empresas para obtener mayor reconocimiento en el mercado y un mayor beneficio económico.

Por tal motivo, la mayoría de empresas pertenecientes a las distintas áreas industriales en el Ecuador procuran tener todos los instrumentos correctamente calibrados acorde a lo indicado en la norma ISO 9001:2015. Sistemas de Gestión de Calidad, en el apartado 7.1.5.2.- Trazabilidad de las mediciones, el cual señala: “Cuando la trazabilidad es considerada por la organización como parte esencial para proporcionar confianza en la validez de los resultados de medición, el equipo de medición debe calibrarse o verificarse (o ambas), a intervalos especificados, contra patrones de medición trazables a patrones de medición nacionales o internacionales”. Para cumplir este requisito se recurren a laboratorios especializados que preferiblemente estén acreditados por el SAE. Según el (SAE, 2022) a nivel nacional existen 27 laboratorios acreditados que están en capacidad de calibrar instrumentos de medición de temperatura y humedad, lo cual es un número relativamente pequeño si se considera el nivel productivo del país. Debido a esto, son algunos los laboratorios que se mantienen constantemente invirtiendo en nuevos y mejores equipos de laboratorio para ofrecer un mayor alcance de medición con menor incertidumbre, generando de esta manera una mayor confiabilidad para las empresas, lo que se traduce en mayores prestaciones de servicios, obtención de contratos, ventaja comercial ante otros laboratorios y beneficios económicos.

La empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA. en sus esfuerzos por contribuir al sistema de calidad ecuatoriano, se mantiene en constante adquisición y desarrollo de mejores equipos, mejores sistemas de adquisición de datos y mejores patrones de medición para los laboratorios, así como la implementación de múltiples proyectos que están siendo utilizados

como alternativa en los procedimientos tradicionales de calibración. Uno de los más importantes, es la cámara climática que se encuentra en el laboratorio de temperatura y humedad para la calibración de termohigrómetros, higrómetros, medidores de estrés térmico, dataloggers y registradores, la cual ha sido construida de manera artesanal integrando sistemas específicos para control de temperatura, enfriamiento, humidificación y ventilación. El funcionamiento de los sistemas por separado y los materiales de construcción que no son los adecuados para mantener uniforme y estable un medio isoterma, hace que el espacio o volumen útil dentro de la cabina se reduzca cada vez más con el tiempo.

El procedimiento interno utilizado para la calibración de estos instrumentos dentro de la cámara del laboratorio es el PR-LTEM-04, el cual se basa en el procedimiento específico: PEC16. Calibración de Termohigrómetros, que según el (INTI, 2015) establece los métodos para la calibración de termohigrómetros, en donde además se determina la corrección de la indicación del instrumento en temperatura y humedad relativa con sus respectivas incertidumbres. El procedimiento mencionado indica:

1. Se introducen los IBC (instrumentos bajo calibración) en la cámara climática junto con los IR (instrumentos de referencia) de temperatura y humedad, cuidando de mantener los sensores dentro del espacio destinado a la calibración (a 15 cm de distancia de las paredes de la cámara) según estudio de uniformidad.
2. Orden de medición de puntos de calibración en humedad: 30 % HR, 50 % HR, 70 % HR, 90 % HR y 30 % HR a 25 ° C.
3. Orden de medición de puntos de calibración en temperatura: 10 °C, 20 °C, 25 °C, 35 °C y 25 °C a 50 % HR.
4. Se selecciona la primera condición de calibración en la cámara climática, ver 2 o 3 según sea el caso: temperatura o humedad.
5. Una vez que la cámara alcanza la estabilidad ($\pm 1,5$ % HR y $\pm 0,1$ ° C) se toman 4 (cuatro) lecturas correspondientes al IR y al IBC en temperatura y humedad,

igualmente distribuidas en un intervalo de tiempo que abarque dos oscilaciones completas en HR de la cámara climática.

6. Se selecciona la siguiente condición de calibración, ver 2 o 3 según sea el caso: temperatura o humedad y se repite 5 y 6 hasta cubrir todas las condiciones de calibración requeridas.

Actualmente dicho proceso es realizado por el técnico de laboratorio encargado de las calibraciones de instrumentos dentro de la cámara climática de manera totalmente manual, lo que incluye:

- Modificación del valor de seteo de los controladores de calefacción, enfriamiento y humidificación hasta alcanzar la estabilidad de temperatura y humedad dentro de la cámara: $\pm 1,5 \%HR$ y $\pm 0,1 ^\circ C$ según (INTI, 2015).
- Toma de datos en una hoja de registro, y
- Traspaso de todos los datos tomados en una hoja digital de cálculo (Excel) para el análisis y posterior realización del informe de calibración.

Todo este proceso toma alrededor de 40 a 60 minutos para 1 (un) punto de calibración, por consiguiente, para los instrumentos que requieren varios puntos de calibración, el tiempo es aún mayor. Al laboratorio llegan alrededor de 20 a 30 instrumentos semanales para calibración, por lo que en ciertas ocasiones el tiempo no es suficiente para lograr cubrir la demanda existente, teniendo como principales consecuencias la subcontratación de servicios de otros laboratorios, ampliación de las jornadas de trabajo, o la pérdida definitiva de los servicios de calibración de dichos instrumentos, lo que se traduce en pérdidas económicas.

Ante esta situación, y considerando la tendencia actual de automatizar procesos para hacerlos más eficaces, eficientes y seguros para el operador, se ha tomado la decisión de modernizar el proceso de calibración de termohigrómetros para hacer uso de todo el espacio útil dentro de la cabina, para reducir los tiempos de estabilidad asegurando una adecuada uniformidad del medio isoterma generado y por consiguiente, el tiempo del procedimiento de

medición en total, y principalmente el mejoramiento de la usabilidad de la cámara en la cual se optimiza el trabajo del operador, ya que pasa de una operación totalmente manual a un rol de supervisor y registrador de datos, todo esto con la finalidad de asegurar la calidad de las mediciones garantizando su normalización mediante la trazabilidad.

Adicional a esto, la modernización del sistema de generación del medio isoterma para el proceso de calibración puede generar un incremento del rango de medición tanto en temperatura como en humedad, para ampliar el alcance de calibración acreditado, ya que actualmente según su alcance de acreditación, a través del expediente “E - SAE LCA 16.003” del certificado de acreditación “SAE LCA 17-001”, tiene los siguientes alcances:

Figura 1

Alcance de calibración de la cámara climática

MAGNITUD Y SUBMAGNITUD	RANGO DE MEDIDA	INCERTIDUMBRE (*)	INSTRUMENTOS A CALIBRAR Y PROCEDIMIENTOS
Temperatura y humedad relativa	20 %HR 50 %HR 75 %HR 0 °C a 50°C	±0,79 %HR ±0,66 %HR ±0,74 %HR ±0,44 °C	Instrumento: Termohigrómetros, Higrómetro y Medidores de Estrés Térmico Procedimiento: PR- LTEM-04 Método de Referencia: PEC16 Revisión Agosto 2015
	20 %HR 50 %HR 75 %HR 0 °C a 50°C	±0,79 %HR ±0,66 %HR ±0,74 %HR ±0,44 °C	Instrumento: Dataloggers, Registadores Procedimiento: PR- LTEM-04 Método de Referencia:

Nota. Figura tomada de certificado de acreditación SAE LCA 17-001.

Alcance

El laboratorio de temperatura y humedad de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA. requiere la automatización del sistema mediante el cual la cámara climática genera el medio isoterma adecuado para el proceso de calibración de instrumentos de medición como termómetros analógicos y digitales, higrómetros, termohigrómetros, medidores de estrés térmico y dataloggers, por lo que, para cumplir con dichos requerimientos el presente proyecto

estará dividido en 4 (cuatro) etapas: Análisis metodológico, diseño, implementación y pruebas de validación y funcionamiento, las cuales se detallan a continuación:

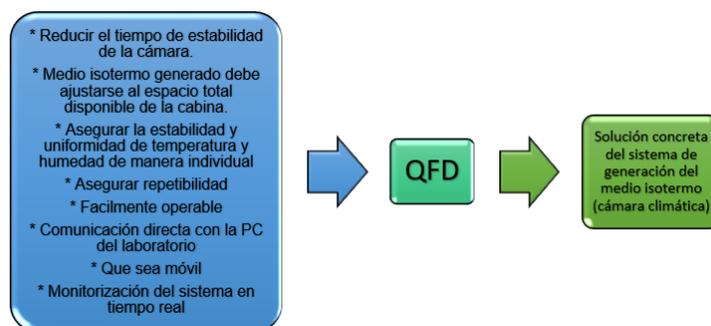
Como punto de partida se realizará un estudio del arte de los diferentes sistemas de calefacción, refrigeración y humidificación que se han implementado en proyectos similares o que representen las opciones más adecuadas que una vez integradas, se adapten de la mejor manera a los requerimientos realizados por la empresa, garantizando así, su completo desarrollo y funcionamiento.

Etapa de Análisis Metodológico

Para un correcto desarrollo del proyecto y que pueda cumplir con todos los requerimientos realizados por el personal técnico encargado del laboratorio se considera la aplicación de la metodología QFD (por sus siglas en inglés, Quality Function Deployment – Despliegue de la Función Calidad) conocida también como “la voz del cliente”, mediante la cual se podrá transformar todas estas necesidades y deseos de la empresa en requisitos prácticos y justificados de diseño que serán considerados a lo largo de todo el proceso de desarrollo del proyecto, como lo muestra la Figura 2.

Figura 2

Diagrama de bloques del QFD considerando requisitos de la empresa.



Etapa de Diseño

Una vez obtenidas las soluciones resultantes del análisis de evaluación de los criterios ponderados (matriz QFD), se procede a realizar el diseño de cada subetapa tomando en

cuenta dichas soluciones. Preliminarmente las subetapas planteadas para la parte de diseño se detallan a continuación:

Subetapa de instrumentación

Como se mencionó en los antecedentes, los sistemas de calefacción, refrigeración y humidificación funcionan de manera individual, realizando las correcciones de variables de manera manual (encendiendo/apagando el controlador PI, compresor de refrigeración y humidificador, según corresponda), además de esto, el material de la cabina es de un plástico reforzado el cual con el tiempo de uso se puede notar desgaste y quemaduras, que también han afectado al aislante de la cabina, razón por la cual el volumen útil interno se ha visto reducido casi a la mitad. Por lo tanto, en la primera etapa del rediseño se realizará un análisis matemático para la elección del tipo de aislamiento más adecuado que debe ser reemplazado tanto en las paredes como en la puerta, después se realizará el cálculo de las cargas térmicas de calefacción y refrigeración con lo cual se dimensionan los elementos de los respectivos sistemas generadores, sistemas que previamente han sido sujetos a investigación y comparación de diferentes trabajos en los cuales se han aplicado sistemas similares con la finalidad de encontrar cuales son los que mejor se ajustan al proyecto. Para el caso del sistema de calefacción se toma en cuenta bibliografía en la cual el sistema aplicado esté enfocado a cámaras climáticas y tenga como principales resultados la uniformidad y estabilidad, mientras que para el caso del sistema de refrigeración se considera la comparación del sistema convencional de refrigeración (compresión de refrigerante) con sistemas alternativos que se basan en efectos termoeléctricos y que estén aplicados a cuartos fríos de pequeñas dimensiones, por lo que se tomará en cuenta bibliografía en la cual los resultados presentados se ajusten a los requerimientos de alcance, espacio y presupuesto del presente proyecto. Finalmente, para el caso del sistema de humidificación se propone el diseño total de un sistema controlado de inyección y eyección de humedad al interior de la cabina basado en los diferentes tipos de humidificadores comerciales disponibles en el mercado.

Subetapa de control

En esta etapa se realiza la modelación matemática del medio isoterma y se procede a programar la lógica del controlador, para llevar a cabo este proceso se realizará un análisis de la técnica de control más adecuada para cada subsistema para que el proceso funcione correctamente. Un requerimiento de la empresa es la utilización de los dispositivos disponibles en el área de mantenimiento, en el cual hay controladores dedicados y algunos PLCs utilizados en prototipos de proyectos realizados por pasantes, por lo tanto, se considerará el elemento más adecuado para ser implementado. El/los controlador/es seleccionado/s deberán ser adecuados para realizar el control de los sistemas de refrigeración, calefacción y humidificación, así como el manejo de la sensorica respectiva de cada subsistema.

Subetapa de diseño de software

Es importante la incorporación de una interfaz humano - máquina (HMI) para realizar el seguimiento en tiempo real del proceso, la generación de históricos de la uniformidad y estabilidad de la cámara en cualquier momento, el manejo adecuado de las alarmas tanto para el cuidado de los instrumentos bajo prueba como para situaciones anómalas que puedan surgir en el funcionamiento de la cámara climática, además de esto debe corresponder con criterios de usabilidad adecuados para que no sea dificultosa la operabilidad por parte de los técnicos, para esto se realizará el diseño de la HMI bajo la normativa indicada por la ISA 101.

Subetapa eléctrica

Para la correcta integración de los subsistemas que además brinde seguridad para la cámara climática y para el operador será necesario utilizar varios elementos adicionales de protección, seccionamiento, indicación y comando, así como las respectivas conexiones eléctricas, para esto se considera que todo el resumen de los criterios técnicos y los resultados de los cálculos realizados deberán incluir planos eléctricos conforme a la norma IEC 60617 que serán anexados en la memoria técnica descriptiva del proyecto.

Etapa de Implementación

Una vez finalizado el diseño de los subsistemas, con sus respectivos planos y especificaciones técnicas, se procederá a realizar una selección adecuada de los componentes para cada subsistema, considerando en primer lugar los requerimientos de uso de la empresa, si los elementos disponibles en el área de mantenimiento cumplen con los requisitos de diseño serán seleccionados, pero si no cumplen con las condiciones la empresa ha comunicado que se puede realizar la inversión en nuevos elementos, en donde se tomará en cuenta la disponibilidad en el mercado, el precio y la información técnica disponible. Posteriormente se realizará la integración de los componentes en los diferentes subsistemas de manera aislada para realizar algunas pruebas de funcionamiento básicas, para lograr integrar y adecuar correctamente los subsistemas para una puesta en marcha preliminar de la cámara climática, dado el caso que sea necesario algunas correcciones o adecuaciones, se las realizará de manera oportuna para garantizar la correcta puesta en marcha.

Etapa de Pruebas

Para la fase final se considera realizar una caracterización completa de la cámara climática en la cual se evaluarán los resultados numéricos y gráficos obtenidos. Para el análisis comparativo se utilizará el certificado de caracterización LENT-22-065-CCL realizado el 11 y 12 de marzo del 2022, del cual se pueden obtener los valores de corrección, estabilidad, uniformidad e incertidumbre. La evaluación es realizada de esta manera ya que los valores reportados en las tablas de caracterización corresponden al método por comparación según el procedimiento interno PR-LTEM-04. Finalmente, con la caracterización preliminar aceptada y con la aprobación de los técnicos del laboratorio se realizará la calibración de algunos termohigrómetros para evaluar el desempeño de la cámara climática.

Objetivos

Objetivo General

- Repotenciar la cámara climática del laboratorio de temperatura y humedad de la empresa METASDELECUADOR CIA. LTDA. mediante la automatización de su sistema interno de generación del medio isoterma lo cual garantice el desarrollo eficiente y seguro del proceso de calibración de termohigrómetros.

Objetivos Específicos

- Disminuir el tiempo de estabilidad del medio isoterma generado por la cámara climática en al menos un 30% mediante la implementación de un sistema de control automático de temperatura y humedad.
- Optimizar el proceso calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad mediante la sustitución de la operación manual de la cámara climática por un control automático.
- Incrementar el alcance de calibración de la cámara climática en un 30% mediante la integración de sistemas específicos de calefacción y refrigeración comandados por un controlador.

Capítulo II

Marco Referencial

Metrología

Fundamentos

Un estándar internacional fundamental en el ámbito de la metrología es el VIM (Vocabulario Internacional de Metrología) que ha sido desarrollado por la OIML (Organización Internacional de Metrología Legal) y el CIPM (Comité Internacional de Pesas y Medidas) con el objetivo de definir un compendio terminológico y de definiciones para una comunicación precisa y confiable en cualquier parte del mundo. La traducción oficial al español desde su primera edición está a cargo del Centro Español de Metrología con autorización expresa del JCGM (Comité Conjunto para las Guías en Metrología) en el cual se define a la metrología como la ciencia de las mediciones y sus aplicaciones, en las que se incluyen todos los aspectos teóricos y prácticos de las mediciones (Centro Español de Metrología, 2012).

Cantidades/Magnitudes

Adolfo Escamilla en su libro “Metrología y sus aplicaciones” detalla un esquema que relaciona el estándar, la medición y las cantidades, como lo muestra la Figura 3,

Figura 3

Relación lógica entre conceptos metroológicos usados para estandarización



Nota. Figura tomada de (Escamilla, 2014)

De estos términos, el que comúnmente causa confusión es el de *estándar* ya que tiene dos significados: *norma* o especificación y *patrón* o unidad de referencia, aquí el VIM es puntual en la diferencia de estos significados, definiendo al Patrón como todo aquel “Sistema de medida, medida materializada, instrumento de medición o material de referencia destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad, o uno o varios valores de una magnitud para servir de referencia” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 5.1).

Del mismo modo, algunos autores utilizan el término *cantidad* para referirse a la *magnitud* de medida, por lo que es de vital importancia explorar los elementos que conforman esta definición que según el VIM la establece como el “atributo de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede expresarse cuantitativamente mediante un número y una referencia” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 1.1). Por lo tanto, para ser sujeto de medición debe ser posible determinar un atributo cuantitativamente, según (Escamilla, 2014) una propiedad es una cantidad (magnitud) si ésta permite un ordenamiento lineal del sistema de acuerdo con esa propiedad. Además de esto, se debe considerar que los números asignados a

las propiedades deben ser significativos en términos de una relación de orden entre los objetos que tienen dicha propiedad (Escamilla, 2014).

Unidades y escalas

Para realizar mediciones, aparte de la asignación de un valor determinado a la cantidad debe haber un estado específico (reproducible de los objetos), es decir, se debe establecer una unidad, con escala de múltiplos y submúltiplos. El VIM define a la unidad de medida como una “magnitud escalar real, definida y adoptada por convenio, con la que se puede comparar cualquier otra magnitud de la misma naturaleza para expresar la relación entre ambas mediante un número” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 1.9), estando estos símbolos establecidos en la norma NTE INEN-ISO 8000-1. Cantidades y Unidades – Parte 1: Generalidades.

Como la medición es esencialmente una comparación de un objeto con una realización física de la unidad (patrón primario) el VIM define varios tipos de patrones, de los cuales los que conciernen son los patrones primarios y secundarios, siendo los patrones primarios aquellos que tienen las más altas cualidades metrológicas y cuyos valores han sido establecidos por convenio sin referirse a otros patrones de la misma magnitud, mientras que los patrones secundarios son aquellos cuyos valores son asignados a través de una calibración con respecto a un patrón primario de la misma magnitud (Centro Español de Metrología, 2012, definiciones 5.4 y 5.5). Es importante mencionar que el VIM también establece definiciones para los términos patrones internacionales y nacionales que en esencia hacen referencia a patrones primarios y secundarios o de referencia.

Trazabilidad metrológica

Finalmente, después de la aplicación de una metodología de medición a un objeto el resultado obtenido es un “valor medido” de una magnitud, de la cual la principal característica es la trazabilidad, siendo definida por el VIM como una “propiedad de un resultado de medida por la cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena

ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre de medida” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.41). Este concepto es muy importante ya que de acuerdo con la norma ISO/IEC 17025:2018, literales 6.5.1 y 6.5.2: “El laboratorio debe establecer y mantener la trazabilidad metrológica de los resultados de sus mediciones por medio de una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones” y “debe asegurarse de que los resultados de la medición sean trazables al Sistema Internacional de Unidades (SI)”.

Los principales organismos reguladores de acreditación basan sus criterios para acreditar laboratorios en base a las directrices propuestas por organismos internacionales, en este aspecto, la ILAC (Organización Internacional para Organismos de Acreditación) en la P10:07/2020 considera que los elementos necesarios que aseguran la trazabilidad metrológica son: una cadena de trazabilidad ininterrumpida a un patrón ya sea internacional o nacional, una incertidumbre documentada, un procedimiento de medidas documentado, una competencia técnica reconocida en auditoría, la trazabilidad metrológica al SI y los intervalos entre calibraciones (recalibraciones) (ILAC, 2020). Estas directrices han sido mantenidas desde sus versiones anteriores y son consideradas también por la PL01 R06 / 2019: Política Ecuatoriana de Trazabilidad de las Mediciones del SAE.

Incertidumbre

Una manera de reforzar la confianza en los valores medidos obtenidos, que también permita realizar comparaciones de diferentes mediciones y brinde un conocimiento mayor sobre el método usado para obtener dichos valores, es la *incertidumbre*, la cual es definida por la VIM como aquel “parámetro no negativo que caracteriza la dispersión de los valores atribuidos a un mensurando, a partir de la información que se utiliza” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.26). Este concepto abarca múltiples componentes que son obtenidos a partir de herramientas estadísticas, en donde las reglas establecidas para el cálculo, evaluación y expresión de la incertidumbre de medida aplicable a todo el espectro de

las mediciones ha sido establecida por la GUM (Guía para la expresión de la incertidumbre de medida). Esta guía es de vital importancia y ha sido desarrollada por las siguientes organizaciones que son las encargadas de estandarizar internacionalmente todos las directrices relacionadas con la metrología:

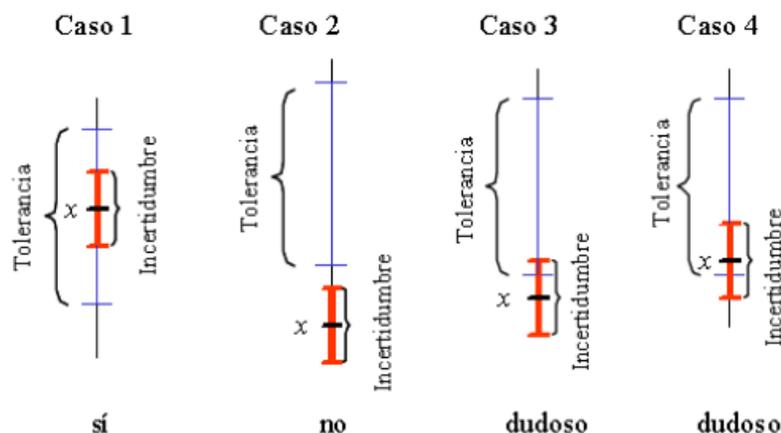
- BIPM: Oficina Internacional de Pesas y Medidas (Bureau International des Poids et Mesures).
- IEC: Comisión Electrotécnica Internacional.
- IFCC: Federación Internacional de Química Clínica.
- ISO: Organización Internacional de Normalización.
- IUPAC: Unión Internacional de Química Pura y Aplicada.
- IUPAP: Unión Internacional de Física Pura y Aplicada.
- OIML: Organización Internacional de Metrología Legal.

Tolerancia

Según la VIM es el “valor extremo del error de medida, con respecto a un valor de referencia conocido, permitido por especificaciones o reglamentaciones, para una medición, instrumento o sistema de medida dado” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 4.26) y es importante porque permite determinar la aprobación (valores dentro del intervalo) o rechazo (valores fuera del intervalo) de los valores medidos, tal como se muestra en la figura 4 que plasma este ejemplo.

Figura 4

Casos de variación de la incertidumbre con respecto a la tolerancia



Nota. Figura tomada de (Solé, 2015)

Para los casos 1 (uno) y 2 (dos) es evidente la aceptación y el rechazo de los valores medidos ya que la incertidumbre está dentro y fuera de la tolerancia establecida, respectivamente, mientras que los casos 3 (tres) y 4 (cuatro) son dudosos y requieren un proceso de verificación que depende de la variable que se está analizando y del laboratorio en el cual se está llevando a cabo el proceso de calibración, en algunos casos simplemente se reporta como valores que no pasan o no son aceptados, pero hay casos en los que ciertas normas indican que solo se realice la evaluación con el error (corrección) del equipo bajo prueba.

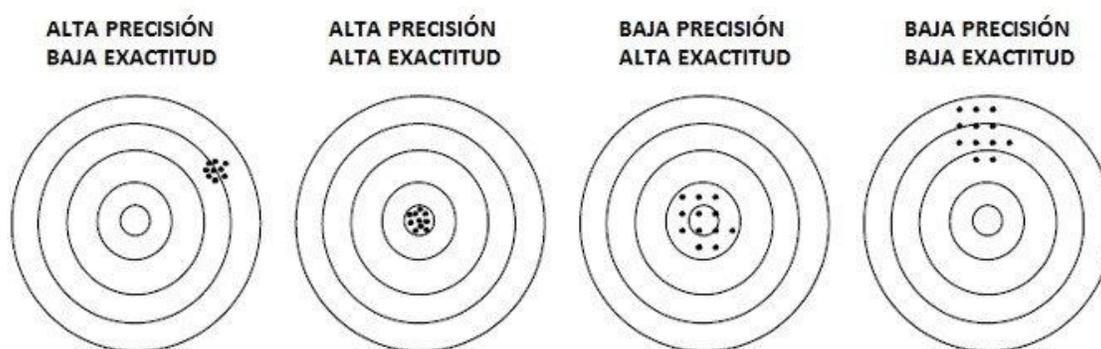
Exactitud y precisión de medición

Son dos conceptos utilizados para describir también la confiabilidad de las mediciones realizadas, según el VIM, la exactitud se define como la "proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mensurando" (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.13) y se caracteriza por ser un concepto que no se expresa numericamente, frecuentemente se dice que mientras más pequeño es el error de medida, es más exacta una medición. Mientras que la precisión es definida por el VIM como la "proximidad entre las indicaciones o los valores

medidos obtenidos en mediciones repetidas de un mismo objeto, o de objetos similares, bajo condiciones especificadas” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.15) y se caracteriza por que se expresa numéricamente mediante herramientas estadísticas como la varianza, desviación típica, o el coeficiente de variación. La figura 5 muestra un ejemplo práctico de la diferencia entre precisión y exactitud.

Figura 5

Diferencia entre precisión y exactitud



Nota. Figura tomada de (Escamilla, 2014)

Repetibilidad y reproducibilidad (de los resultados de medición)

Las condiciones especificadas a las que hace referencia el VIM son las de repetibilidad, de precisión intermedia y de reproducibilidad, de estos conceptos los más importantes son los de repetibilidad definido como la “condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye el mismo procedimiento de medida, los mismos operadores, el mismo sistema de medida, las mismas condiciones de operación y el mismo lugar, así como mediciones repetidas del mismo objeto o de un objeto similar en un periodo corto de tiempo” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.20) y de reproducibilidad definido como la “condición de medición, dentro de un conjunto de condiciones que incluye diferentes lugares, operadores, sistemas de medida y mediciones repetidas de los mismos objetos u objetos similares” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.25). Tanto la repetibilidad como la reproducibilidad

pueden ser expresadas cuantitativamente mediante las características de la dispersión de los resultados.

Errores en la medida

Debido a que el valor medido obtenido no representa precisamente el valor real (imposible de conocer) siempre se estima un error en la medición, que es definida por el VIM como la “diferencia entre un valor medido de una magnitud y un valor de referencia” (Centro Español de Metrología, 2012, definición 2.16) y su naturaleza puede variar de manera predecible (error sistemático) o impredecible (error aleatorio) al realizar mediciones repetidas. Hay que tomar en cuenta que el error sistemático es resultado de la diferencia entre el error de medida y el error aleatorio.

Sistemas de unidades

En la actualidad existen dos sistemas internacionales de medida que son utilizados a la par, el sistema inglés (Estados Unidos) y el SI (Compendio internacional), siendo el SI el de mayor relevancia y uso. El sistema inglés presenta unidades de:

- Longitud:
 - 1 pulgada (in) = 25,4 mm
 - 1 pie (ft) = 12 in = 30,48 cm
 - 1 yarda (yd) = 3 ft = 91,44 cm
 - 1 milla (mi) = 1760 yd = 1,609344 km
- Área:
 - 1 pulgada cuadrada (sq in) = 645,16 mm²
 - 1 pie cuadrado (sq ft) = 144 sq in = 929,03 cm²
 - 1 milla cuadrada (sq mi) = 640 acres = 2,59 km²
- Volumen:
 - 1 pulgada cúbica (in³ o cu in) = 16,387064 cm³
 - 1 pie cúbico (ft³ o cu ft) = 1 728 cu in = 28,317 L

- 1 yarda cúbica (yd³ o cu yd) = 27 cu ft = 7 646 hL
- 1 galón (gal) = 231 cu in = 4 qt = 128 fl oz = 3,785411784 L

El SI se constituye principalmente por 7 (siete) unidades básicas: metro (longitud), kilogramo (masa), segundo (tiempo), kelvin (temperatura), ampere (corriente eléctrica), candela (intensidad luminosa) y mol (cantidad de sustancia), pero adicional a estas se tienen unidades suplementarias (radián y esterradián mostrados en la ISO-31/1. Cantidades y unidades – Parte 1: Espacio y tiempo), unidades derivadas (Hertz, newton, pascal, joule, watt, volt, ohm, etc), unidades que no pertenecen al SI, pero se conservan (minuto, hora, día, año, grado, litro, tonelada, electronvolt, etc) y unidades que no pertenecen al SI pero se usan temporalmente (angström, bar, nudo, röntgen, etc), el detalle de los símbolos y equivalencias de las magnitudes y unidades respectivas están detalladas en el Apéndice A.

El Ecuador adoptó el SI el 9 de enero de 1974 mediante la Ley N° 1.456 de Pesas y Medidas, promulgada en el Registro Oficial N° 468, la misma que fue reemplazada por la Ley No.2007-76 del Sistema Ecuatoriano de la Calidad en febrero del año 2007, la cual señala en el Art. 36.- [Sistema legal de unidades de Medida].- “El Sistema Legal de Unidades de Medida de uso general y obligatorio en el Ecuador, es el sistema métrico decimal denominado Sistema Internacional de Unidades -SI- por la Conferencia General de Pesas y Medidas, organismo de la convención del metro”, y en el Art. 37. [Uso exclusivo de unidades de la medida del SI].- “Se prohíbe el uso de pesas y medidas y de aparatos y equipos para pesar y medir, utilizadas en transacciones comerciales que utilicen unidades de medida diferentes a las del Sistema Internacional de Unidades –SI- y que no sean correctos” (INEN, 2018).

Conversión de unidades

Como se mencionó anteriormente, los dos sistemas de medidas (inglés y SI) son utilizados a la par, por lo tanto, es necesario la implementación de operaciones que permitan convertir las unidades dentro del mismo sistema de medida como entre diferentes sistemas de medida. El procedimiento para la conversión entre unidades base según (Escamilla, 2014) es:

- Calcular el factor de conversión:

$$f_c = \frac{\text{equivalencia } y}{\text{equivalencia } x}$$

- Multiplicar el factor de conversión calculado por las unidades iniciales (que se desean convertir)
- Simplificar las unidades y resolver la fracción resultante.

Para motivos prácticos, para realizar conversiones de cualquier unidad de longitud, área, volumen, masa, temperatura y energía (mayormente aplicados en el presente trabajo) se utilizan los factores de conversión mostrados en el Apéndice B. Mientras que para la conversión entre unidades derivadas se sigue el mismo procedimiento establecido con la diferencia de que aparecerán tantos factores de conversión como unidades base tenga la unidad derivada (Escamilla, 2014).

Prefijos para múltiplos y submúltiplos

Debido a que el SI es un sistema decimal, para realizar conversiones entre unidades, a cada magnitud hay que multiplicar por múltiplos o submúltiplos de 10, como lo muestra el Apéndice A, característica que le da al SI su conveniencia y notoria ventaja frente al sistema inglés. Finalmente, para una estandarización de la escritura de los símbolos de las unidades del SI se establecen algunas reglas:

- Los símbolos de las unidades se expresan en caracteres romanos en minúsculas (e.g. m, kg), mientras que los caracteres romanos en mayúsculas se reservan para unidades que se derivan de nombres propios (e.g. A, K).
- No se coloca punto después del símbolo de la unidad.
- No se pluralizan los símbolos de las unidades (e.g. 10 m, 10 kg).
- El producto de dos o más unidades se expresa mediante un punto (e.g. N·m).

- Para unidades derivadas formadas por el cociente de dos unidades se utiliza una línea inclinada (se admite solo una línea) o sus respectivas potencias negativas (e.g. $10 \text{ m/s} = 10 \text{ m}^{-1}$)
- Los símbolos de los prefijos se expresan con caracteres romanos, sin espacio (e.g. mN).
- Se deben evitar los prefijos compuestos (e.g. es válido 1 nm pero no 1 mμm, un milimicrómetro).

Calibración de Instrumentos de Medición

Como ya se ha mencionado, una correcta calibración sirve para tener total certeza del desempeño y buen funcionamiento de los instrumentos de medición dentro de cualquier industria. De manera general, los procedimientos de calibración siguen una serie de pasos estándar:

1. Conocer el intervalo que se desea calibrar: Es responsabilidad tanto del cliente como del laboratorio (donde se pretende realizar el procedimiento de calibración) el pleno reconocimiento de que los equipos y patrones de medida están en la capacidad de cubrir el intervalo de calibración deseado del IBP. Para esto, la página del SAE cuenta con una sección en donde se puede realizar la búsqueda de los OEC (Organismos Evaluadores de la Conformidad) acreditados, los mismos que cuentan con su respectivo alcance de acreditación en donde se detalla, para cada campo de calibración, la magnitud y submagnitud, el rango de medida, la incertidumbre, los instrumentos que se pueden calibrar y su respectivo procedimiento de medida. El alcance de acreditación de METASDELECUADOR CIA. LTDA. es el SAE-LCA-17-001.
2. Analizar las incertidumbres: Las incertidumbres más relevantes que deben considerarse son la del sensor de referencia (que se reporta en el certificado de

calibración) y la de referencia con la ITS-90 (Escala Internacional de Temperatura de 1990 que define las temperaturas tanto en Kelvin como en Celsius, sus equivalencias y compatibilidades para la realización de mediciones de temperatura). Generalmente el valor de incertidumbre expresada (capacidad de medición y calibración – CMC del laboratorio) es estimada con un factor de cobertura $k=2$, que corresponde a un nivel de confianza del 95% en donde se asume una distribución normal, según lo establecido por la GUM.

3. Definir los puntos de medición.
4. Realizar las mediciones pertinentes: Para esto se recurre al procedimiento interno PR-LTEM-04 utilizado en el laboratorio para la calibración de IBP dentro de la cámara climática, el cual se basa en el procedimiento específico: PEC16.
5. Efectuar los cálculos respectivos: Media, varianza, desviaciones, incertidumbres y errores.
6. Elaborar el certificado de calibración: Documento en el cual se presenta los resultados obtenidos del proceso de calibración.

Certificado de Calibración

Es un informe donde se presenta de manera clara, objetiva e inequívoca toda la información necesaria para una correcta interpretación de los resultados obtenidos del procedimiento de calibración, además de la información correspondiente al método utilizado para dicho procedimiento. La norma ISO/IEC 17025:2018 en su literal 7.8. Informe de resultados, describe todas las generalidades, requisitos comunes, requisitos específicos y toda la información sobre las declaraciones de conformidad, donde los requisitos más importantes que deben constar en el informe son:

- Requisitos comunes: Título, información del laboratorio, lugar donde se realizan las actividades, clara identificación de las partes que componen el informe, información

del cliente, descripción del método utilizado, fecha de recepción de los IBP, fecha de ejecución del procedimiento de medición, fecha de emisión del certificado, declaración de que los resultados se relacionan con ítems sujetos solo a calibración, los resultados con sus respectivas unidades de medición, todas las adiciones o excepciones del método utilizado, la información de los técnicos que realizan el procedimiento y los que revisan, autorizan y aprueban el certificado.

- Requisitos específicos: Incertidumbre del resultado de medición, todas las condiciones en las que se llevaron a cabo las calibraciones que influyen directamente en los resultados de medición, una declaración en la cual se verifique que todas las mediciones son trazables metrológicamente y si es el caso, los resultados de medición antes y después de la realización de un ajuste o reparación.
- En el caso de que sea oportuno, se establece una declaración de conformidad con todos los requisitos y especificaciones, y cuando sea adecuado se puede colocar opiniones o interpretaciones.

Propiedades Térmicas y Equivalente Mecánico del Calor

Temperatura

Se define a la temperatura como la medida de la energía cinética media de las partículas de un objeto o un sistema, en simples palabras, indica que tan frío o caliente está un objeto independientemente de la cantidad de materia que este posea. Los instrumentos para medir la temperatura han ido evolucionando con el tiempo, todos ellos aprovechando la propiedad que tienen los líquidos y gases para expandirse con el aumento de la temperatura. Según (Blatt, 1991) el primer termómetro aceptado fue construido a base de mercurio por Daniel Fahrenheit que estableció como puntos fijos de temperatura al frío más intenso resultado de mezclar agua, hielo y sal de mar (o sal-amoniaco) en 0 °F y al límite de calor de la sangre de una persona sana en 100 °F, mientras que Anders Celsius estableció como 0 °C a la

temperatura del hielo y a la temperatura del agua hirviendo (a presión atmosférica) en 100 °C dividiendo al intervalo de temperatura en 100 partes iguales.

Según (Benavides & Carrasco, 2010) las unidades de las escalas termométricas están definidas para el SI como el °C (grado Celsius) y para el Sistema Inglés como el °F (grado Fahrenheit), sin embargo, existen escalas termométricas de principal relevancia por su coincidencia con el cero absoluto llamadas escalas absolutas, estas son la escala Kelvin (Celsius absoluta) y Rankine (Fahrenheit absoluta), la cual considera como su unidad al K (Kelvin) y °Ra (grado Rankin), respectivamente. Como se ha mencionado en la sección anterior, esta variedad de escalas termométricas hace necesario el establecimiento de fórmulas de equivalencias entre unidades, obteniendo:

- Entre Celsius y Fahrenheit:

$$T_F = 32 + \frac{9}{5}T_C \quad (1.1)$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32) \quad (1.2)$$

- Entre Celsius y Kelvin:

$$T_K = T_C + 273,2 \quad (1.3)$$

- Entre Fahrenheit y Rankine:

$$T_{Ra} = T_F + 549,67 \quad (1.4)$$

- Entre Kelvin y Rankine:

$$T_{Ra} = \frac{9}{5}T_K \quad (1.5)$$

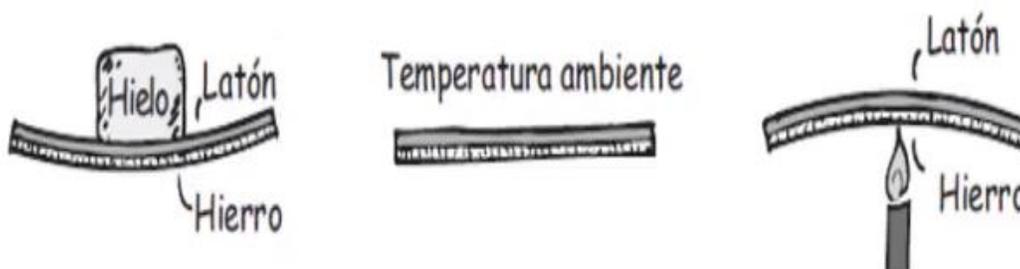
Métodos Termométricos

La termometría se basa principalmente en el equilibrio térmico que según (Blatt, 1991) se consigue cuando un sistema alcanza la condición de estado estable en el que no se produce ningún intercambio neto de energía, de esta manera, cuando dos o más sistemas están en

equilibrio térmico sus temperaturas son iguales, y es justamente este principio por el cual funciona el termómetro convencional de mercurio, el cual se expande subiendo a lo largo de un tubo capilar cuya indicación representa una medida directa de la temperatura exterior. Pero la principal desventaja de estos termómetros es que se demoran alcanzando el equilibrio térmico haciendo que el registro de los cambios de temperatura sea demorado, para solventar este inconveniente se han considerado otras alternativas que toman en cuenta la expansión térmica de los metales como los elementos bimetálicos (cintas soldadas de metales con diferentes coeficientes de expansión térmica e.g. termostato de hierro-latón) que se doblan hacia un lado al producirse una diferencia de expansiones, como lo muestra la figura 6.

Figura 6

Tendencia de doblado de una lámina bimetálica de latón-hierro



Nota. Figura tomada de (Medina, 2019)

Asimismo, según (Blatt, 1991) algunos instrumentos aprovechan otros fenómenos físicos como el termopar que basa su funcionamiento en el efecto termoeléctrico, en el cual, si se juntan en un extremo dos alambres de distintos metales y se produce una diferencia de temperatura a lo largo de los alambres, entre los otros extremos aparece un pequeño voltaje que es proporcional a dicha diferencia de temperatura, mientras que otros instrumentos como los termómetros de resistencia basan su funcionamiento en el hecho de que la resistencia eléctrica de los materiales conductores depende de la temperatura, por lo que se aprovecha este principio para realizar las mediciones. Estos instrumentos y sus respectivas variaciones

presentan varias ventajas como el tamaño reducido, el hecho de que alcanzan el equilibrio térmico con rapidez (por lo que son capaces de registrar rápidamente los cambios de temperatura) y sus salidas son señales de tipo eléctricas (en vez de visuales como la escala del termómetro de mercurio o mecánicas como los elementos bimetálicos) razones por las cuales son utilizados en todo tipo de aplicaciones.

Equivalente mecánico del calor y Capacidad Calorífica

Según (Blatt, 1991) este concepto hace referencia a que el calor y el movimiento pueden intercambiarse mutuamente, es decir que una cierta cantidad de calor podría ser generada por la misma cantidad de trabajo solamente si dicho trabajo es totalmente convertido en energía calorífica. Esta cantidad de energía calorífica recibe el nombre de capacidad calorífica (C) y se define por

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \quad (1.6)$$

Donde ΔQ es la cantidad de calor que debe ser transferida a un sistema para que este experimente un cambio ΔT en su temperatura. La unidad de C en el SI es el J/K (Julios por Kelvin) que en ocasiones se expresa también como cal/°C y sus múltiplos en kilo (10^3), donde la equivalencia entre cal y J es:

$$1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$$

Sin embargo, en el sistema inglés se considera como unidad de medida del calor al BTU (Unidad Térmica Británica), cuya equivalencia es:

$$1 \text{ BTU} = 1,0551 \text{ kJ} = 0,252 \text{ kcal}$$

Capacidad calorífica específica

Dado que la capacidad calorífica depende de la cantidad de masa del sistema (a mayor masa a calentar mayor cantidad de calor necesaria) se define una capacidad calorífica específica mediante la ecuación:

$$c = \frac{\Delta Q}{m\Delta T} \quad (1.7)$$

Donde la unidad de c es J/gK (Julios por gramo por Kelvin), aunque al ser valores pequeños, comúnmente se utiliza el múltiplo kilo (10^3).

Calor latente

Este concepto hace referencia a la cantidad de calor absorbida o desprendida que es necesaria para que una sustancia cambie de fase (estado) de sólido a líquido, mediante calor de fusión, o también de líquido a gaseoso, mediante calor de vaporización, y viceversa respectivamente. Se define como:

$$L = \frac{Q}{m} \quad (1.8)$$

Donde la unidad es kJ/kg (kilojulio por kilogramo) o cal/g (caloría por gramo).

Transmisión de calor

Los tres mecanismos de transferencia de energía en forma de calor mediante los cuales se puede alcanzar el equilibrio térmico son: convección, conducción y radiación, en la mayoría de ocasiones uno de ellos predomina, pero hay casos en los cuales dos (o los tres) se deben considerar en los cálculos de transmisión o transferencia de calor.

Convección

Este mecanismo es típico de los fluidos en donde el calor se transfiere mediante el desplazamiento de las moléculas de mayor energía a las zonas más frías hasta que la temperatura sea uniforme, cuando el fluido se calienta sus moléculas se expanden haciendo que su densidad disminuya y se eleven, se dice entonces que la convección es de tipo natural cuando este desplazamiento debido al cambio en la densidad del fluido no tiene ningún elemento externo que realice la mezcla de las zonas calientes y frías, por el contrario si el sistema presenta dicho elemento (ventilador, agitador, etc.) se dice que la convección es de tipo forzada.

Conducción

Este mecanismo es típico de los sólidos en donde el calor es transferido debido al contacto directo de las moléculas de las zonas más calientes, que vibran con mayor energía, con las moléculas de las zonas más frías, hasta que se alcance el equilibrio térmico. En los metales, una mayor parte del calor lo transportan los electrones (que están relativamente libres dentro del material) lo que produce altas conductividades eléctricas y térmicas (Blatt, 1991).

Radiación

Este mecanismo tiene como principal ventaja que no se necesita ningún medio material para la transferencia de energía, es decir, los sistemas no necesitan estar en contacto directo para que se transfiera el calor debido a que los cuerpos más calientes irradian energía en forma de ondas electromagnéticas las cuales se pueden propagar por distintos medios (Blatt, 1991).

Termodinámica

Según (Blatt, 1991) es la ciencia encargada del estudio del calor y del movimiento, aunque también se consideran las relaciones entre calor y energía o trabajo mecánico, eléctrico o de cualquier otra forma, en donde la virtud particular es que posee una amplia generalidad debido a que no necesita ni proporciona información sobre el comportamiento a nivel molecular de un sistema, solo sus variables de estado como la presión, el volumen, la temperatura, la energía interna y magnetización. La ley cero de la termodinámica se la mencionó en la sección dedicada a la explicación de las propiedades térmicas del Capítulo II, aunque no de manera formal, y hace referencia a que si dos sistemas están en equilibrio térmico con un tercer sistema, todos se encuentran en equilibrio térmico entre sí.

Energía interna

Según (Fernández, 2022) se define como la sumatoria de las formas de energía que poseen las moléculas que componen un determinado sistema, siendo las principales contribuyentes la energía cinética (debido a su movimiento) y la energía potencial gravitatoria

(debido a sus posiciones relativas en el interior del sistema), aunque también considera las contribuciones de la energía química (fuerzas interatómicas) y hasta las fuerzas nucleares. La energía interna se representa por la U y su unidad es el J (Julio).

Trabajo termodinámico

Según (Fernández, 2022) debido a que la energía interna de un sistema no es alterada por el trabajo mecánico como tal, en termodinámica se considera el tipo de trabajo que si sea capaz de variar dicha energía, y este es el trabajo termodinámico, el cual es definido como la transferencia de energía entre un sistema y el entorno mediante métodos que no dependen de la diferencia de temperatura. El tipo de trabajo termodinámico de mayor interés para el presente trabajo es el que surge cuando un fluido se expande o comprime, al cual se denomina trabajo p-v (presión-volumen) y se expresa mediante la ecuación:

$$\Delta W = p\Delta V \quad (2.1)$$

Donde W es el trabajo que el sistema intercambia con el entorno, siendo su unidad el J (julio), p la presión con su unidad el Pa (Pascal) o la atm (atmosfera) considerando su equivalencia como $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$, y ΔV es la variación del volumen con su unidad de medida establecida como m^3 (metro cúbico) aunque es común también la utilización del L (litro).

Hay que hacer una aclaración importante con respecto a la distinción del trabajo realizado por el sistema termodinámico y sobre el sistema termodinámico, (Blatt, 1991) expone un ejemplo considerando el caso de la compresión de un fluido dentro de un cilindro, el trabajo realizado sobre el sistema termodinámico por algún dispositivo del entorno (pistón) incluye también el trabajo realizado por el eje, el frotamiento y la agitación. De estos trabajos, el realizado por la compresión es el denominado trabajo termodinámico como tal, debido a que cambia el volumen del sistema, mientras que los otros trabajos son externos al sistema termodinámico en cuestión.

Primera ley de la Termodinámica

Establece la relación entre el intercambio de la energía en forma de trabajo o calor y la energía interna de un sistema, en donde generalmente se considera como una aplicación térmica del principio de conservación de la energía, la cual no se crea ni se destruye, solo se transforma. De manera formal esta ley determina que la energía interna de un sistema aumenta cuando se efectúa un trabajo sobre él o se le transfiere calor y está definida por la ecuación:

$$\Delta Q = \Delta U + \Delta W \quad (2. 2)$$

Donde,

ΔQ = Calor de un determinado sistema el cual es intercambiado con su entorno.

ΔU = Aumento de energía interna de un determinado sistema.

ΔW = Cantidad de trabajo que un determinado sistema intercambia con su entorno.

Un sistema termodinámico puede estar sujeto a varias clases de cambios con respecto a sus variables de estado como la temperatura, la presión y el volumen, ya sea intercambiando o no el calor, y se clasifican en:

- Isotérmicos ($T = cte$): Son los procesos en los cuales la temperatura del sistema permanece constante, para el caso del gas ideal al depender la energía interna solamente de la temperatura, la $\Delta U = 0$ por consiguiente, $\Delta Q = \Delta W$.
- Isocóricos ($V = cte$): Son los procesos en los cuales el volumen del sistema permanece constante, por lo que en este caso no se efectúa ningún trabajo por o sobre el fluido, por tanto $\Delta W = 0$ por consiguiente $\Delta U = \Delta Q$, lo que indica que el intercambio de calor es la única manera de variar la energía interna de un sistema en el que su volumen permanece constante.
- Isobáricos ($p = cte$): Son los procesos en los cuales la presión permanece constante, por lo que todo el trabajo que realiza el sistema para cambiar su volumen es la sumatoria de todas las contribuciones $\Delta W = p\Delta V = p(V_2 - V_1)$. Los procesos

isobáricos hacen posible la definición de una nueva variable de estado denominada entalpía H .

- Adiabático ($Q = 0$): Son los procesos en los cuales un sistema no realiza intercambio de calor, por tanto $\Delta Q = 0$ por consiguiente $\Delta U = \Delta W$, lo que indica que el trabajo utilizado para aumentar la energía interna aumenta también la temperatura del sistema.

Segunda ley de la Termodinámica

Según (Blatt, 1991) esta ley se basa en el hecho experimental de que no todo el calor que tiene un sistema puede transformarse en trabajo mecánico (caso contrario de la primera ley), y está definida a través de 3 enunciados equivalentes:

- Ningún proceso hace posible de manera espontánea que el calor fluya, por sí mismo, de un cuerpo frío a uno más caliente. Es conocido también como el enunciado de Clausius.
- Ningún proceso hace posible la extracción de calor para convertirlo en trabajo sin que aparezcan otros cambios en el sistema o en su entorno. Es conocido también como el enunciado de Kelvin-Planck.
- Un proceso cualquiera que se realice en un sistema aislado, la entropía del sistema puede aumentar (proceso irreversible) o ser constante (proceso reversible).

Cámara Climática

Generalidades

Las cámaras climáticas también llamadas climatizadas, de ensayo o de estabilidad son equipos utilizados para aplicaciones las cuales necesitan de la simulación total o parcial de condiciones controladas de temperatura y humedad durante periodos largos de tiempo, en donde a los instrumentos que están expuestos a dichas condiciones climáticas se les pueda realizar un estudio (ensayo) o verificación de su calidad y comportamiento.

De manera general, estructuralmente se componen de:

- Una carcasa exterior construida generalmente de tol galvanizado.
- Una cabina construida generalmente de algún material metálico y que está aislada térmicamente del exterior.
- Una compuerta que sirve como acceso para la introducción de los instrumentos bajo prueba la cual tiene como características el proporcionar un cierre hermético, la capacidad de resistir las diferencias de presiones con el exterior y el poder observar los valores medidos por los instrumentos en el interior de la cabina.
- Los procesos adecuados para acondicionar el aire dentro de la cabina, en los que se incluyen los elementos generadores de calor y de humedad, los controladores o reguladores que pueden ser de tipo dedicado, industrial, comandados por PC o por microcontroladores, etc., los sensores para medir las distintas variables de interés y los actuadores propios de los procesos como ventiladores, electroválvulas, evaporadores, etc.
- Paneles de control para el establecimiento a voluntad de los valores de temperatura y humedad, mediante elementos mecánicos (botones o perillas de selección) o digitales (pantallas HMI dedicadas).
- Interfaces visuales para la figuración de los procesos y la visualización de los datos obtenidos tanto de manera numérica como gráfica, generación de históricos y manejo de alarmas.
- Un software dedicado que permita la programación y control de los diversos procesos.
- Comunicación mediante diferentes protocolos como RS232, ethernet o USB.

El principal reto al momento de realizar el diseño o repotenciación de una cámara climática es hacer que todos los sistemas constitutivos sean eficientes, para ello es importante

la delimitación de la aplicación de la cámara para tomar la decisión de que diseño es el más adecuado para cumplir con las necesidades de la aplicación considerada, que para el presente trabajo es la calibración de instrumentos de medición.

Criterios estadísticos de desempeño

Homogeneidad

Este criterio brinda información acerca de las diferencias entre las mediciones de temperatura y humedad en las posiciones donde se colocan los respectivos sensores. Es de gran utilidad debido a que muestra el grado de dispersión de estas mediciones y determina si representan diferencias significativas o no para estudios de caracterización del volumen útil de una cámara climática. Sin embargo, en algunos casos se considera también la inhomogeneidad de temperatura y humedad relativa, las cuales se determinan mediante la desviación máxima de la temperatura y humedad relativa de una ubicación de esquina o pared con respecto de la ubicación de referencia, que generalmente es el centro del volumen útil, según lo indicado en la norma DIN EN 60068 Parte 3-5:2018. Ensayos ambientales o DIN 50011-12. Artificial climates in technical applications.

Según la (Red Colombiana de Metrología, 2019) un aspecto importante a resaltar es que considerando la norma DIN EN 60068 Parte 3-5:2018 el número de ubicaciones de medición en el volumen útil (sujeto a estudio de caracterización) tanto en sistemas de convección natural o forzada, debe ser de al menos 9 ubicaciones, posicionadas principalmente en los puntos de las esquinas y el centro espacial del cuboide que abarca dicho volumen útil.

Uniformidad

Este criterio brinda información acerca de cómo está distribuida la temperatura del volumen útil de la cámara climática, permitiendo de esta manera localizar puntos más calientes o fríos y es importante debido a que si los resultados demuestran una uniformidad adecuada, se puede aprovechar de mejor manera todo el volumen útil generado por la cámara.

Estabilidad

Este criterio permite indicar que tan buena es la cámara climática para mantener los valores de temperatura y humedad seteados durante prolongados periodos de tiempo. De manera alterna en algunos casos se considera también el estudio de inestabilidad temporal que se determina durante un periodo de al menos treinta minutos después de que cámara climática haya alcanzado la estabilidad, con al menos 30 valores de medición a intervalos lo más constantes posibles de la ubicación de referencia.

Sistema de Calefacción

El objetivo principal de este sistema es aumentar la temperatura de un espacio determinado, para el caso de las cámaras climáticas el espacio en cuestión es el volumen útil al interior de la cabina. Existen diversas maneras de generar calor de manera controlada, siendo el factor determinante para un diseño eficiente la selección adecuada del sistema de generación que más se adecúe a la aplicación considerada, esta elección dependerá de diversos factores como el tipo de fuente de energía, el tamaño del espacio a calentar, la distribución de calor requerida, el tipo de aislamiento a utilizar, el propósito de la aplicación, etc., por lo que para el presente trabajo se consideran las alternativas descritas a continuación.

Calefacción eléctrica

Este tipo de sistemas basa su funcionamiento en la conversión de la energía eléctrica en calor, aprovechando una característica del Efecto Joule en la cual si se dispone de materiales conductores con alta resistencia (menor conductividad) y se hace circular una corriente eléctrica por dicho material se generará calor, esto debido a que los electrones al chocar con las moléculas del material transfieren su energía (disminuyendo su velocidad), lo que se traduce a un aumento de temperatura por ende, aumento de calor. Una de las aleaciones más utilizadas es la de níquel-cromo, llamada nicomo o nicrom, debido a su alta resistividad, buena resistencia a la oxidación, excelente estabilidad a las altas temperaturas y su bajo CRT (coeficiente resistivo de temperatura). Este tipo de sistemas presenta varias

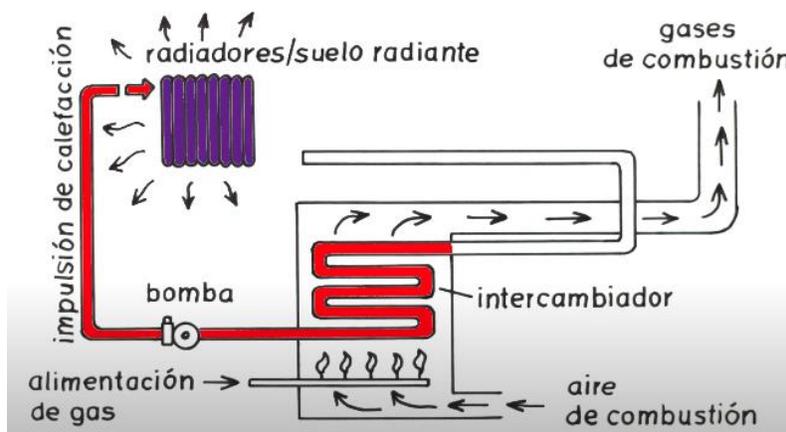
ventajas como la accesibilidad y la fácil instalación en la mayoría de entornos, además de que es mucho más barato en comparación con los demás sistemas, existen algunas variaciones que utilizan este sistema como los emisores termoeléctricos de bajo consumo llamados radiadores de agua o aceite (de muy baja densidad) donde su principal ventaja es que se siguen emitiendo calor incluso después de apagarlos, la diferencia entre ellos es que los radiadores de aceite son más seguros que los de agua ya que no generan presión interna.

Calefacción por gas

Este tipo de calefacción basa su funcionamiento en la combustión de algún gas, generalmente gas natural aunque también es utilizado el propano o el gasóleo, el cual calienta un arreglo de tuberías por las que circula agua (intercambiador de calor), el agua caliente se conduce a través del sistema de distribución por medio de una bomba hacia un radiador (o suelo radiante) los cuales se calientan y emiten calor al espacio a través de su superficie mediante convección, una vez finalizado este ciclo en la salida del radiador se obtiene agua fría, que nuevamente es recirculada al intercambiador de calor para volver a repetir el ciclo, como lo muestra la Figura 7.

Figura 7

Principio de funcionamiento del sistema de calefacción por gas



Nota. Figura tomada de (Calefacción Caloryrío.com, 2021)

Sistema de Refrigeración

El objetivo principal de este sistema es extraer el calor existente en un espacio determinado para que la temperatura disminuya y se pueda mantener en valores constantes por largos periodos de tiempo, convirtiendo a la refrigeración en un proceso indispensable para los sectores productivos en temas de almacenamiento y acondicionamiento de áreas específicas. La constante búsqueda de sistemas de refrigeración más eficientes y con mejores prestaciones han permitido establecer dos tipos de refrigeración mecánica que actualmente son los más utilizados en las diferentes aplicaciones, los sistemas por compresión y por absorción, sin embargo, al ser sistemas cuya implementación necesita de varios elementos, muchos de ellos contaminantes (líquidos refrigerantes), hace necesario la exploración de otros métodos que permitan obtener las mismas bajas temperaturas pero siendo más eficientes y con un costo reducido, estos métodos son los resultados del estudio del efecto termoeléctrico que con el avance de la tecnología han podido ser escalados hasta aplicaciones que habitualmente solo implementan refrigeración mecánica.

Refrigeración por compresión

Este tipo de refrigeración se basa en los ciclos de compresión de vapor y se caracteriza porque el fluido (refrigerante – gas con propiedades especiales) es forzado mecánicamente a circular de manera cíclica a través de un circuito cerrado de tuberías, en donde absorbe el calor en ciertas partes y lo disipa en otros, esto debido a la creación de zonas de alta y baja presión. En su forma más simple, el ciclo de compresión de vapor consta de cuatro partes: evaporación, compresión, condensación y expansión, en los cuales el líquido refrigerante va cambiando su estado (de líquido a gaseoso y viceversa) para obtener zonas donde cede calor y otras donde absorbe como lo muestra la figura 8, estas partes están descritas a detalle a continuación:

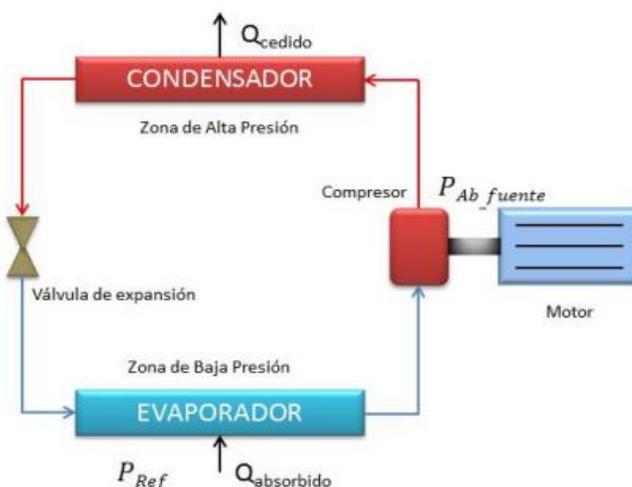
Lado de alta presión: El compresor es la parte básica y fundamental del sistema de refrigeración ya que es el encargado de mover el refrigerante por todo el circuito, esto lo realiza mientras ejecuta dos funciones consecuentes: succiona el refrigerante (que en ese momento

está como gas a muy baja temperatura y baja presión) y lo comprime (aumentando su presión y forzando un aumento de su temperatura) enviándolo a un intercambiador de calor, denominado unidad condensadora, en la cual se genera nuevamente un cambio de estado del refrigerante (de gaseoso a líquido) debido a que el refrigerante está cediendo ese calor al ambiente (Q_{cedido}), finalmente el refrigerante en estado líquido es enviado a la válvula de expansión la cual controla el flujo de refrigerante (reduciendo su presión y forzando una caída de temperatura) y lo envía hacia otro intercambiador de calor denominado evaporador.

Lado de baja presión: El evaporador es el encargado de absorber el calor del ambiente para transferirlo al refrigerante $Q_{absorbido}$ (el cual está en proceso de conversión de líquido a gaseoso a baja presión) por lo que se puede decir que es la parte donde se “genera el frío” que mediante ventiladores se puede propagar a espacios determinados, una vez que el gas refrigerante sale del evaporador es enviado nuevamente al compresor para volver a empezar con el ciclo.

Figura 8

Sistema de refrigeración mecánica mediante ciclo de compresión de vapor



Nota. Figura tomada de (Moreno, 2020)

La principal ventaja de estos sistemas radica en el hecho de que, al ser el tipo de refrigeración más comúnmente utilizado, también es el más estudiado, por lo que siempre

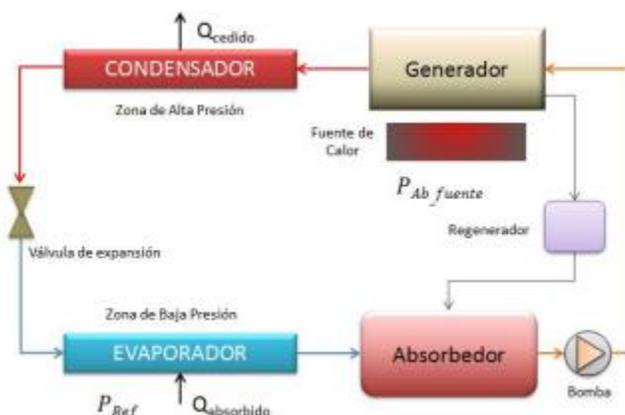
están en constante evolución para ser más eficientes, además de esto, según Moreno (2020) se producen de dos a cuatro veces la energía frigorífica que la energía eléctrica que consumen. Sin embargo, las desventajas de estos sistemas es que requieren un alto consumo de energía para su operación y el gran impacto ambiental debido al efecto invernadero que genera la utilización de refrigerantes.

Refrigeración por absorción

Este sistema de refrigeración también aprovecha la cualidad de fluidos de absorber o disipar calor al cambiar de estado, físicamente tiene la misma estructura que la refrigeración por compresión y su funcionamiento se basa en la capacidad de algunas sustancias de absorber a otras en la fase de vapor (mezcla de dos fluidos de diferentes fases), en donde el fluido con el menor punto de ebullición (temperatura de saturación) funciona como el refrigerante, mientras que el otro fluido funciona como absorbente, siendo sistemas dependientes más de la energía térmica que de la energía eléctrica, las sustancias más comúnmente utilizadas son el amoníaco-agua o el bromuro de litio-agua. El ciclo completo de refrigeración consta de seis partes: generación, condensación, evaporación, absorción, expansión, y bombeo, que trabajan de la misma manera que el sistema de compresión. Para el ejemplo del amoníaco-agua, a la salida del evaporador se tiene amoníaco como vapor saturado que ingresa al absorbedor, en el cual se mezcla con agua (proveniente del generador) generando una reacción química llamada solución fuerte (necesita también de agua helada), esta solución fuerte es bombeada hacia el generador el cual necesita de una fuente de calor externa, que puede ser celdas solares o de plantas térmicas, que calentará la solución, separando de esta manera el agua del amoníaco, enviando al condensador solamente vapor de amoníaco y haciendo recircular agua al absorbedor en el cual se mezclará con el amoníaco del evaporador, reiniciando una vez el ciclo de refrigeración, como lo muestra la figura 9.

Figura 9

Ciclo de refrigeración por absorción



Nota. Figura tomada de (Moreno, 2020)

Refrigerantes

Se denomina refrigerante al compuesto químico líquido que tiene la capacidad de absorber el calor cuando se vaporiza y de ceder calor cuando se condensa con la finalidad de reducir o aumentar la temperatura de un entorno, respectivamente. Para las aplicaciones donde estén implementados sistemas de refrigeración, los refrigerantes a utilizarse deben cumplir ciertas características como que no deben ser corrosivos ni inflamables, deben tener baja toxicidad, deben tener una baja temperatura de congelamiento, un alto calor latente de evaporación y específico de vapor, deben poseer una baja viscosidad, una alta conductividad térmica, deben ser químicamente inertes en condiciones normales de operación y lo más importante no deben generar daños al medio ambiente, ni desarrollarse como un catalizador que pueda deteriorar el equilibrio ecológico. Existen varios tipos de refrigerantes, los halogenados cuya característica es que en su composición química tiene cloro, flúor (o ambos) y se los identifica con la letra "R" siendo los más comunes los clorofluorocarbonos (CFC – R12/CFC12), hidroclorofluorocarbonos (HCFC – R22/HCFC22) y los hidrofluorocarbonos (HFC), sin embargo, según (Benavides & Carrasco, 2010) existen refrigerantes que están compuestos de la mezclas entre dos o más sustancias con diferentes volatilidades con la

finalidad de obtener temperaturas de condensación y ebullición variables, estas son denominadas como mezclas zeotrópicas identificadas por el número "4" (R404A, R407A, R407B, R407C, R410A, R410) y azeotrópicas identificadas por el número "5" (R502, R500 y R503). Hay que considerar un aspecto importante y es que los CFC son sumamente dañinos para el medio ambiente, mientras que los HCFC no producen daños en la capa de ozono, pero si producen gases de efecto invernadero, la limitación de la producción y el uso de estos refrigerantes está basado en los estudios gestados por el Protocolo de Montreal.

El Efecto Termoeléctrico

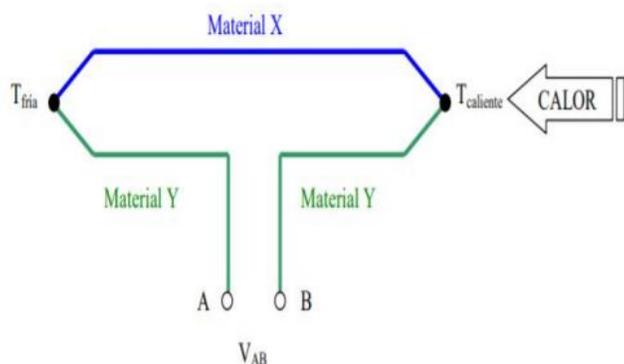
El efecto termoeléctrico es simplemente la obtención de un voltaje a partir de la diferencia de temperatura aplicado a dos materiales diferentes y viceversa, tradicionalmente al fenómeno termoeléctrico lo componen tres efectos consecuentes basados en la dirección de la transformación: el efecto Seebeck, efecto Peltier y el efecto Thomson. Debido a que el voltaje es una de las magnitudes que más fácil se puede controlar y registrar con precisión, las aplicaciones donde se pueden utilizar dispositivos basados en el efecto termoeléctrico abarcan procesos de refrigeración, calefacción y medición de temperatura.

Efecto Seebeck

Llamado así en honor a su descubridor Thomas Johann Seebeck que en el año 1821 mediante experimentos descubrió la generación de una corriente eléctrica cuando existe una diferencia de temperatura en la unión de dos metales diferentes, como se muestra en la Figura 10.

Figura 10

Esquema de aplicación del Efecto Seebeck



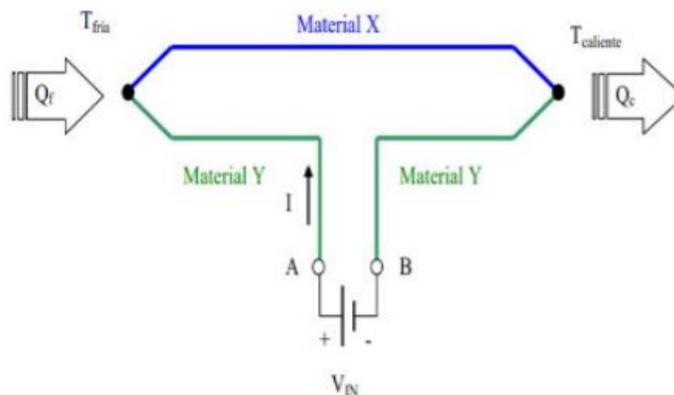
Nota. Figura tomada de (Moreno, 2020)

Efecto Peltier

Llamado así en honor a su descubridor Jean Charles Peltier que en el año 1834 mediante experimentos descubrió la generación de una diferencia de temperatura en las uniones de dos materiales diferentes (calentando una unión y enfriando la otra unión) al hacer circular corriente eléctrica por el circuito, siendo en pocas palabras el inverso del efecto Seebeck, como se muestra en la Figura 11.

Figura 11

Esquema de aplicación del Efecto Peltier



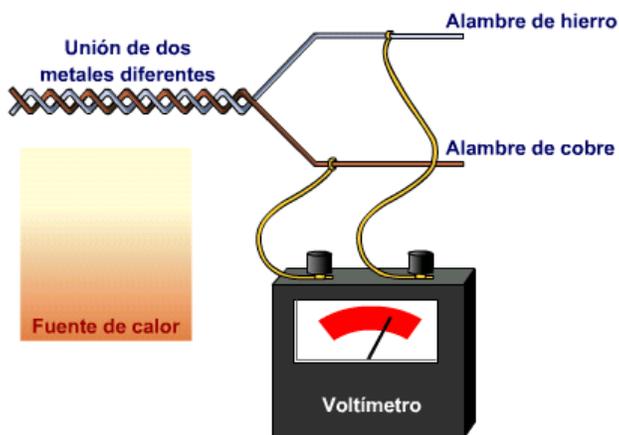
Nota. Figura tomada de (Medina, 2019).

Efecto Thomson

Llamado así en honor a su descubridor William Thomson (Lord Kelvin) que en el año 1854 mediante el estudio del efecto Seebeck y Peltier descubrió un tercer efecto que es producto de ambos, el cual consiste en la absorción o liberación de calor cuando se hace circular corriente eléctrica a través de un solo conductor homogéneo en dirección del gradiente longitudinal de la temperatura, como lo muestra la Figura 12.

Figura 12

Esquema de aplicación del Efecto Thomson



Nota. Figura tomada de (Moreno, 2020).

Refrigeración Termoeléctrica – Celda de Peltier

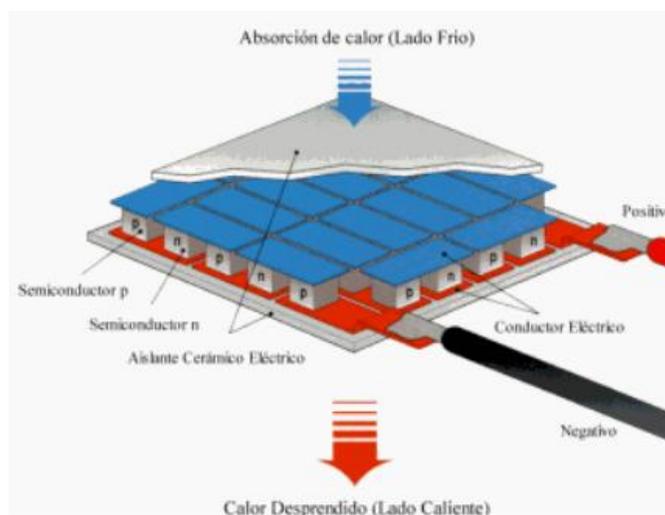
El enfriamiento debido a efectos termoeléctricos comenzó formalmente a partir de los años treinta con los estudios de Mária Telkes (primer generador termoeléctrico y primer sistema de calefacción residencial – “Casa de Dover”), esto junto al eminente desarrollo de la electrónica y nuevos materiales semiconductores permitían rendimientos aún mayores, caracterizando a la termoelectricidad como una nueva tecnología de refrigeración que brindaba una enorme flexibilidad de opciones en el diseño de módulos termoeléctricos.

El principal dispositivo que aprovecha las ventajas del efecto Peltier son las celdas de Peltier los cuales se encuentran fabricadas por una serie de semiconductores de tipo n y tipo p

unidas entre sí por un metal conductor que facilita la conversión de energía eléctrica en energía térmica, estas celdas están constituidas por un arreglo de células de Peltier que físicamente son bloques de alrededor de 1 mm^3 dispuestos eléctricamente en serie y térmicamente en paralelo, estas células al tener dimensiones reducidas pueden alcanzar potencias frigoríficas de alrededor de $0,5 \text{ W}$ por lo que para potencias mayores se necesita de un arreglo de mínimo treinta células de Peltier, dando como resultado una mayor superficie radiante y por ende, una mayor potencia refrigerante como lo muestra la Figura 13, estos criterios son en los que se basan los fabricantes para ofrecer al mercado una gran variedad de celdas de Peltier.

Figura 13

Composición de una celda de Peltier estándar

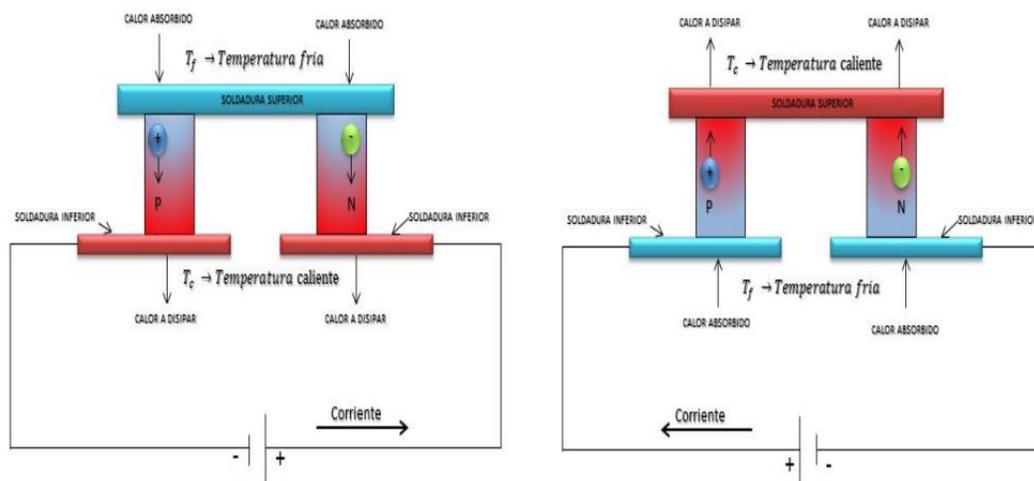


Nota. Figura tomada de (Moreno, 2020).

Prácticamente un sistema de refrigeración basado en celdas Peltier es una bomba de calor en donde el calor se transfiere de un lado al otro de la celda, es decir, de lado de baja temperatura al de alta temperatura (en dirección contraria del gradiente térmico) utilizando voltaje de corriente continua como energía de alimentación, por lo tanto, la polarización es sumamente importante porque esta define cual es la cara de la celda que disipará el calor y cuál es la que absorberá, como lo muestra la Figura 14.

Figura 14

Diferencia de polarización de las celdas Peltier



Nota. Figura tomada de (Moreno, 2020).

Sistema de Humidificación

Humedad Relativa

Según (Çengel & Michael, 2011) un volumen específico de aire puede contener una determinada cantidad de humedad, por lo tanto, se define a la humedad relativa como la relación entre la cantidad real de humedad en un determinado volumen de aire (a cierta temperatura) y la máxima cantidad de humedad que el volumen de aire puede contener (a la misma temperatura), tomando un valor de 0% para un volumen de aire totalmente seco y un valor de 100% para un volumen de aire totalmente saturado. La cantidad de humedad en un volumen específico de aire se caracteriza por completo mediante la temperatura y la humedad relativa.

Humidificación

Este sistema es el encargado de inyectar y eyectar humedad en el volumen del aire contenido en la cabina de la cámara climática en donde el elemento principal es el

humidificador que es un dispositivo capaz de convertir agua en vapor de agua mediante varios mecanismos de conversión como la calefacción tradicional o el ultrasonido.

Humidificadores de vapor caliente

Su principio de funcionamiento se basa en el calentamiento de agua del depósito hasta el punto de ebullición para que el vapor generado pueda ser expulsado hacia el exterior, dentro de sus principales ventajas está que cumple con su función de mantener la humedad del aire y que se puede utilizar agua potable con normalidad, sin embargo, las desventajas son aún mayores ya que al contener agua hervida puede ocasionar algún accidente para el operador o para el equipo en caso de algún contratiempo, también es un sistema de generación mucha más ruidos y más lento debido a que el agua debe hervir para poder obtener el vapor de agua, además de esto calienta el entorno del depósito y el vapor al estar caliente genera un componente de carga de calefacción adicional que hay que tomar en cuenta, y finalmente aumenta la generación de condensación en las paredes de la cabina, según (De González, s.f.) esto se debe a que cuando la humedad se incrementa hasta alcanzar el 100% se produce el fenómeno de condensación en donde el vapor de agua (en estado gaseoso) se convierte en líquido al entrar en contacto con una superficie fría lo que además se debe impedir para que no existan daños en los instrumentos ingresados a calibración.

Humidificadores de vapor frío

Este tipo de humidificadores se clasifican en dos tipos dependiendo de cómo consiguen convertir el agua del depósito en vapor:

Evaporativos (de mecha)

Estos dispositivos funcionan al hacer pasar aire seco del ambiente por un filtro de mecha que se encuentra húmedo dentro del humidificador, cuando el aire se humedece, la humedad es evaporada al ambiente a través de un ventilador. Además de esto, el filtro de mecha retiene las impurezas, sedimentos y minerales que pueden aparecer para que el vapor de agua que se distribuye al ambiente sea lo más limpio posible.

Ultrasónicos

Estos dispositivos se componen de un transductor que una vez introducido en el depósito hace vibrar el agua a una velocidad ultrasónica lo que genera un tipo de vapor muy fino y fresco, además de esto el dispositivo cuenta con un ionizador el cual tiene como principal objetivo emitir iones negativos al ambiente los cuales atacarán a todas las partículas contaminantes que estén presentes manteniendo al aire más limpio. Una de las principales desventajas es que se necesita de la utilización de agua destilada para evitar la distribución de bacterias al ambiente, sin embargo las ventajas mucho mayores ya que estos dispositivos no calientan el agua (evita posibles quemaduras), en las paredes del espacio cerrado no se genera condensación ya que el vapor generado no es caliente, la velocidad de generación de vapor es inmediata (al momento de energizar el humidificador se empieza a generar el vapor) y además son silenciosos ya que no el sistema de generación no emite ningún ruido.

Instrumentación

La instrumentación se define como el grupo de equipos e instrumentos que sirven a los especialistas en la medición, conversión y registro de todas las variables que están relacionadas en un proceso particular con la finalidad de ser transmitidas, evaluadas y controladas.

Sensores

Se define a un sensor como un dispositivo capaz de detectar una condición de cambio de una variable física en específico (temperatura, presión, flujo, etc.) y permiten realizar una comunicación efectiva entre el entorno físico que envuelve un proceso y los sistemas de medición y control implementados, por tal motivo es de vital importancia la selección adecuada de los sensores que se pretenden utilizar para obtener información de las variables físicas, en general se toman en cuenta aspectos como el principio de funcionamiento, rango de medición, precisión, resolución, voltaje de alimentación, tiempo de respuesta, protocolo de comunicación y condiciones en las cuales se debe desarrollar la medición, por citar los de mayor relevancia.

En el presente trabajo las principales variables a considerar son la temperatura y la humedad relativa por lo cual se especifica el funcionamiento de los principales sensores disponibles en el mercado.

Sensor de temperatura y humedad

Existe una gran variedad de sensores de temperatura debido a que es una de las magnitudes físicas de mayor significancia dentro de la industria en donde las principales limitaciones están definidas por el rango de medida, la velocidad de captación de los cambios de temperatura, la distancia a la que se encuentra el sensor del dispositivo indicador, registrador o controlador y el protocolo de comunicación. Los principales tipos de sensores dedicados para temperatura utilizados a nivel industrial y que se encuentran disponibles en el mercado son:

RTD

Estos sensores son pasivos de tipo resistivos, es decir, varían la resistencia del conductor eléctrico con respecto a la variación de temperatura, esto debido a que a los electrones se les dificulta el transporte a través del conductor porque los iones vibran con mayor amplitud al incrementarse la temperatura. Para su construcción se deben considerar materiales cuyos coeficientes de resistencia y resistividad sean altos para que la sensibilidad sea mayor y exista una relación lineal entre la resistencia y la temperatura, los materiales más comunes resultan de aleaciones de metales como el platino, cobre, níquel y molibdeno. Las principales ventajas es que estos sensores funcionan en un rango de temperatura muy amplio, poseen una gran sensibilidad, presentan una buena exactitud y repetibilidad y son muy estables en el tiempo (presentan derivas de 0,1 °C al año), mientras que las principales desventajas es que su velocidad de reacción se ve limitada por su tamaño, son sensibles ante vibraciones o golpes y tienen un costo mayor.

Termocuplas/Termopares

Estos sensores son activos basados en el efecto Seebeck, dentro de sus principales características es que son sensores simples, mecánicamente más robustos, con un mejor tiempo de respuesta y de bajo costo siendo los más utilizados en la industria por su capacidad de medición y su resistencia a las altas temperaturas razón por la cual se encuentran generalmente encapsulados como medida de protección ante las condiciones extremas. Existen varios tipos de termocuplas que adquieren su nombre por el material de su construcción, teniendo a las de tipo K (Cromo/Aluminio) con un rango de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sensibilidad de $\sim 41\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, tipo E (Cromo/Constantán) ideales para bajas temperaturas y sensibilidad de $\sim 68\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, tipo J (Hierro/Constantán) de rango limitado de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $750\text{ }^{\circ}\text{C}$, tipo N (Nicrosil/Nisil) ideales para altas temperaturas y sensibilidad de $\sim 10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$, tipo B (Platino/Rodio) ideales para temperaturas superiores a $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, tipo S (Hierro/Constantán) ideales para temperaturas hasta los $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ y sensibilidad de $\sim 10\text{ }\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ (Gutiérrez & Iturralde, 2017). Sin embargo, una de las principales desventajas es que deben utilizarse cables compensados para que la señal sea transportada sin modificaciones.

Termistores

Estos sensores son pasivos de tipo resistivos basados en semiconductores (variación de concentración de portadores), principalmente de níquel, cobre, cobalto y manganeso. Se clasifican en PTC (Positive Temperature Coefficient) los cuales aumentan su resistencia al aumentar la temperatura y los NTC (Negative Temperature Coefficient) que disminuye la resistencia al aumentar la temperatura. Dentro de las principales desventajas de estos sensores es que sufren de autocalentamiento por lo que hay que ser cautelosos con la tensión y al corriente que se hace circular por el sensor, presentan una mayor sensibilidad a costa de una gran pérdida de linealidad lo que dificulta la obtención de datos ya que a partir de ciertas temperaturas los datos mostrados sufren cambios muy bruscos, por lo que para su implementación generalmente se lo realiza en combinación con detectores de umbral.

Radiómetros infrarrojos

Cuando la temperatura a medir sobrepasa el punto de fusión del material del transductor o cuando el cuerpo caliente es demasiado pequeño que cambia su temperatura al realizar la medida, la medición mediante RTD, termopares o termistores es imposible. Para estos casos se utilizan los radiómetros infrarrojos, también denominados pirómetros de radiación, los cuales efectúan la medición de la temperatura de una superficie caliente a través de la conversión de la energía térmica radiada por cualquier parte de la superficie que esté inmersa en su FOV (campo de visión) en energía eléctrica, estos dispositivos tienen la principal característica que presentan una incertidumbre de 0,2 °C a 95% de confianza con lo cual se garantizan mediciones sumamente precisas.

Sensores de temperatura-humedad

Para algunas aplicaciones resulta más efectivo la integración de sensores de temperatura y humedad en un solo dispositivo con lo cual se obtendrían la información con una única sonda, para tal objetivo algunos fabricantes han desarrollado circuitos integrados especiales para la medición de las dos magnitudes, con la ventaja que la información puede ser transportada a través de varios protocolos de comunicación, algunos de estos dispositivos disponibles en el mercado son los sensores industriales de la serie HMT3x de la marca VAISALA los cuales integran el sensor HUMICAP el cual es de tipo capacitivo de polímero de película delgada que presenta una alta precisión y estabilidad a largo plazo, tamaño reducido, amplios rangos de medición de temperatura, mediciones de humedad desde 0% a 100%HR, totalmente funcional para entornos agresivos (polvo, suciedad y productos químicos) y como protocolo de comunicación utiliza RS-232C. Otro de los sensores de grandes prestaciones para múltiples aplicaciones son los sensores de la serie SHTx de la marca SENSIRION en sus versiones de bajo costo, estándar y de alto rendimiento, los cuales presentan las mismas características pero con un tiempo de respuesta mucho más rápida, un consumo de energía menor, un voltaje de alimentación menor y la capacidad de realizar pruebas y calibraciones

individualmente, además de esto posee varios protocolos de comunicación como I2C, PWM, SDM y salidas analógicas.

Transductores

Estos dispositivos son elementos claves dentro de la instrumentación ya que permiten el acondicionamiento de diferentes tipos de señales provenientes de las magnitudes físicas en señales eléctricas adecuadas (normalizadas) para el procesamiento en los sistemas DAQ (adquisición de datos). Muchos dispositivos como controladores o sistemas DAQ manejan diferentes tipos de entradas analógicas, por lo que es necesario la integración de módulos especializados que realicen la conversión de señales (propios de los mismos fabricantes), sin embargo, existen ocasiones donde no es posible conseguir esos módulos ya que no se encuentran en el mercado, son módulos que no son compatibles o definitivamente están descontinuados, o los dispositivos donde se va a procesar la información maneja otro tipo de señales normalizadas, para estos casos existen transmisores especiales para acondicionar la señal de la magnitud física en una señal particular (e.g. 4-20mA o 0-10VDC).

Actuadores

La principal funcionalidad de los actuadores es la generación algún efecto sobre un proceso acorde a una señal de control, existe una gran variedad de actuadores para diferentes aplicaciones y de diferentes características, sin embargo, se desarrolla la explicación de las resistencias de calefacción y los ventiladores que son los actuadores utilizados en el presente trabajo.

Resistencias eléctricas calefactoras

El principio de funcionamiento de estos actuadores se basa en el efecto Joule en el cual básicamente convierten energía eléctrica en calor, comúnmente están construidas por una aleación de cromo y níquel, ya que son los materiales con los cuales se logra una resistencia muy alta a altas temperaturas, además que son muy resistentes a impactos y tienen características inoxidables, sin embargo, existen también otras combinaciones en las cuales el

alambre de cromo y níquel está recubierto por una capa de cerámica y envuelto por una lámina de acero inoxidable, incoloy (níquel, hierro, cromo y cobre) o cobre cromado, la principal diferencia de las aleaciones radica en la aplicación a la cual está destinada, las cubiertas de incoloy están destinadas a alcanzar temperaturas mayores a los 800 °C sin oxidarse, mientras que las cubiertas de cobre cromado se utilizan para el calentamiento de líquidos mediante inmersión.

Ventiladores

Son dispositivos cuya finalidad es la impulsar el aire a una presión constante mediante el giro de un motor el cual tiene anclado aspas las cuales crean un flujo de aire en una cierta dirección, la energía para hacer girar el motor puede ser AC o DC, sin embargo, la diferencia radica en que el consumo de energía, el ruido, la velocidad, el flujo de aire y la eficiencia.

Normativa para el Diseño Eléctrico y de Control

Las normativas consideradas en la implementación del presente proyecto incluyen:

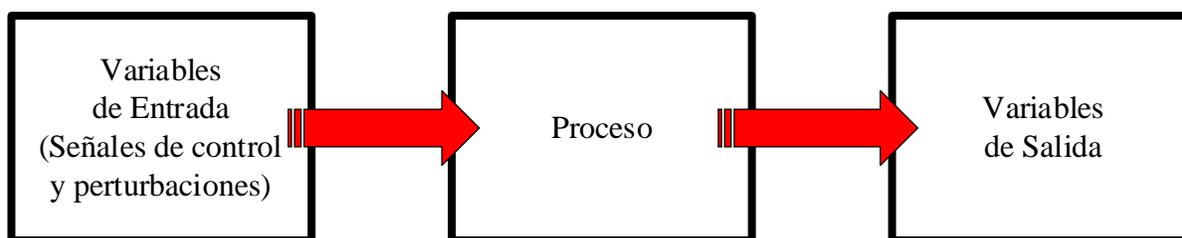
- UNE-EN IEC 61439. Conjuntos de aparata de baja tensión.
- NEC 15. Norma Ecuatoriana de la Construcción.
- NEC-SB-IE. Instalaciones Eléctricas.
- ANSI/ISA-S5.1. Identificación y símbolos de instrumentación.
- ANSI/ISA-S5.2. Diagramas lógicos binarios para operaciones de procesos.
- ISA-S5.3. Símbolos gráficos para control distribuido, sistemas lógicos y computarizados.
- ANSI/ISA-S5.4. Diagramas de lazo de instrumentación.
- ANSI/ISA-S5.5. Símbolos gráficos para visualización de procesos.

Sistema de Control

Un sistema de control es un concepto que se define como el conjunto de elementos interrelacionados que cumplen con un objetivo específico ejerciendo una influencia directa en el funcionamiento de algún proceso en particular, un proceso se caracteriza por recibir acciones externas denominadas variables de entrada que producirán otras acciones consecuentes denominadas variables de salida. Dentro de las variables de entrada están las que pueden ser manipuladas que reciben el nombre de variables de control y las que no pueden manipularse a las cuales se las denomina perturbaciones, como lo muestra la Figura 15.

Figura 15

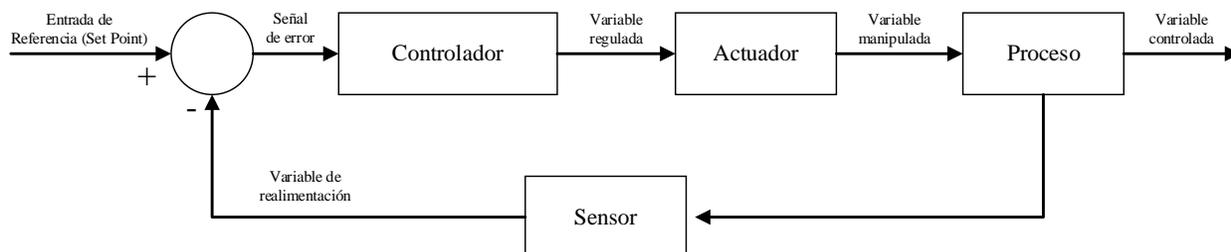
Esquema general de un proceso.



Para cumplir con el objetivo es necesario el desarrollo de una técnica de control la cual tiene como finalidad manipular las variables de control de modo que las variables de salida consigan alcanzar valores de interés, esta técnica de control debe garantizar la estabilidad del proceso, ofrecer robustez frente a perturbaciones y errores, ser lo más eficiente posible evitando comportamientos irreales o bruscos y debe ofrecer facilidad de operación en tiempo real. La Figura 16 muestra los elementos que conforman un sistema de control genérico el cual se compone en su forma más básica de sensores mediante los cuales se conocerán los valores de las variables medidas del proceso, el controlador que es el encargado de calcular la acción de control que debe aplicarse para conseguir los valores de interés (denominado Set Point) y los actuadores que son los mecanismos que ejecutan dicha acción de control.

Figura 16

Esquema general de un sistema de control



Técnicas de Control

Actualmente el desarrollo de la tecnología ha permitido el desarrollo de controladores con ventajosas funcionalidades con respecto a las técnicas de control existentes, las que más se utilizan en aplicaciones de calefacción son las de tipo control ON-OFF, PI y PID siendo el principal reto del diseñador seleccionar la técnica de control más adecuada para la aplicación a trabajarse.

Control On-Off

Es la técnica de control más sencilla ya que simplemente cuenta con dos estados: encendido (ON) y apagado (OFF), siendo el que más se usa comúnmente en la industria por su facilidad de operación y costos de implementación. Para las aplicaciones de calefacción al establecerse un valor de referencia (set point) el controlador activa la salida cuando la temperatura está por debajo del set point y la desactiva cuando está por encima, este tipo de control tiene una salida oscilatoria continua la cual genera cambios bruscos en la salida, esto se soluciona añadiendo un diferencial de activación y desactivación conocido como histéresis, en el cual se establecen ciertos valores límites máximos y mínimos para realizar la desactivación y activación del actuador, respectivamente.

Controlador Proporcional – Integral

Esta técnica de control combina la parte proporcional con la integral hallando un compromiso entre la respuesta transitoria y de estado estable. Se caracteriza por considerar una constante proporcional (K_p) la cual modifica el régimen transitorio de la respuesta temporal del proceso (a mayor ganancia de K_p mayor actuación ante el error) y considerar la integral del error con el propósito de evitar o disminuir el error en estado estable (la acción integral o de reajuste actúa directamente en el régimen de estado estable), consiguiendo de esta manera una señal de control proporcional al error y su integral. La ecuación del control PI está definida por:

$$m(t) = K_p * e(t) + K_i \int_0^t e(t) d(t)$$

$$m(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) d(t)$$

Donde:

$m(t)$ = Señal de control

K_p = Constante o ganancia proporcional

$e(t)$ = Señal de error

T_i = Tiempo integral

Controlador Lógico Programable PLC

Es un tipo de computadora diseñada específicamente para uso industrial, tiene la capacidad de almacenar, editar y programar una serie de instrucciones lógicas, temporizadas, funciones aritméticas, secuenciales, de comunicación, etc., con el objetivo de ejecutar un control efectivo de procesos, realizando una supervisión continua del estado de señales de entrada y salida de tipo analógicas o digitales. Su principal diferencia con los relés programables es que son más fáciles de corregir, son mucho más fiables, más rentables y

ofrecen una mayor versatilidad, principalmente en el intercambio de información mediante varios protocolos de comunicación. La programación en la mayoría de PLCs son generalmente de dos tipos: la lógica Ladder que es el lenguaje por defecto, el cual imita la estructura de los diagramas de circuito en escalera en donde cada línea representa una acción específica, por otro lado, se tiene el FBD (Diagrama de Bloques de Funciones) que es una forma mucho más sencilla de programar, ya que representa toda la lógica de programación mediante la conexión de bloques que simbolizan las funciones que ofrece el PLC.

Los formatos de presentación de los PLCs se dividen en compactos, modulares, los compactos se caracterizan porque se componen de una sola unidad, en donde se tiene entradas y salidas de tipo analógicas y digitales, comunicación, procesador y memoria, dentro de sus principales ventajas es que presentan facilidad para el transporte y el conexionado y son relativamente más baratos, mientras que sus desventajas es que no soportan expansión, poseen poca memoria y poseen limitaciones de lenguajes de programación y comunicación. Con respecto a los modulares, son dispositivos mucho más potentes en comparación con los compactos ya que todas sus funcionalidades (CPU, módulos de comunicación, E/S, expansión) pueden ser agregadas dependiendo la aplicación, dentro de sus principales ventajas es que se pueden programar en diferentes lenguajes (Ladder, FBD, SFC, texto estructurado), poseen una capacidad de expansión a más módulos, memoria capaz que ejecutar programas más complejos, compatibilidad entre marcas y la capacidad de escalamiento, mientras que sus desventajas es que son más caros y ya se necesita un cierto tipo de experiencia para su aprovechamiento total.

Monitoreo

Interfaz Humano Máquina – HMI

Generalmente los procesos están supervisados por personal calificado los cuales en muchas ocasiones cumplen también la tarea de operadores lo que complica el trabajo, para

gestionar esta complejidad es necesario implementar criterios de flexibilidad y usabilidad en los controles, y esto se realiza mediante la incorporación de una HMI (Human-Machine Interface) que son pantallas (físicas o digitales) mediante las cuales el operador puede comunicarse con el proceso de manera centralizada, esto es visualizando toda la información operativa y permitiendo el control en tiempo real. La información desplegada debe asegurar que cualquier persona pueda ser capaz de entender que está sucediendo con el proceso, por lo tanto, su representación se la realiza mediante símbolos, esquemas o gráficos, esta información comprende variables de proceso, estado de actuadores, gestión de alarmas, históricos, informes, etc.

Norma ISA 101

El estándar ISA 101 es un compendio de directrices y prácticas recomendadas para diseñar y jerarquizar la información relevante para controlar de manera eficiente un proceso, definiendo la terminología y estandarizando una metodología de diseño de una HMI efectiva la cual mejore el rendimiento, la calidad y fiabilidad del proceso en todas sus condiciones de funcionamiento. El alcance de esta norma incluye la jerarquía de menús, una convención para la navegación entre pantallas, gestión efectiva de los gráficos y colores, correcta aplicación de los elementos dinámicos, gestión efectiva de alarmas, jerarquía de acceso de personal, generación y gestión de históricos y bases de datos, visualización de pantallas de ayuda e información y las interfaces para la configuración (InfoPLC, 2015).

Normas ASHRAE

Las normas ASHRAE (por sus siglas en español Sociedad Americana de Aire Acondicionado, Refrigeración y Calefacción) es un estándar que contiene las directrices enfocadas en el diseño de edificaciones cómodas, seguras y energéticamente eficientes, es una norma ampliamente utilizada en la construcción, particularmente en el diseño de sistemas de calefacción, refrigeración, ventilación, calidad de aire interno, gestión energética y

sostenibilidad. Es un compendio de 22 normas que se actualizan cada 3 años y cuyo alcance abarca desde el diseño completo de un edificio energéticamente eficiente, hasta la operación y mantenimiento de un sistema de HVAC. Como se observa, el alcance es bastante amplio por lo que para aplicar de manera adecuada las normas ASHRAE se debe considerar criterios esenciales como el entendimiento del propósito o finalidad de cada norma, para con esto comprender los requisitos de la misma y poder encontrar la más adecuada que se ajuste a la aplicación que se esté desarrollando, para finalmente seguir toda la metodología sugerida. Las normas de interés son la primera parte en la cual se describen todos los fundamentos teóricos y la segunda parte que muestra la metodología para el cálculo de las cargas y el diseño de los sistemas de calefacción y refrigeración, aunque además se cuenta con manuales específicos para cálculos de carga de calefacción, refrigeración y humidificación enfocados a pequeños espacios (Seguridad360, 2023).

Capítulo III

Marco Metodológico

Definición de QFD

QFD por sus siglas en inglés, Quality Function Deployment (Despliegue de la función de calidad) es una metodología utilizada en gestión de la calidad que se aplica principalmente en ingeniería para realizar el diseño de algún producto o servicio, siendo su principal objetivo la transformación de los requerimientos del cliente (lo que se espera que tenga el producto) en soluciones técnicas de diseño. Esta herramienta es ampliamente utilizada ya que en el proceso de diseño asegura lo siguiente:

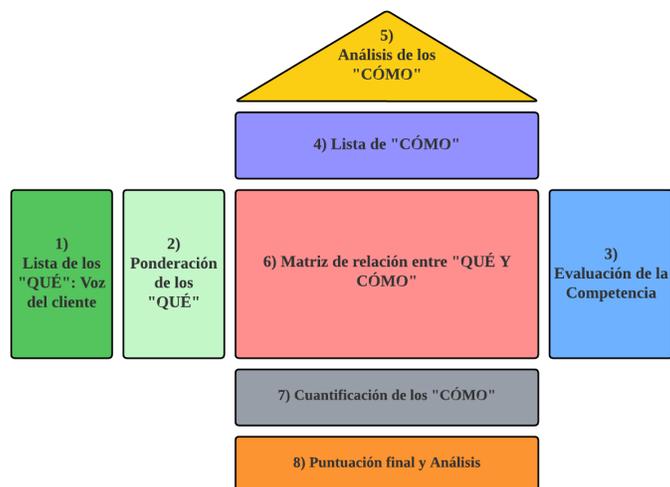
- Una perspectiva de lo que el cliente busca en un producto y de los requisitos que debe cumplir.
- Dar preferencia a las características prioritarias que serán añadidas al producto, y cuales no son necesarias (para descartarlas).
- Un análisis de la situación actual del producto en comparación con la principal competencia, determinando de esta manera, cuáles son las características que se pueden potenciar para que el producto sea más competitivo (Bernal, 2012).

La Casa de la Calidad

Es la herramienta más utilizada para implementar QFD, es un método gráfico que integra y relaciona estadísticamente toda la información recolectada y tiene la estructura (de ahí su nombre: “casa” de la calidad) mostrada en la figura 17:

Figura 17

Estructura gráfica de la "Casa de la calidad"



Para el presente trabajo la metodología QFD se va a aplicar a la repotenciación de la cámara climática, que incluye principalmente la automatización del sistema interno de generación del medio isoterma y la modificación física de la cabina interna.

Lista y análisis de los QUÉ

También llamada "la voz del cliente", es la recopilación de los requisitos o expectativas "Qué" se espera del producto a desarrollarse (cámara climática) y se recopila a través de una lluvia de ideas. La lista de requerimientos se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1

Lista de los "QUÉ" de la voz del usuario

QUÉ
Que el tiempo de estabilidad sea menor
Que la uniformidad sea mejor
Que el interior de la cámara pueda ampliarse
Que se puedan mapear las temperaturas dentro de la cámara
Que asegure repetibilidad
Que asegure reproducibilidad
Que tenga buena trazabilidad

Que calibre higrómetros
 Que calibre termohigrómetros
 Que calibre medidores de estrés térmico
 Que calibre dataloggers
 Que calibre registradores
 Que esté acreditado por el SAE
 Que se pueda modificar individualmente temperatura y humedad
 Que tenga una interfaz de usuario
 Que tenga modo manual y automático

Ponderación y análisis de los “QUÉ”

Una vez establecida la lista de los “Qué” se realiza una ponderación de cada uno de los aspectos deseados, clasificándolos según su importancia. Para evitar que las puntuaciones se las asigne de manera arbitraria se considera un modelo sistemático que tenga un respaldo matemático y estadístico, para esto, según (Bernal, 2012) cada miembro técnico debe asignar (para cada aspecto) una puntuación comprendida entre 1 y 5 para:

- Asignar un nivel de importancia:
 - Una puntuación de 0 denota un aspecto “no importante” y una puntuación de 5 denota un aspecto “muy importante”.
- Fijar un objetivo que se quiera alcanzar:
 - Una puntuación de 0 denota un aspecto “que no es necesario alcanzar” y una puntuación de 5 denota un aspecto “que es necesario alcanzar”.
- Puntuar la situación actual del producto:
 - Una puntuación de 0 denota un aspecto “que no cumple” y una puntuación de 5 denota un aspecto “que cumple completamente”.
- Evaluar la competencia:
 - Una puntuación de 0 denota un aspecto que la competencia “no satisface” y una puntuación de 5 denota un aspecto que la competencia “satisface”.

Adicional a esto, se debe establecer un “argumento de venta” para considerar en el diseño no solo las preferencias de los usuarios, sino también las de la propia empresa, con una

puntuación comprendida entre 1 y 1,5, siendo 1 un aspecto que denota un “mal argumento” y 1,5 un aspecto que denota un “buen argumento”.

Tabla 2

Ponderación de los “QUÉ” de la voz del usuario

Qué	Nivel de Importancia	Objetivo	Situación Actual	Competencia	Argumento de Venta
Que el tiempo de estabilidad sea menor	5	5	2	4	1,5
Que la uniformidad sea mejor	5	5	4	4	1,5
Que el interior de la cámara pueda ampliarse	3	3,5	2	3	1
Que se puedan mapear las temperaturas dentro de la cámara	4	3,5	1	2	1,3
Que asegure repetibilidad	5	4,5	3	5	1,5
Que asegure reproducibilidad	5	5	4	5	1,5
Que tenga buena trazabilidad	5	4	4	4	1,5
Que calibre higrómetros	4	4	5	3	1,2
Que calibre termohigrómetros	5	5	5	5	1,3
Que calibre medidores de estrés térmico	4	3	3	3	1,2
Que calibre dataloggers	5	5	5	5	1,5
Que calibre registradores	4	4	4	4	1,3
Que esté acreditado por el SAE	5	4	5	4	1,5
Que se pueda modificar individualmente temperatura y humedad	4	4	3	3	1,5
Que tenga una interfaz de usuario	5	4,5	1	2	1,4
Que tenga modo manual y automático	3	3	1	4	1,4

Para poder establecer un cierto orden de importancia de los aspectos establecidos anteriormente se calcula un ratio de mejora y las respectivas ponderaciones: el ratio de mejora se calcula dividiendo el objetivo de cada aspecto con su situación actual, la ponderación absoluta resulta de la multiplicación de la importancia de cada aspecto, su argumento de venta y su ratio de mejora y finalmente, la ponderación relativa resulta de la división de la

ponderación absoluta dividido para la suma total de dichas ponderaciones (el valor obtenido corresponde a un porcentaje).

Tabla 3

Análisis de los “QUÉ” de la voz del usuario

Qué	Ratio de Mejora	Ponderación Absoluta	Ponderación Relativa	Orden de Importancia
Que el tiempo de estabilidad sea menor	2,50	18,75	11,32%	2
Que la uniformidad sea mejor	1,25	9,38	5,66%	6
Que el interior de la cámara pueda ampliarse	1,75	5,25	3,17%	13
Que se puedan mapear las temperaturas dentro de la cámara	3,50	18,20	10,99%	3
Que asegure repetibilidad	1,50	11,25	6,79%	5
Que asegure reproducibilidad	1,25	9,38	5,66%	6
Que tenga buena trazabilidad	1,00	7,50	4,53%	9
Que calibre higrómetros	0,80	3,84	2,32%	16
Que calibre termohigrómetros	1,00	6,50	3,92%	11
Que calibre medidores de estrés térmico	1,00	4,80	2,90%	15
Que calibre dataloggers	1,00	7,50	4,53%	9
Que calibre registradores	1,00	5,20	3,14%	14
Que esté acreditado por el SAE	0,80	6,00	3,62%	12
Que se pueda modificar individualmente temperatura y humedad	1,33	8,00	4,83%	8
Que tenga una interfaz de usuario	4,50	31,50	19,02%	1
Que tenga modo manual y automático	3,00	12,60	7,61%	4
Total		165,64	100,00	

De los resultados mostrados en la Tabla 3 se puede concluir que los aspectos esenciales que necesita la cámara climática son la implementación de una interfaz de usuario, que el tiempo de estabilidad se reduzca considerablemente y que se puedan mapear las temperaturas y humedades relativas. Otros aspectos a tomar en cuenta, es que el sistema diseñado tenga un modo automático y manual, que asegure repetibilidad, reproducibilidad, que

se pueda modificar la temperatura y humedad de manera individual y que cumpla con todas las normativas para que pueda acreditarse mediante SAE.

Lista de “CÓMO”

Se establecen los requisitos técnicos que se emplearán para satisfacer con los requerimientos de los usuarios (con su respectivo indicador de evaluación o medición):

Tabla 4

Análisis de los “QUÉ” de la voz del usuario

CÓMO
Tiempo de Estabilidad (h)
Duración del ensayo de calibración (h)
Sinóptico de las temperaturas y humedades internas (si/no)
Exactitud de la válvula de ingreso de humedad (%)
Mejora de la potencia de las resistencias calefactoras (%)
Exactitud de los sensores utilizados en los módulos (%)
Programación de los lazos de control para los módulos (si/no)
Incorporación de ventiladores (si/no)
Rendimiento de un nuevo sistema de refrigeración (%)
Material de aislamiento no inflamable (si/no)
Incorporación de pantalla HMI (si/no)
Interfaz de usuario táctil (si/no)
Acreditado según SAE (si/no)
Conexiones contenidas en un entorno adecuado (si/no)
Exactitud del sistema de humidificación (%)
Exactitud del sistema de refrigeración (%)

Matriz de relación entre los “QUÉ” y “CÓMO”

Esta matriz sirve para establecer una relación medible entre los QUÉ y los CÓMO, de esta manera, los aspectos abstractos de la lista de los QUÉ se convierten en características medibles de la lista de los CÓMO. Para establecer el grado de relación se considera que el símbolo “●” representa una relación alta (correspondiéndole un valor de 9), el símbolo “○” representa una relación media (correspondiéndole un valor de 3), el símbolo “▽” representa

una relación baja (correspondiéndole un valor de 1) y un espacio vacío representa una relación nula o que no están relacionados (correspondiéndole un valor de 0).

Análisis de los “CÓMO”

Para obtener los objetivos técnicos que se debe conseguir para cumplir con los requerimientos de la cámara climática, se parte del establecimiento de la orientación deseada de cada CÓMO, siendo “▲= incremento o más” y “▼= decremento o menos”. Adicional a esto, se calculan las ponderaciones relativas y absolutas para determinar un orden de importancia de cada uno de los CÓMO, que dependerá de cómo estén relacionados con cada QUÉ (el cálculo es el mismo aplicado anteriormente en el análisis de los QUÉ). Finalmente se completan los aspectos técnicos de la cámara climática actual, de la competencia, y se establecen las características futuras (objetivos técnicos) que se espera que tenga la cámara climática después de la repotenciación.

Figura 18

Objetivos técnicos obtenidos del análisis de la matriz de relación

Lista de los CÓMO	Lista de los QUÉ	Tiempo de Estabilidad (h)	Duración del ensayo de calibración (h)	Sinóptico de las temperaturas y humedades internas (si/no)	Exactitud de la válvula de ingreso de humedad (%)	Mejora de potencia de las resistencias calefactoras (%)	Exactitud de los sensores utilizados en los módulos (%)	Programación de los lazos de control para los módulos (si/no)	Incorporación de ventiladores (si/no)	Rendimiento de un nuevo sistema de refrigeración (%)	Material de aislamiento no inflamable (si/no)	Incorporación de pantalla HMI (si/no)	Interfaz de usuario táctil (si/no)	Acreditable según SAE (si/no)	Conexiones contenidas en un entorno adecuado (si/no)	Exactitud del sistema de humidificación (%)	Exactitud del sistema de refrigeración (%)
Que el tiempo de estabilidad sea menor	●	●	○	●	●	●	●	○	●	●	●			○	○	●	●
Que la uniformidad sea mejor	▽	●		○	●	●	●	●	○	●	●			●	○	○	●
Que el interior de la cámara pueda ampliarse	▽		○				○	○	○	○	▽				▽	○	○
Que se puedan mapear las temperaturas dentro de la cámara		▽	●				●	▽				○	▽			●	●
Que asegure repetibilidad	○	●	○	○	●	●	●	●	○	○	●			●	▽	●	●
Que asegure reproducibilidad	○	●	○	○	●	●	●	●	○	○	●			●	▽	●	●
Que tenga buena trazabilidad	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	▽	▽	●		●	●
Que calibre higrómetros	▽	▽		●	●	○	○	○	▽	○	▽		▽	○		●	●
Que calibre termohigrómetros	▽	▽		●	●	○	○	○	▽	○	▽		▽	○		●	●
Que calibre medidores de estrés térmico	▽	▽		●	●	○	○	○	▽	○	▽		▽	○		●	●
Que calibre dataloggers	▽	▽		●	●	○	○	○	▽	○	▽		▽	○		●	●
Que calibre registradores	▽	▽		●	●	○	○	○	▽	○	▽		▽	○		●	●
Que esté acreditado por el SAE	●	●	▽	▽	▽	○	○	○	○	○	○			●	○	●	●
Que se pueda modificar individualmente temperatura y humedad	●	○	▽	●	●	○	○	○	○	○	▽	○		○	○	●	●
Que tenga una interfaz de usuario		▽	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○		
Que tenga modo manual y automático		●	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○	○	○	○	○
Orientación Deseada	▼	▼	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲	▲
Ponderación Absoluta	43	73	38	94	103	87	112	50	72	55	25	34	63	24	123	123	
Ponderación Relativa	4%	7%	3%	8%	9%	8%	10%	4%	6%	5%	2%	3%	6%	2%	11%	11%	
Orden de Importancia	12	7	13	5	4	6	3	11	8	10	15	14	9	16	1	1	
Valoración Técnica	h	h	si/no	%	%	%	si/no	si/no	%	si/no	si/no	si/no	si/no	si/no	%	%	
Cámara Climática Actual	1	1,58	no	0	45	80	no	no	50	si	no	no	si	no	90	90	
Competencia	0,83	1,17	no	85	50	80	no	si	70	si	no	si	si	si	80	80	
Objetivo Técnico	0,25	0,5	si	99	90	99	si	no	90	si	si	si	si	si	99	99	

La Figura 18 indica el orden de importancia de los aspectos técnicos, siendo los más relevantes la exactitud de los sistemas de calefacción y humidificación, la programación de cada módulo y la mejora de la potencia de las resistencias eléctricas calefactoras. De la misma manera, se plantea cada uno de los objetivos técnicos donde se espera primordialmente una reducción considerable del tiempo de estabilidad de la cámara y de la duración del proceso de calibración en general, una ampliación del volumen útil de la cabina de calefacción (para utilizar todo el espacio disponible), además de la incorporación de una interfaz HMI con modo de funcionamiento manual y automático.

Una vez especificados los aspectos esenciales que se espera de la cámara climática y las características técnicas más relevantes a desarrollarse, se establecen una serie funciones las cuales servirán para implementar el sistema automatizado en su totalidad. Un análisis

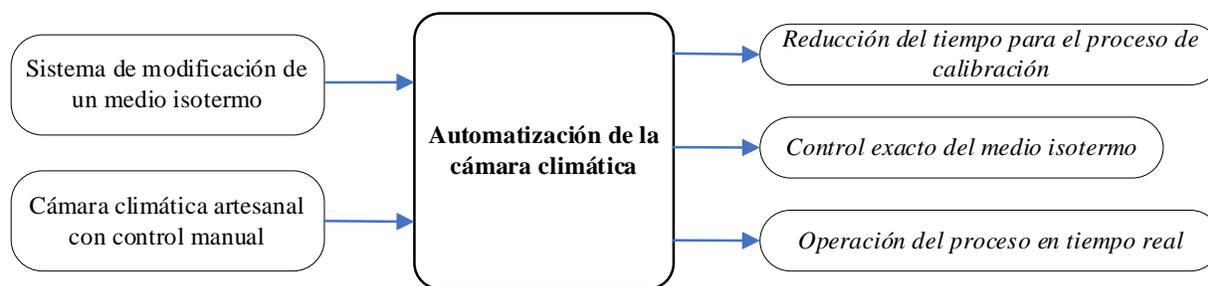
funcional servirá como herramienta principal para detallar, clasificar y valorar las funciones a ser utilizadas, con lo cual se estarían dando soluciones concretas y accesibles a los aspectos y requisitos especificados en la casa de la calidad.

Análisis Funcional

Las principales funciones del presente trabajo de automatización son la reducción del tiempo de estabilidad de la cámara, la sustitución de la operación manual por automática, la visualización del proceso en tiempo real y la mejora la uniformidad del medio isoterma generado, como lo muestra la Figura 19.

Figura 19

Nivel 0 del análisis funcional del proyecto de automatización

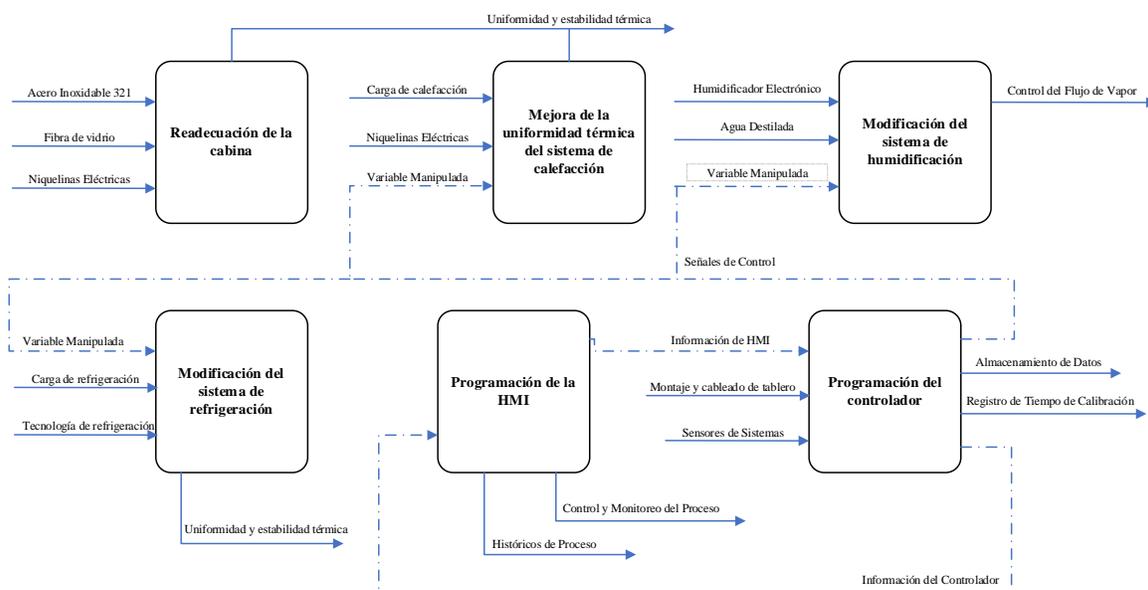


De las cuales se consideran como funciones específicas que darán como resultado la automatización exitosa de la cámara climática a las detalladas a continuación:

- Readecuación de la cabina.
- Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción.
- Modificación del sistema de humidificación.
- Modificación del sistema de refrigeración.
- Programación del Controlador.
- Programación de la HMI.

Figura 20

Nivel 1 del análisis funcional



Nota. La Figura muestra el detalle de los módulos funcionales establecidos para la automatización de la cámara climática.

Módulo 1: Readecuación de la cabina

Este módulo corresponde al cambio del material estructural de la cabina y del aislante, se divide en las subfunciones:

- **Construcción de la cabina con material metálico**

Se establecen 2 alternativas para la construcción de la nueva cabina:

- Utilizar planchas de acero inoxidable 204.
- Utilizar hierro fundido.

- **Incorporación de material aislante para la cabina**

Se establecen 3 alternativas a considerarse como material aislante:

- Poliestireno expandido (EPS) de naturaleza sintética
- Poliuretano de naturaleza sintética

- Lana de vidrio de naturaleza mineral

- **Acoplar ingresos/extracción de calor y humedad**

Se establecen 2 alternativas para introducir y extraer calor y humedad:

- Utilizar transferencia forzada
- Utilizar transferencia natural

Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción

Este módulo corresponde al reposicionamiento de resistencias eléctricas de calefacción a lo largo de la cabina para mejorar la uniformidad del calor generado, se divide en las subfunciones:

- **Cálculo de la carga de calefacción total**

Se consideran 2 alternativas de diseño basados en manuales:

- ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers)
- RITE (Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios)

- **Tipo de las resistencias calefactoras**

Se establecen 2 alternativas para el tipo de las resistencias calefactoras:

- Resistencias tubulares de diferente forma
- Resistencias tipo mufla

- **Disposición de las resistencias eléctricas**

Se establecen 2 alternativas para la distribución física de las resistencias calefactoras:

- Arreglo de resistencias de menor potencia colocadas a lo largo de las paredes laterales de la cabina.

- Una única resistencia con la potencia necesaria colocada en la parte inferior de la cabina.

Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación

Este módulo corresponde al análisis y reemplazo del sistema de humidificación y se divide en las subfunciones:

- **Reemplazar el tipo de sistema de humidificación**

Se consideran 2 alternativas de sistemas de refrigeración:

- De vapor caliente (Vaporizadores)
- De vapor frío (Ultrasónicos)

- **Reacondicionar el sistema de humidificación**

Se establece como única alternativa:

- Modificar circuito de distribución de vapor de agua según el tipo de humidificador seleccionado

Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración

Este módulo corresponde al análisis y reemplazo del sistema de refrigeración y se divide en las subfunciones:

- **Reemplazar el tipo de sistema de refrigeración**

Se consideran 2 alternativas de sistemas de refrigeración:

- Mecánica (ciclo de compresión de vapor)
- Basado en efecto termoeléctrico (Celdas de Peltier)

- **Reacondicionar el sistema de refrigeración**

Se establece como única alternativa:

- Modificar el sistema de refrigeración acorde al tipo de sistema de refrigeración seleccionado

Módulo 5: Programación del Controlador

Este módulo corresponde a la elección y programación del controlador de la automatización. Se divide en las subfunciones:

- **Elección de controlador**

Se consideran 2 alternativas de controladores:

- Usar un PLC (Controlador Lógico Programable)
- Usar una computadora como controlador mediante software dedicado

- **Lenguaje de programación**

Se establece como única alternativa (la más utilizada):

- Lenguaje KOP (Kontaktplan) comúnmente conocido como lenguaje de contactos o de escalera
- Lenguaje FBD (Function Block Diagram) comúnmente conocido como lenguaje de bloques

- **Almacenamiento de los datos**

Se establece como única alternativa:

- Registrar los datos en un documento PDF generado

Módulo 6: Programación de la HMI

Este módulo corresponde a la elección y programación de la HMI, y se divide en las subfunciones:

- **Elección del tipo de HMI a implementar**

Se consideran 2 alternativas de HMIs:

- Usar una HMI dedicada
- Usar una computadora como HMI
- **Establecer comunicación entre HMI y el controlador**

Se consideran 2 alternativas de comunicación:

- Implementar topología tipo Bus mediante switch.
- Implementar topología Punto-Punto mediante cable Ethernet

Matriz Morfológica

Esta es una herramienta utilizada para determinar soluciones en base a la exploración de todas las posibles combinaciones de un problema de manera sistemática. En el presente proyecto es aplicada para cada uno de los módulos establecidos anteriormente, resultando para:

Módulo 1: Readecuación de la cabina

Figura 21

Matriz morfológica del módulo 1: Readecuación de la cabina

Subfunción	Componente	
Construcción de cabina	<p style="text-align: center;">Alternativa 1</p> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">Planchas de acero inoxidable 304</div> <div style="text-align: center; color: red; font-size: 2em; margin: 5px 0;">↓</div> </div>	<p style="text-align: center;">Alternativa 2</p> <div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">Planchas de hierro fundido</div> <div style="text-align: center; color: blue; font-size: 2em; margin: 5px 0;">↓</div> </div>
Material Aislante	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">Minerales</div> <div style="text-align: center; color: red; font-size: 2em; margin: 5px 0;">↓</div> </div>	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">Sintéticos</div> <div style="text-align: center; color: blue; font-size: 2em; margin: 5px 0;">↓</div> </div>
Acoplar ingresos/extracción de calor y humedad	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">Forzada</div> </div>	<div style="text-align: center;"> <div style="border: 1px solid black; border-radius: 15px; padding: 5px; width: 100px; margin: 0 auto;">Natural</div> </div>

Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción

Figura 22

Matriz morfológica del módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción

Subfunción	Componente	
Carga de calefacción	Alternativa 1 ASHRAE	Alternativa 2 RITE
Resistencias calefactoras	Tubulares	Mufla
Disposición de resistencias calefactoras	Única	Arreglo

Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación

Figura 23

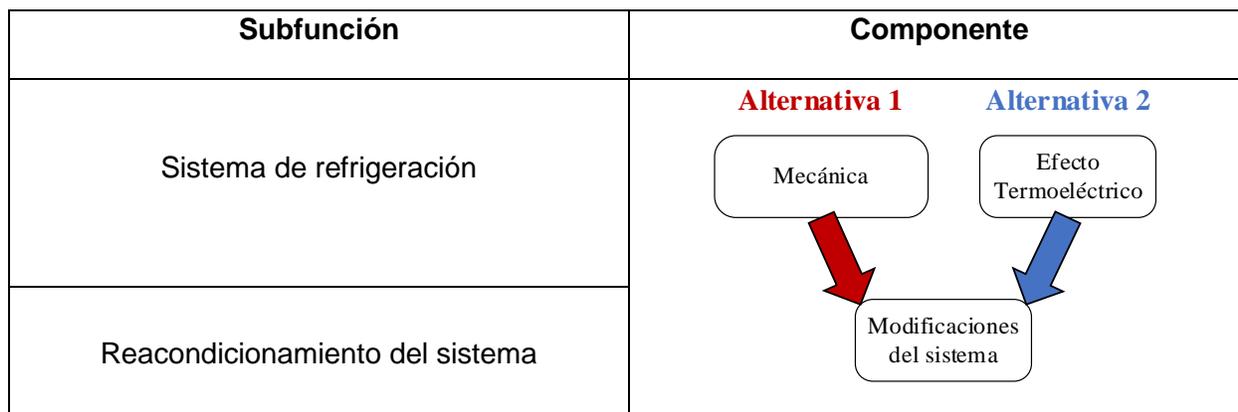
Matriz morfológica del módulo 3: Modificación del sistema de humidificación

Subfunción	Componente	
Humidificador	Alternativa 1 Ultrasónico	Alternativa 2 Vaporizador
Reacondicionamiento del sistema	Modificaciones del sistema	

Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración

Figura 24

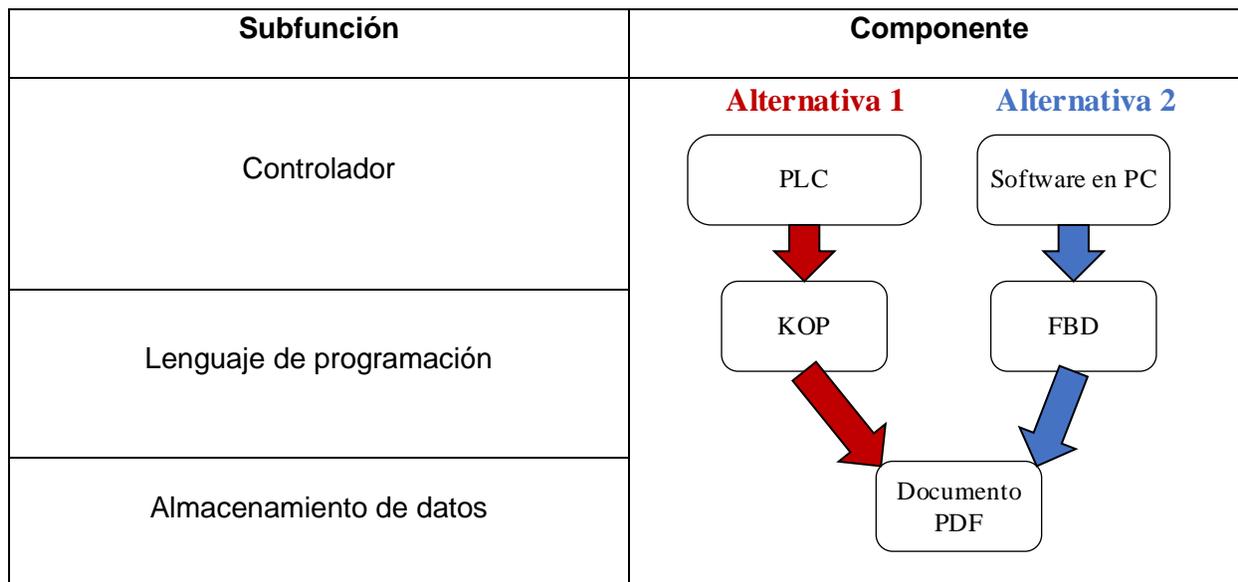
Matriz morfológica del módulo 3: Modificación del sistema de refrigeración



Módulo 5: Programación del Controlador

Figura 25

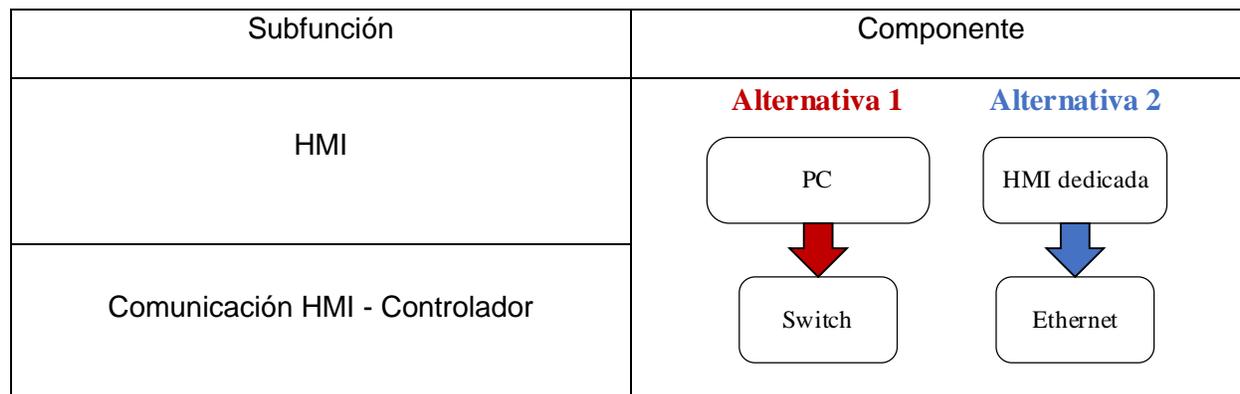
Matriz morfológica del módulo 4: Programación del controlador



Módulo 6: Programación de la HMI

Figura 26

Matriz morfológica del módulo 5: Programación de la HMI



Matriz de Criterios Ponderados

Como por facilidad se han establecido dos posibles soluciones para cada módulo, el último paso es escoger una de estas soluciones de una forma objetiva que además cuente con sustentación matemática, para lo cual se hace uso de una herramienta de evaluación de alternativas basadas en criterios conocida como matriz de criterios ponderados que después del respectivo análisis resulta:

Módulo 1: Readecuación de la cabina

Tabla 5

Evaluación de criterios del Módulo 1: Readecuación de la cabina

Criterios	Peso (1-10)	Alternativa 1	Alternativa 2
		Acero Inoxidable	Hierro fundido
Facilidad de fabricación	9	10	8
Resistente a la corrosión	9	10	7
Fortaleza del metal	8	7	9
Propagación de calor en el metal	10	10	6
Resistencia a altas y bajas temperaturas	8	10	10
Ciclo de vida del metal	9	10	7
Presupuesto	8	9	7
Seguridad al manipular el metal	7	9	9

Peso del metal	8	8	9
Fragilidad del metal	9	9	7
Aislamiento térmico del material aislante	10	10	8
Facilidad de manipulación del aislante	8	10	9
Flujo de aire de ventiladores	10	9	1
Potencia de extracción de ventiladores	9	9	1
Ponderación absoluta	1220	1137	835
Ponderación relativa	100%	93.20%	68.44%

Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción

Tabla 6

Evaluación de criterios del Módulo 2: Mejora de la uniformidad térmica del sistema de calefacción

Criterios	Peso (1-10)	Alternativa 1	Alternativa 2
		ASHRAE	RITE
Sustentación matemática	10	10	8
Consideración de temperatura externa local	9	10	5
Detalles en procedimientos del manual/guía	9	9	10
Manuales traducidos al español	5	7	10
Referencias bibliográficas de la aplicación de los métodos	8	10	6
Potencia de resistencias calefactoras	10	10	9
Distribución de calor de resistencias calefactoras	10	10	9
Tiempo de vida de resistencias calefactoras	8	9	7
Resistencia a la corrosión de las resistencias calefactoras	9	10	9
Rango de dispersión de calor de resistencias calefactoras	10	9	7
Presupuesto	9	8	9
Seguridad	9	8	7
Facilidad de instalación/conexionado	8	10	9
Ponderación absoluta	1140	1062	916
Ponderación relativa	100%	93.16%	80.35%

Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación

Tabla 7

Evaluación de criterios del Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación

Criterios	Peso (1-10)	Alternativa 1	Alternativa 2
		Ultrasónico	Vaporizador
Mecanismo de conversión	10	10	8
Baja generación de calor del mecanismo	10	9	5
Humectación de paredes	10	10	6
Generación de calor en el ambiente	10	10	3
Limpieza del vapor generado	8	9	7
Rapidez de generación de vapor	9	9	6
Flujo de vapor generado	8	8	8
Presupuesto	7	8	9
Seguridad	8	8	9
Facilidad de instalación/conexionado	9	9	9
Ponderación absoluta	890	808	610
Ponderación relativa	100%	90.79%	68.54%

Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración

Tabla 8

Evaluación de criterios del Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración

Criterios	Peso (1-10)	Alternativa 1	Alternativa 2
		Mecánica	Efecto Termoeléctrico
Tamaño del sistema	10	7	10
Generación de calor del sistema en operación	9	9	5
Potencia calorífica	10	10	9
Eficiencia	10	10	7
Manipulación de señal de control	9	7	10
Elementos constitutivos adicionales	10	5	8
Disponibilidad en el mercado	9	10	10
Presupuesto	8	8	10
Elementos no dañinos para el medio ambiente	10	5	10

Seguridad	8	9	9
Facilidad de instalación/conexionado	10	7	10
Ponderación absoluta	1030	810	917
Ponderación relativa	100%	78.64%	89.03%

Módulo 5: Programación del Controlador

Tabla 9

Evaluación de criterios del Módulo 4: Programación del Controlador

Criterios	Peso (1-10)	Alternativa 1	Alternativa 2
		PLC	Software en PC
Costo de licencias	9	10	7
Comunicación	9	10	9
Compatibilidad con software dedicado	8	9	9
Almacenamiento de datos	9	9	10
Procesamiento de señales	10	10	8
Gestión de entradas/salidas análogas y digitales	10	10	5
Fácil entendimiento de interfaz de usuario	9	7	9
Funcionalidades disponibles	8	9	8
Manuales de usuario y gestor de ayuda	10	10	4
Presupuesto	9	9	9
Facilidad de instalación/conexionado	9	9	10
Ponderación absoluta	1000	930	792
Ponderación relativa	100%	93.00%	79.20%

Módulo 6: Programación de la HMI

Tabla 10

Evaluación de criterios del Módulo 5: Programación de la HMI

Criterios	Peso (1-10)	Alternativa 1	Alternativa 2
		PC	HMI dedicada
Valor menor de licencias	9	10	7
Comunicación	10	9	10
Compatibilidad con PLC	10	8	10
Visualización de sinóptico e históricos	10	9	10
Entendimiento de interfaz de usuario	9	9	7
Facilidad de programación	9	9	8

Robustez	10	5	10
Tamaño de pantalla	9	7	9
Facilidad de visualización	10	8	10
Almacenamiento de datos	9	9	7
Presupuesto	9	9	8
Facilidad de instalación/conexionado	9	9	8
Ponderación absoluta	1130	948	986
Ponderación relativa	100%	83.89%	87.26%

Solución Final

Se establecen como las mejores alternativas de solución a las siguientes opciones para cada módulo:

Módulo 1: Readecuación de la cabina

Reemplazar la cabina anterior de plástico por una cabina de acero inoxidable 204 de 1 mm de espesor adecuada a la estructura general de la cámara climática, además se utilizará como material aislante un revestimiento de lana de vidrio procurando cubrir la mayor parte del espacio de la cabina, en donde además se acondicionará ventiladores para distribuir de manera forzada el calor generado.

Módulo 2: Mejora de la uniformidad del sistema de calefacción

Para los cálculos respectivos de las cargas de calefacción, refrigeración y humidificación se utilizará los criterios de diseño y procedimientos descritos en los manuales de fundamentos, cálculos de cargas de calefacción, refrigeración y humidificación provistos por la ASHRAE, seleccionando como elemento calefactor a una única resistencia eléctrica de tipo tubular en forma de "O" colocada en la parte inferior o superior de la cabina.

Módulo 3: Modificación del sistema de humidificación

Como elemento generador de vapor se utilizará un humidificador de vapor frío de tipo ultrasónico (reemplazando el vaporizador instalado) de mediana capacidad y se realizará las adaptaciones necesarias como aumento/disminución de las tuberías de ingreso y desfogue del vapor generado.

Módulo 4: Modificación del sistema de refrigeración

Como sistema de refrigeración se utilizarán celdas de Peltier (efecto termoeléctrico de Peltier) en reemplazo del sistema de refrigeración mecánica instalada, donde la capacidad de refrigeración será seleccionada a partir de los criterios y cálculos respectivos, además de esto, se realizarán las adecuaciones necesarias a la cabina para la incorporación del nuevo sistema.

Módulo 5: Programación del Controlador

Se utilizará un PLC como controlador principal de la cámara climática, y como lenguaje de programación el KOP, mejor conocido como Ladder en el propio entorno de desarrollo del PLC. Todos los datos de relevancia, así como históricos y registros de alarmas se almacenarán en un documento PDF.

Módulo 6: Programación de la HMI

Se implementará una HMI dedicada (preferiblemente de la misma marca del PLC) utilizando una topología punto a punto y Ethernet como protocolo de comunicación.

Capítulo IV

Cálculos y Diseño

(Benavides y Carrasco, 2010) en su tesis desarrollan el diseño e implementación completa de una cámara climática utilizada para la calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad, aquí consideran la metodología mostrada en los manuales de ASHRAE para la determinación de las cargas de calefacción y refrigeración. Por este motivo, se considera a dicho trabajo como una ejemplificación puntual de la aplicación de las ecuaciones de diseño presentadas por la ASHRAE para un volumen específico. La ASHRAE provee manuales específicos para el cálculo las cargas de calefacción, refrigeración, humidificación que son utilizadas para el presente trabajo, así también presenta un manual de fundamentos donde se explica toda la teoría física, matemática y química de los temas relacionados con el desarrollo de sistemas de calefacción refrigeración y HVAC. Cabe recalcar que la norma principal es el Estándar 90.1 el cual está enfocado a edificaciones y construcciones de gran magnitud, una variación de esta norma es el Estándar 90.2 el cual es específico para edificaciones de baja altura, osea de dimensiones menores.

Análisis de las Dimensiones de la Cámara Climática

Como se estableció en el capítulo anterior, la solución que más se adapta a las necesidades y requerimientos de la empresa con respecto a la readecuación de la cabina de la cámara climática es la construcción de una cabina nueva hecha de acero inoxidable, sin embargo, las dimensiones de la misma se establecen considerando las siguientes cuestiones:

- El número y la dimensión de los instrumentos sujetos a calibración.
- Debe contar con el espacio necesario para manipular los instrumentos.
- Debe ser multinivel.
- Debe permitir una correcta visualización de las lecturas de los instrumentos.

- La movilidad al ser un requerimiento directo de la empresa, no debe ser demasiado grande para que pueda ser fácilmente transportable.
- El tipo de aislamiento seleccionado.
- De preferencia debe tener forma cúbica.

Estas cuestiones establecen un punto de partida para decidir las dimensiones de la cabina, por lo que es necesario una reunión adicional con la empresa en donde exponen estos criterios de diseño y se propone un tamaño de cabina de 30x30x30 cm basado en las dimensiones de algunas incubadoras de laboratorio comerciales que son móviles como las de la marca VEVOR, tamaño que también es justificable debido a que con un volumen reducido la estabilidad y uniformidad de las cámaras climáticas mejoran considerablemente, esta propuesta al ser aceptada da paso a la realización de los cálculos posteriores basados en los manuales de la ASHRAE. Con respecto a la visualización también se establece que la puerta de la cámara debe tener una ventana transparente para poder visualizar la lectura de los instrumentos en el interior.

Diseño del Aislamiento Interno de la Cámara Climática

Generalidades

La selección de un tipo de material aislante debe considerar las propiedades físicas asociadas como:

- Temperatura de operación: Generalmente este criterio se evalúa utilizando la norma ASTM C411, cuando un material aislante sobrepasa la temperatura máxima de uso presenta daños físicos como deformación, agrietamiento, delaminación, derretimiento, goteo, etc. Sin embargo, no existe algún método de evaluación para una temperatura mínima de operación, por lo que para sistemas conjuntos de calefacción y enfriamiento con rangos moderados basta con la consideración de temperatura máxima.

- **Conductividad térmica:** Al ser una función de la temperatura, generalmente los materiales aislantes son evaluados a una temperatura media de 24 °C, sin embargo, algunos fabricantes proporcionan datos de conductividad de los aislantes basados en rangos de temperatura, para acercarse más a condiciones reales de operación. Como los mejores aislantes son los que poseen la menor conductividad térmica, la cantidad de material necesario (espesor) va a disminuir también, criterio muy considerado para aplicaciones con limitaciones de espacio. La conductividad de los materiales planos (planchas o arreglos) son evaluados según la norma ASTM C177 o C518.
- **Permeabilidad al vapor de agua:** Para las aplicaciones que operan por debajo de la temperatura ambiente, es importante reducir el flujo de vapor de agua a la superficie fría, para esto el material aislante debe tener una permeancia inferior o igual a 1,15 ng/(s·m²·Pa) para reducir al mínimo la corrosión y la condensación. Esta propiedad es evaluada por la norma ASTM E96.
- **Resistencia:** Este criterio hace referencia a la resistencia del material aislante al agua, a los disolventes y a toda sustancia química que puede estar presente en un entorno industrial o de laboratorio, aquí se considera el tiempo de vida útil ya que no resulta factible un aislante que se lo tenga que cambiar a cada rato o que pierda sus propiedades de manera fácil, debe suponer una fácil manipulación e instalación sin la adecuación de alguna estructura externa, no debe suponer un excesivo peso debido a que la cámara está pensada en ser móvil, debe ser económica y de fácil obtención en el mercado (como la empresa también desarrolla proyectos particulares cuenta con ciertos materiales que son requeridos de ser utilizados en el presente proyecto), no debe absorber olores ni generarlos, no debe verse afectado por moho u hongos en caso de que se generen, y las dimensiones no deben

suponer un desmoronamiento o aplastamiento de los elementos de los sistemas de calefacción, refrigeración o humidificación.

- Seguridad: Un aspecto importante es que el material aislante no debe ser inflamable ni explosivo. Si en algún momento llegará a estar expuesto a las llamas, los elementos que constituyen el material aislante no deben suponer un peligro por toxicidad a las personas que se encuentren cerca de la cámara climática.

La Tabla 8 del Capítulo 23 del manual de fundamentos de la ASHRAE muestra de manera general una guía de las propiedades de rendimiento de los materiales aislantes clasificados por su constitución para sistemas mecánicos.

Figura 27

Guía de las propiedades de rendimiento de los materiales aislantes

Table 8 Performance Property Guide for Insulation Materials

	Calcium Silicate	Flexible Elastomeric	Mineral Fiber	Cellular Glass	Cellular Polystyrene	Cellular Polyisocyanurate	Cellular Phenolic	Cellular Polyolefin
<i>ASTM Standard</i>	C533	C534	C547, C553, C612	C552	C578	C591	C1126	C1427
Type/grade listed	Type I	Type I Grade 1	Type IVB Category 1	Type I Grade 1	Type XIII	Type IV Grade 2	Type III	Type I Grade 1
Max. operating temperature, °C	649	104	649	427	74	150	125	93
Min. operating temperature, °C	60	-57	-18	-268	-183	-183	-179	-101
Min. compressive resistance, kPa	688 at 5%	N/S	N/S	45 at failure	138 at 10%	145 at 10%	124	N/S
Max. thermal conductivity, W/(m·K)								
-18°C mean	N/A	0.038	N/A	0.039	0.032	0.026	0.02	0.048
-4°C	N/A	N/S	0.034	N/S	0.034	N/S	N/S	N/S
24°C	N/A	0.040	0.035	0.045	0.037	0.026	0.02	0.050
93°C	0.065	N/A	0.043	0.058	N/A	0.035	0.04	N/A
204°C	0.079	N/A	0.061	0.084	N/A	N/A	N/A	N/A
316°C	0.095	N/A	0.091	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Maximum water vapor permeability, ng/(s·m·Pa)	N/S	0.15	N/A	0.007	2.2	5.8	0.72	0.07
Maximum liquid water absorption, % volume	N/S	0.2	N/S	0.5	0.5 (24 h)	0.5 (24 h)	0.43	0.2
Maximum water vapor sorption, % mass	N/S	N/S	5	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Maximum surface burning characteristics	0/0	25/50	25/50	5/0	N/S	N/S	25/50	N/S

Note: N/A = not applicable. N/S = not stated (i.e., ASTM standards do not include a value for this property). Properties not stated do not necessarily indicate that material is not appropriate for a given application depending on that property. See previous editions of *ASHRAE Handbook—Fundamentals* for data on historical insulation materials.

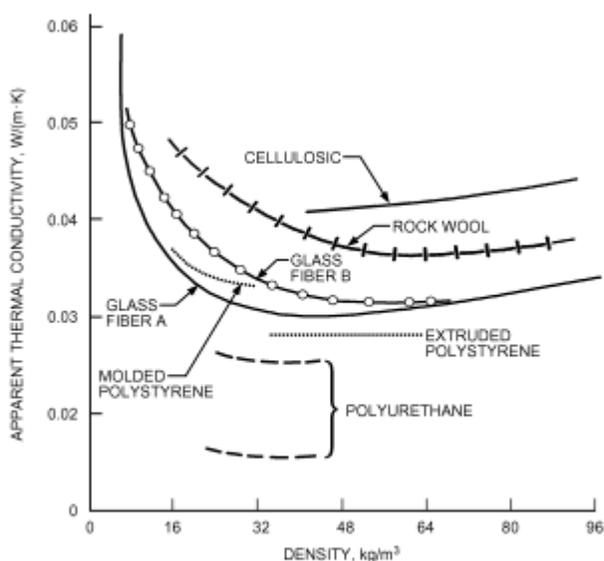
Nota. Figura tomada de (ASHRAE Handbook, 2021, Capítulo 23, tabla 8)

Como se mencionó anteriormente, los requisitos puntuales de la empresa en el uso de los materiales disponibles en el área técnica hacen que ya se haya escogido a la lana (fibra) de vidrio como material aislante para las paredes y puerta de la cámara climática (módulo 1:

readecuación de la cabina), sin embargo, es justificable su uso basándose en la Figura 28 que muestra la variación de la conductividad térmica aparente en comparación con la densidad a una temperatura media de 24 °C, donde se observa que después del poliuretano y el poliestireno el material aislante que presenta buenas condiciones de conductividad térmica es la lana de vidrio.

Figura 28

Conductividad térmica aparente vs densidad de varios aislantes utilizados en la industria



Nota. Figura tomada de (ASHRAE Handbook, 2021, Capítulo 26, figura 1)

Dimensionamiento del espesor del aislante

Según el manual de fundamentos de la ASHRAE, para determinar el espesor del material aislante cuando los cálculos son enfocados a la transferencia de calor con respecto a una superficie representada por una geometría plana de espesor fijo (plancha de acero inoxidable) se considera el desarrollo de la ley de Fourier, siendo:

$$Q = kA \frac{(T_1 - T_2)}{L}$$

$$Q = h_s A (T_{superf} - T_{amb})$$

Donde:

Q = tasa de flujo de calor, W

k = conductividad térmica del material aislante, $W/(mK)$

A = área transversal normal al flujo de calor, m^2

h_s = coeficiente de superficie combinado: $h_s = h_c + h_r$, $W/(m^2K)$. Para estimar el flujo de calor desde y hacia una superficie se considera un coeficiente que combina la convección h_c y la radiación h_r .

L = espesor del aislamiento, m

Si se asume que el ambiente radiante es igual a la temperatura ambiente del aire, las ganancias o pérdidas de calor en una superficie se puede calcular con la siguiente fórmula:

$$Q = h_s A (T_{superf} - T_{amb})$$

En estado estacionario, el flujo de calor a través del material aislante hacia la superficie exterior es igual al flujo de calor desde la superficie exterior hacia el ambiente, por lo que resulta:

$$Q_{m\acute{a}x} = Q_{superf}$$

$$\left(\frac{k}{x}\right) A (T_{m\acute{a}xCM} - T_{superf}) = h A (T_{superf} - T_{amb})$$

$$x = \left(\frac{k}{h}\right) \left[\frac{(T_{m\acute{a}x} - T_{superf})}{(T_{superf} - T_{amb})}\right]$$

Los fabricantes en sus catálogos proporcionan información en base al espesor y la densidad, en donde se observa que los valores comunes de densidad que se comercializan están en un rango de 9.8 a 12.5 kg/m^3 , según la Figura 29 el valor de conductividad también varía en un rango por lo que para los cálculos se considera un valor promedio de $k = 0,042 W/(mK)$, mientras que para las temperaturas se consideran los valores de $T_{m\acute{a}xCM} = 80\text{ }^\circ C$, $T_{amb} = DB_{0,4\%} = 21,9\text{ }^\circ C$, $T_{superf} = 30\text{ }^\circ C$.

Figura 29

Propiedades térmicas típicas de materiales aislante

Description	Density, kg/m ³	Conductivity ^b <i>k</i> , W/(m·K)	Resistance <i>R</i> , (m ² ·K)/W	Specific Heat, kJ/(kg·K)	Reference ¹
Insulating Materials					
<i>Blanket and batt^{c,d}</i>					
Glass-fiber batts	7.5 to 8.2	0.046 to 0.048	—	0.8	Kumaran (2002)
	9.8 to 12	0.040 to 0.043	—	—	Four manufacturers (2011)
	13 to 14	0.037 to 0.039	—	—	Four manufacturers (2011)
	22	0.033	—	—	Four manufacturers (2011)
Rock and slag wool batts	—	—	—	0.8	Kumaran (1996)
	32 to 37	0.036 to 0.037	—	—	One manufacturer (2011)
	45	0.033 to 0.035	—	—	One manufacturer (2011)
Mineral wool, felted.....	16 to 48	0.040	—	—	CIBSE (2006), NIST (2000)
	16 to 130	0.035	—	—	NIST (2000)

Nota. Figura tomada de (ASHRAE Handbook, 2021, Capítulo 26, tabla 1) y muestra los valores considerados para diseño.

En la realidad, el coeficiente de superficie no es un valor puntual, es un valor que varía en función de algunas variables como la temperatura de superficie, la velocidad del aire, la orientación del flujo de calor, la emitancia de la superficie, etc. (la Figura 29 no muestra valores para R), razón por la cual se recurren a los criterios de diseño proporcionados en el manual de fundamentos de la ASHRAE, donde señala que los rangos típicos para las resistencias de película de superficie exterior e interior combinadas para materiales no metálicos son:

$$R_o = 0,03 \text{ a } 0,06 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

$$R_i = 0,12 \text{ a } 0,20 \text{ (m}^2\text{K)/W}$$

Y como R es el inverso del coeficiente de superficie, se selecciona el valor más alto por lo que $h_i = 5 \text{ W/(m}^2\text{K)}$, lo que resulta una vez reemplazados los datos:

$$x = \left(\frac{0,042}{5} \right) \left[\frac{(80 - 30)}{(30 - 21,9)} \right] m$$

$$x = 0.0519 \text{ m} = 5.19 \text{ cm}$$

Estableciendo como espesor de lana de vidrio a una plancha de 5 cm que recubrirá toda la cabina incluida la puerta, las especificaciones del aislante seleccionado están especificados en el Apéndice C.

Diseño del Sistema de Calefacción

Generalidades

Para este diseño se utiliza el manual de aplicaciones de cálculo de carga de calefacción, en donde se establece que para fines de diseño el procedimiento de cálculo de carga de refrigeración es también aplicable para cargas de calefacción siempre y cuando se tomen en cuenta suposiciones diferentes, como que el aporte solar no es considerado (se supone que durante la noche se produce la máxima carga de calefacción), no hay ganancias de calor internas representativas (e.g. personas, equipos, luces, motores etc.) y se asumen como constantes las temperaturas exteriores (se ajusta el rango diario a cero). Según la ASHRAE Handbook, (2018) la carga neta total de calefacción (así como la de refrigeración) incluye:

- La carga por transmisión, que es el calor transferido al espacio interno de la cabina a través de su superficie.
- La carga de producto, que es el calor producido por los productos introducidos en el espacio interno destinado a calentarse.
- La carga interna, que es el calor producido de manera interna por las diversas fuentes de calor de los sistemas (e.g. personas, luces, motores eléctricos, personas, etc.)
- La carga por infiltración de aire, que es la ganancia de calor producida por el ingreso de aire al espacio interno de la cabina.

Cálculo de Carga de Calefacción por Transmisión

Las ganancias de calor por transmisión se calculan en estado estacionario, además de esto se considera que la cámara va a estar expuesta a un entorno por encima del nivel del suelo y expuesta a condiciones exteriores, por lo que se toma en cuenta a la estructura propia

de la cámara climática: paredes laterales, paredes superiores e inferiores, puerta y ventana en la puerta, siendo sus cálculos idénticos utilizando la siguiente ecuación:

$$q = UA\Delta t \quad (3. 1)$$

Donde

q = Ganancia de calor, W

U = Coeficiente de transferencia de calor, $W/(m^2K)$

A = Área exterior de la sección, m^2

Δt = Diferencia de temperatura entre el entorno exterior a la cámara y la temperatura del volumen útil dentro de la cabina, $^{\circ}C$

Paredes

Para el cálculo de la carga transmitida a través de las paredes de la cámara climática se utiliza la ecuación 3.1 considerando únicamente al material aislante ya que según Benavides y Carrasco (2010) las superficies metálicas de los paneles prefabricados no suponen un efecto relevante en el rendimiento térmico del volumen útil y no necesitan ser considerados en los cálculos, principalmente del factor U . El cálculo del coeficiente de transferencia de calor se lo realiza utilizando la ecuación:

$$U_{fibvidrio} = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{x_{fibvidrio}}{k_{fibvidrio}} + \frac{1}{h_o}} \quad (3. 2)$$

Donde

h_i = Conductividad de la superficie interna, $W/(m^2K)$

h_o = Conductividad de la superficie externa, $W/(m^2K)$

Según la ASHRAE Handbook: Refrigeration (2018) para un entorno exterior con aire en calma se utiliza frecuentemente un valor de $h_i = h_o = 9,1 W/(m^2K)$, por lo que reemplazando los datos resulta:

$$U_{fibvidrio} = \frac{1}{\frac{1}{9,1} + \frac{0,05}{0,042} + \frac{1}{9,1}}$$

$$U_{fibvidrio} = 0,709 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$$

Para el cálculo del área consideramos las dimensiones de la cámara mostradas en el Apéndice D, lo que resulta:

- Área del techo y piso

$$A_{techo,piso} = 2 * ancho * profundidad$$

$$A_{techo,piso} = 2 * 0,415 \text{ m} * 0,33 \text{ m}$$

$$A_{techo,piso} = 0,27 \text{ m}^2$$

- Área de las paredes laterales

$$A_{paredlat} = 2 * alto * profundidad$$

$$A_{paredlat} = 2 * 0,445 \text{ m} * 0,33 \text{ m}$$

$$A_{paredlat} = 0,29 \text{ m}^2$$

- Área de la pared posterior

$$A_{paredpost} = alto * ancho$$

$$A_{paredpost} = 0,445 \text{ m} * 0,415 \text{ m}$$

$$A_{paredpost} = 0,19 \text{ m}^2$$

- Área total

$$A_{externa} = A_{techo,piso} + A_{paredlat} + A_{paredpost}$$

$$A_{externa} = 0,27 \text{ m}^2 + 0,29 \text{ m}^2 + 0,19 \text{ m}^2$$

$$A_{externa} = 0,75 \text{ m}^2$$

Para el cálculo de la diferencia de temperatura se considera el criterio de diseño con respecto a la temperatura ambiental, que según la ASHRAE Handbook: Refrigeration (2018) para la temperatura del aire exterior un valor de 6.3 °C (temperatura de bulbo seco correspondiente al 99,6% y 99% de frecuencia anual acumulativa para condiciones climáticas

frías) el cual corresponde a la ciudad de Quito y es un dato obtenido del Apéndice E, además de esto se considera el valor de temperatura máxima deseada para la cámara climática de 80 °C, resultando:

$$\Delta t = (t_{m\acute{a}x_{CM}} - t_{DB_{99,6\%}})$$

$$\Delta t = (80 \text{ °C} - 6,3 \text{ °C})$$

$$\Delta t = 73,7 \text{ °C}$$

Reemplazando en la ecuación 3.1, se obtiene:

$$q_{paredes} = 0,709 * 0,75 * 73,7$$

$$q_{paredes} = 39,19 \text{ W}$$

Puerta

La puerta de la cámara climática es una composición de una ventana rodeado por material aislante como se muestra en el Apéndice D, por lo tanto, el cálculo de la ganancia de calor por transmisión será la suma de las cargas individuales, con respecto al aislante se consideran los datos $U_{fibvidrio} = 0,709 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $\Delta t = 73,7 \text{ °C}$, mientras que para el área:

$$A_{externa_puerta} = A_{puerta} - A_{ventana}$$

$$A_{puerta} = (2 * 0,45 * 0,05) + (2 * 0,44 * 0,05) + (2 * 0,44 * 0,45) = 0,485 \text{ m}^2$$

$$A_{ventana} = (2 * 0,22 * 0,05) + (2 * 0,275 * 0,05) + (2 * 0,22 * 0,275) = 0,171 \text{ m}^2$$

$$A_{externa_puerta} = 0,314 \text{ m}^2$$

Reemplazando en la ecuación 3.1, se obtiene:

$$q_{pared_puerta} = 0,709 * 0,314 * 73,7$$

$$q_{pared_puerta} = 16,41 \text{ W}$$

Con respecto a la ventana, esta consta de dos vidrios de 4 mm de espesor dispuestos en paralelo y separados por un espacio de aire, por lo tanto, para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor para este tipo de estructuras se recurre a los factores U de varios

productos de fenestraci3n provistas por el manual de fundamentos de la ASHRAE, como se muestra en la Figura 30.

Figura 30

Factores U para varios productos de fenestraci3n en W/(m² K)

Product Type		Glass Only		Vertical Installation									
				Operable (including sliding and swinging glass doors)					Fixed				
Frame Type		Center of Glass	Edge of Glass	Aluminum Reinforced					Aluminum Reinforced				
ID	Glazing Type			Without Thermal Break	With Thermal Break	Vinyl/Aluminum Clad	Wood/Vinyl	Insulated Fiberglass/Vinyl	Without Thermal Break	With Thermal Break	Vinyl/Aluminum Clad	Wood/Vinyl	Insulated Fiberglass/Vinyl
		Single Glazing											
1	3.2 mm glass	5.91	5.91	7.01	6.08	5.27	5.20	4.83	6.38	6.06	5.58	5.58	5.40
2	6 mm acrylic/polycarb	5.00	5.00	6.23	5.35	4.59	4.52	4.18	5.55	5.23	4.77	4.77	4.61
3	3.2 mm acrylic/polycarb	5.45	5.45	6.62	5.72	4.93	4.86	4.51	5.96	5.64	5.18	5.18	5.01
Double Glazing													
4	6 mm airspace	3.12	3.63	4.62	3.61	3.24	3.14	2.84	3.88	3.52	3.18	3.16	3.04
5	13 mm airspace	2.73	3.36	4.30	3.31	2.96	2.86	2.58	3.54	3.18	2.85	2.83	2.72
6	6 mm argon space	2.90	3.48	4.43	3.44	3.08	2.98	2.69	3.68	3.33	3.00	2.98	2.86
7	13 mm argon space	2.56	3.24	4.16	3.18	2.84	2.74	2.46	3.39	3.04	2.71	2.69	2.58

Nota. Figura tomada de (ASHRAE Handbook, 2021, Cap3tulo 15, Tabla 4)

Se considera el valor de $U_{ventana} = 2,84 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ que corresponde a un doble acristalamiento con separaci3n de aire de 6 mm y con aislamiento de fibra de vidrio, el 3rea tiene un valor de $A_{ventana} = 0,171 \text{ m}^2$, por lo que reemplazando resulta:

$$q_{ventana_puerta} = 2,84 * 0,171 * 73,7$$

$$q_{ventana_puerta} = 35,79 \text{ W}$$

La carga transmitida por la puerta es:

$$q_{puerta} = q_{pared_puerta} + q_{ventana_puerta}$$

$$q_{puerta} = 16,41 + 35,79$$

$$q_{puerta} = 52,2 \text{ W}$$

Finalmente, la carga total de calefacci3n por transmisi3n resulta:

$$q_{transmission} = q_{paredes} + q_{puerta}$$

$$q_{transmission} = 39,19 + 52,2$$

$$q_{transmission} = 91,39 \text{ W}$$

Cálculo de Carga de Producto

Este es un componente que es de mayor relevancia en los cálculos de carga de refrigeración, por lo que se detallará en la siguiente sección.

Cálculo de Carga Interna

No existen valores debido a que existe un único elemento generador de calor que es la resistencia eléctrica, no existe cargas debido a personas ni motores, porque el sistema de refrigeración no es de compresión y con respecto a las luces, solo existe cargas cuando se considera iluminación de tipo incandescente.

Cálculo de Carga por Infiltración de Aire

La infiltración considera todo flujo de aire descontrolado que es producido por aberturas no intencionales como grietas en la estructura, los espacios perimetrales de la puerta y el acceso a la cabina de control que son impulsados por el viento, así como también la diferencia de temperatura y las presiones inducidas en el interior. Según el ASHRAE Handbook (2014) para condiciones de clima cálido el aire que se infiltra se debe compensar a la temperatura deseada, por lo que esta carga se calcula mediante la ecuación:

$$q_{infiltracion} = CQ\Delta t \quad (3.3)$$

Donde

C = Factor de calor sensible, $(Ws)/(LK)$, en donde el valor típico considerado es 1,23

Q = Caudal de aire, L/s

El caudal del aire se calcula con la fórmula:

$$Q = \frac{\text{Volumen interno de la cámara}}{3600} \quad (3.4)$$

$$Q = \frac{(0,33 \text{ m} * 0,29 \text{ m} * 0,27 \text{ m}) * 1000}{3600}$$

$$Q = 0,0072 \text{ L/s}$$

Reemplazando en la ecuación 3.3 resulta:

$$q_{infiltracion} = 1,23 * 0,0072 * 73,7$$

$$q_{infiltracion} = 0,651 W$$

Carga Total de Calefacción

Es la suma de todas las cargas, lo que resulta:

Tipo de cargas de calefacción	Carga [W]
Carga por transmisión	91,39
Carga producto	-
Carga Interna	-
Carga por infiltración de aire	0,651
Pre – Total	92,041
Factor de seguridad (10%)	9,20
Total	101,24

Selección de Componentes

Como se planteó en el Capítulo II, el elemento generador de calor será una resistencia eléctrica diseñada para calefacción. La resistencia seleccionada es blindada tubular en forma de “O” de acero inoxidable AISI 204, con borne BM4-P de M4 con una potencia nominal de 150 W y que trabaje a una tensión nominal de 120 VAC. El diámetro de la resistencia es de 22cm y ha sido fabricada particularmente para el proyecto.

Diseño del Sistema de Refrigeración

Cálculo de Carga de Refrigeración por Transmisión

Paredes

Para el cálculo de la carga transmitida a través de las paredes de la cámara climática se utiliza la ecuación 3.1 considerando los valores de $U_{fibvidrio} = 0,709 W/(m^2K)$ y $A_{interna} = 0,75 m^2$ calculados previamente en el diseño del sistema de calefacción, con respecto a la diferencia de temperatura se considera el criterio de diseño con respecto a la temperatura ambiental, que según la ASHRAE Handbook: Refrigeration (2018) para la temperatura del aire exterior un valor de 21.9 °C (temperatura de bulbo seco correspondiente al 0,4%, 1,0% y 2,0%

de frecuencia anual acumulativa para condiciones climáticas cálidas) el cual corresponde a la ciudad de Quito y es un dato obtenido del Apéndice E, además de esto se considera el valor de temperatura mínima deseada para la cámara climática de 0 °C, resultando:

$$\Delta t = (t_{DB_{0,4}\%} - t_{min_{CM}})$$

$$\Delta t = 21,9 - 0$$

$$\Delta t = 21,9 \text{ °C}$$

Reemplazando en la ecuación 3.1, se obtiene:

$$q_{paredes} = 0,709 * 0,75 * 21,9$$

$$q_{paredes} = 11,65 \text{ W}$$

Puerta

Se consideran los valores de $U_{fibvidrio} = 0,709 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $\Delta t = 21,9 \text{ °C}$ y

$A_{exterior_puerta} = 0,485 \text{ m}^2$, que reemplazando los datos en la ecuación 3.1 resulta:

$$q_{exterior_puerta} = 0,709 * 0,485 * 21,9$$

$$q_{exterior_puerta} = 7,53 \text{ W}$$

Y con respecto a la ventana se considera un $U_{ventana} = 2,84 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$, $\Delta t = 21,9 \text{ °C}$ y

$A_{ventana} = 0,171 \text{ m}^2$, que reemplazando en la ecuación 3.1 resulta:

$$q_{ventana_puerta} = 2,84 * 0,171 * 21,9$$

$$q_{ventana_puerta} = 10,64 \text{ W}$$

La carga transmitida por la puerta es:

$$q_{puerta} = q_{exterior_puerta} + q_{ventana_puerta}$$

$$q_{puerta} = 7,53 + 10,64$$

$$q_{puerta} = 18,17 \text{ W}$$

Finalmente, la carga total de calefacción por transmisión resulta:

$$q_{transmision} = q_{paredes} + q_{puerta}$$

$$q_{transmision} = 11,65 + 18,17$$

$$q_{transmission} = 29,82 \text{ W}$$

Cálculo de Carga de Producto

Las principales cargas de refrigeración con respecto a los productos introducidos contemplan el calor propio de los productos y el calor que se debe eliminar para que dichos productos consigan la temperatura de almacenamiento. Debido a que la aplicación del sistema de refrigeración es agilizar el proceso de enfriamiento del volumen útil para realizar cambios de temperatura, los productos que se ingresan a la cámara climática son instrumentos de medición a los cuales no se pretende enfriar, por lo tanto, estos cálculos no son considerados. Asimismo, el calor producido por los circuitos electrónicos de los instrumentos es insignificante para los cálculos debido a su tamaño y composición.

Cálculo de Carga Interna

Iluminación

La iluminación es un componente importante de la carga de enfriamiento y no es un cálculo sencillo debido a que la tasa de carga de enfriamiento de la iluminación en un momento dado puede ser bastante diferente del calor equivalente de la energía suministrada instantáneamente a dichas luces, debido al almacenamiento de calor. La principal fuente de calor de la iluminación tradicional proviene de los elementos emisores de luz (tipo incandescente y fluorescente) aunque algunos accesorios de las luminarias pueden generar también calor adicional. En este caso se ha optado por iluminación de tipo LED, por lo tanto, la tasa instantánea de ganancia de calor sensible de la iluminación de tipo eléctrica se calcula mediante la ecuación:

$$q_{el} = W F_{ul} F_{sa} \quad (3.5)$$

Donde

q_{el} = Ganancia de calor, W

W = Potencia lumínica, W

F_{ul} = Factor de uso de iluminación

F_{sa} = Factor de asignación especial de iluminación

La potencia seleccionada se calculó en la sección anterior (Diseño de Iluminación Interna) donde el $W = 15 W$, con respecto al F_{ul} este representa la relación entre la potencia en uso y la potencia total suministrada, y se considera con un valor de 1, mientras que el valor para F_{sa} para el caso de las luces LED se considera un valor de 1,3 (bajo voltaje), por lo que reemplazando en la ecuación 3.5 resulta:

$$q_{el} = 15 * 1 * 1,3$$

$$q_{el} = 19,5 W$$

Resistencia Eléctrica

Según Benavides y Carrasco (2010), la carga interna debido a la resistencia eléctrica de calefacción corresponde la carga máxima del sistema, por lo tanto:

$$q_{resistencia} = P_n \quad (3.6)$$

$$q_{resistencia} = 101,24 W$$

Po tanto, la carga interna será la suma de la carga de iluminación y debido a la resistencia eléctrica:

$$q_{interna} = 19,5 + 101,24$$

$$q_{interna} = 120,74$$

Cálculo de Carga por Infiltración de Aire

La infiltración más común se debe a diferencias de densidad de aire, por lo tanto, la cabina debe sellarse de modo que el flujo de aire que entra sea igual al flujo de aire sin humedad condensada que sale. Como esto no es posible porque no tendríamos acceso al interior de la cabina, por la abertura de la puerta es el único espacio por el cual el aire fluye directamente, esta ganancia de calor se calcula mediante la ecuación 3.7.

$$q_{infiltracion} = 0,577WH^{1,5} \left(\frac{Q_s}{A} \right) \left(\frac{1}{R_s} \right) \quad (3.7)$$

Donde

$q_{infiltracion}$ = Carga de refrigeración sensible y latente, kW

$\frac{Q_s}{A}$ = Carga de calor sensible por área cuando la puerta está abierta, kW/m^2

W = Ancho de la puerta, m

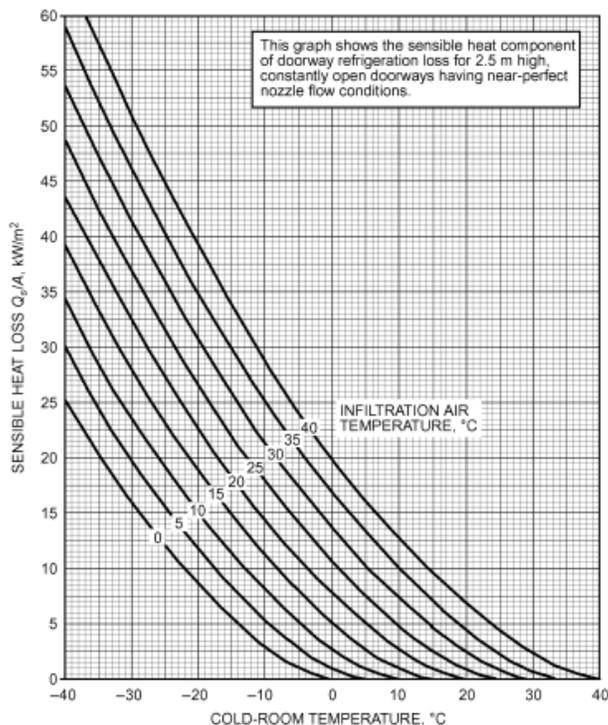
H = Alto de la puerta, m

R_s = Relación de calor sensible de la ganancia de calor

Se considera un valor de $\frac{Q_s}{A} = 2,5 kW/m^2$ obtenido de la Figura 31 para temperatura ambiental, mientras para $R_s = 0,73$ obtenido de la Figura 32.

Figura 31

Ganancia de calor sensible por intercambio de aire



Nota. Figura tomada de (ASHRAE Handbook, 2021, Capítulo 24, Figura 9) y consideran a una puerta que está continuamente abierta bajo un flujo establecido de aire.

Figura 32

Rs para infiltración desde el exterior a espacios refrigerados

Outdoor Cond.			Cold Space at 90% rh Dry-Bulb Temperature, °C									
DB °C	WB °C	rh, %	-30	-25	-20	-15	-10	-5	0	5	10	15
30	19.7	30	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.72	0.73	0.77	0.87	—
	21.8	40	0.71	0.69	0.68	0.66	0.65	0.63	0.63	0.64	0.68	0.83
	23.9	50	0.66	0.64	0.62	0.60	0.59	0.57	0.56	0.55	0.56	0.62
	25.8	60	0.62	0.60	0.58	0.56	0.54	0.52	0.50	0.48	0.48	0.49
35	19.0	20	0.80	0.79	0.78	0.77	0.77	0.77	0.79	0.84	0.96	—
	21.6	30	0.72	0.71	0.69	0.68	0.67	0.66	0.67	0.68	0.72	0.86
	24.0	40	0.66	0.64	0.63	0.61	0.59	0.58	0.57	0.57	0.58	0.63
	26.3	50	0.61	0.59	0.57	0.55	0.53	0.52	0.50	0.49	0.48	0.50
40	20.7	20	0.76	0.75	0.74	0.73	0.72	0.72	0.73	0.75	0.82	0.98
	23.6	30	0.68	0.66	0.65	0.63	0.62	0.61	0.60	0.61	0.62	0.68
	26.2	40	0.61	0.59	0.58	0.56	0.54	0.53	0.52	0.51	0.50	0.52
	28.6	50	0.55	0.54	0.52	0.50	0.48	0.47	0.45	0.43	0.42	0.42

Nota. Figura tomada de (ASHRAE Handbook, 2021, Capítulo 24, Tabla 9).

Reemplazando los datos en la ecuación 3.7 resulta:

$$q_{infiltracion} = 0,577 * 0,45 * 0,44^{4,5} * 2,5 * \left(\frac{1}{0,73}\right)$$

$$q_{infiltracion} = 259,52 \text{ W}$$

Cálculo de Carga por Equipo Relacionado

La principal carga por equipo relacionado es del ventilador dispuesto en la parte inferior para empujar el aire caliente al interior de la cabina, lo que resulta:

$$q_{equiporel} = P_{ventiladorAC}$$

$$q_{equiporel} = 0,21 * 120$$

$$q_{equiporel} = 24,15 \text{ W}$$

Carga Total de Refrigeración

Es la suma de todas las cargas, lo que resulta:

Tipo de cargas de refrigeración	Carga [W]
Carga por transmisión	29,82
Carga producto	-
Carga Interna	120,74

Carga por infiltración de aire	259,52
Carga por equipo relacionado	24,15
Pre – Total	434,23
Factor de seguridad (10%)	43,423
Total	477,653

Selección del Módulo Termoeléctrico (Celda de Peltier)

Para la selección de una celda de Peltier adecuada para una aplicación específica es necesario realizar una evaluación total del sistema en el cual se utilizará el enfriador. Sin embargo, según (Ferrotec, s.f.) para la mayoría de aplicaciones de refrigeración debe ser posible la utilización de alguna de las configuraciones de modulo estándar, por este motivo, el fabricante anima a la utilización de un dispositivo estándar siempre que sea posible. La metodología aplicada para la selección de una celda de peltier es un proceso iterativo para obtener parámetros operativos con el mínimo error, esto debido a que el sistema de refrigeración es generalmente de naturaleza dinámica y su rendimiento es función de varios parámetros interrelacionados. El procedimiento de selección completo el cual considera todas las variables con un enfoque de diseño mecánico se explica en la tesis de (Godoy, 2016) que indica que el procedimiento iterativo se complementa con el software dedicado proporcionado por Ferrotec, el cual sirve para la selección del número de celdas necesarias y el tamaño de disipadores de potencia para los lados caliente y frío, este software es de pago y facilita las graficas de rendimiento de las celdas de Peltier para varias temperaturas. En dicho proyecto se realiza el análisis de una celda estándar modelo TEC-12706 el cual puede utilizarse para un rango amplio de temperatura, es económico, es de fácil acceso en el mercado ecuatoriano y toda la documentación relacionada con el desarrollo de sistemas de refrigeración mediante efecto Peltier soporta su implementación.

Las consideraciones que justifican el uso de estas celdas para el presente proyecto se dividen en dos partes: las generalidades previas para la selección de un módulo termoeléctrico

indicadas por Ferrotec y las gráficas de rendimiento característico de la Celda Peltier TEC-12706 proporcionadas en la sección de diseño del trabajo de Godoy (2016).

Generalidades previas

Según (Ferrotec, s.f.) la selección de celdas Peltier parte de la resolución de las siguientes interrogantes:

- ¿Lo que se va a enfriar es un objeto o un sistema?

Es un sistema el cual servirá para calibrar instrumentos medidores de temperatura y humedad, el cual consta de aire en el interior, resistencia eléctrica, bandejas, soportes, etc.

- ¿A qué temperatura se debe mantener el sistema?

Debido a su aplicación no existe una única temperatura a la cual tenga que mantenerse, sino que la cámara está concebida para reducir la temperatura del aire interno más rápido y para que pueda llegar a temperaturas por debajo de la temperatura ambiental.

- ¿Qué cantidad de calor debe ser removido del sistema?

Según los cálculos 477,653 W.

- ¿El tiempo de enfriamiento es importante?

Debe ser el mínimo posible que permita la celda de Peltier.

- ¿Cuáles son las condiciones ambientales a las que está sometido el sistema a enfriar?

Las condiciones ambientales a las que estará expuesta la cámara climática son condiciones de estabilidad dentro de espacios interiores, sean laboratorios o espacios controlados, en donde por lo general la temperatura radica entre valores de 19 - 21 °C.

- ¿Cuáles son las condiciones ambientales extremas a las que estará expuesto el sistema?

La cámara no está concebida para trabajar en entornos agresivos, por lo que la máxima temperatura ambiental será de un valor de 27,1 °C, correspondiente a la máxima temperatura ambiental en Quito.

- ¿Con cuánto espacio cuenta la cámara climática para la instalación de la celda y su sistema de disipación?

Por motivos de diseño y tomando en cuenta la estética, el espacio destinado para instalar los sistemas de disipación de calor será la parte posterior de la cámara. Por tal motivo se tuvo que realizar adaptaciones a la estructura de la cabina y de la puerta posterior externa de la cámara.

- ¿Qué disponibilidad tiene la fuente de energía?

Al ser módulos que se consiguen fácilmente en el mercado ecuatoriano y que tienen la particularidad de ser relativamente económicos, se utilizará una fuente conmutada de energía eléctrica que proporcione en su salida 12 VDC y la suficiente corriente para alimentar a las celdas Peltier (6 A).

- ¿Debe ser controlada la temperatura de enfriamiento?

Al ser una cámara cuya característica principal es la estabilidad térmica es necesario realizar el control de la temperatura interna, por lo tanto, es obligatorio el establecimiento de un lazo de control específico para la temperatura, en donde la señal de control será la energía suministrada a la celda Peltier.

Una vez que se han respondido las preguntas se procede a seleccionar la o las celdas que logren cumplir con las directrices establecidas mediante el uso de las curvas de rendimiento.

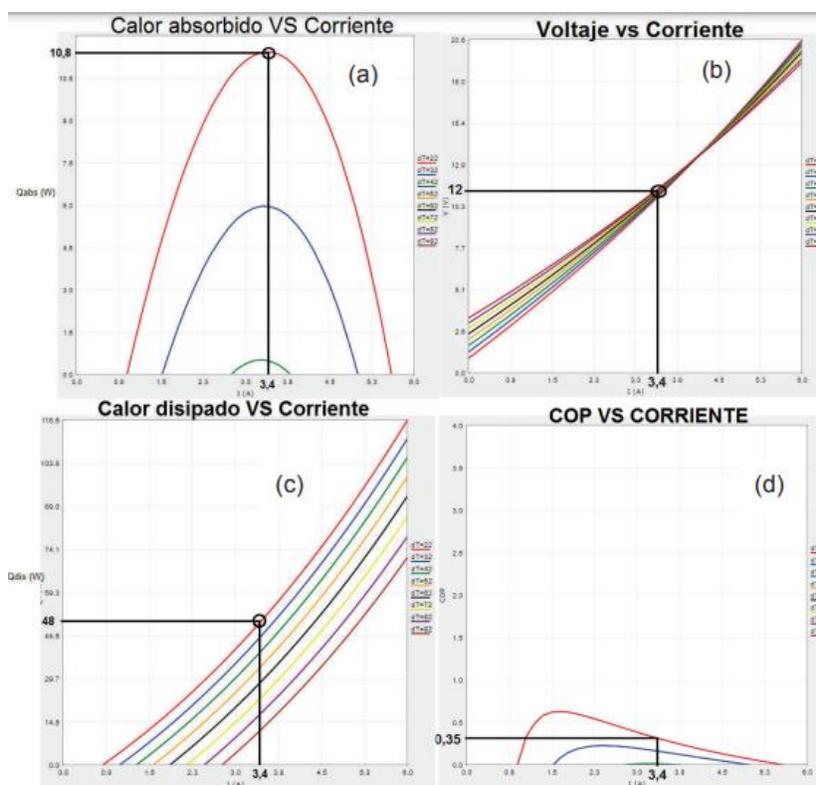
Uso de los gráficos de rendimiento del módulo

La Figura 33 muestra las gráficas de rendimiento para la celda TEC-12706 que ha sido obtenida por el software de Ferrotec en el cual han sido ingresado los datos de las preguntas

respondidas, con estos datos se trazan los valores críticos de diseño a considerarse para la selección de la celda Peltier.

Figura 33

Gráficas de rendimiento para la celda TEC-12706



Nota. Figura tomada de (Godoy, 2016).

En la Figura 33 se observa que una fuente de 12 VDC debe tener la capacidad de suministrar mínimo 3,4 A con lo cual el calor disipado será de 51 W, al tener una diferencia de temperatura menor de 67 °C es justificable el uso de la celda Peltier TEC-12706, cuyas características generales están descritos en el Apéndice F. Una aclaración que es importante resaltar es que una única celda no es suficiente para cumplir con los requerimientos de carga de refrigeración por lo que se deben considerar otros módulos hasta alcanzar o sobre pasar el calor absorbido necesario, para el caso particular de este proyecto se implementan 4 celdas de

Peltier con un suministro de corriente de 6A, con lo cual la cámara está en la capacidad de alcanzar temperaturas de hasta 0 °C.

Disipadores

La diferencia de temperatura entre el lado caliente y el frío es el principal inconveniente con esos sistemas, como este valor está alrededor de 67 °C el disipador del lado caliente debe ser mucho más grande que el colocado en el lado frío, obteniendo de esta manera una mejor disipación del calor por conducción. Con respecto a las dimensiones, según (Godoy, 2016) para disipar el calor del lado caliente el disipador necesita que se calculen las longitudes corregidas, el área superficial y el área primaria superficial, con lo cual se obtiene el área total expuesta a la convección. Como las aletas exteriores están acopladas a un ventilador, el flujo de aire por el disipador es convectivo de tipo forzado, una vez que se encuentran los valores de las resistencias térmicas para cada una de las aletas del disipador se debe comprobar que los valores sean menores o iguales a 0,5 K/W y finalmente si se cumple con este requisito, los disipadores podrán ser empelados. Para este caso particular se utilizan disipadores de aluminio de 12 aletas de 0,8x0,8x0,3 m acoplados con ventiladores de 12VDC de 0,8x0,8x0,25 con rejilla, los datos técnicos de estos elementos están descritos en el Apéndice G.

Diseño del Sistema de Humidificación

Cálculo de Carga de Humificación

Según la ASHRAE en su capítulo dedicado a los humidificadores, el cálculo de la carga de humidificación para un volumen de aire determinado depende tanto de la tasa de infiltración natural de dicho volumen o de la cantidad de aire que es introducido de manera mecánica desde el exterior. Aunque se pueden realizar consideraciones más específicas, para el presente caso en el cual la inyección de humedad al interior de la cabina se va a realizar mediante un humidificador, la carga de humidificación se puede calcular mediante la ecuación definida para espacios infiltración, por lo tanto:

$$H = \rho VR(W_i - W_o) - S + L$$

Donde

H = Carga de humidificación, *kg de agua/h*

ρ = densidad del aire a nivel del mar, *1,20 kg/m³*

V = Volumen interno de la cabina, *m³*

R = Índice de funcionamiento, *generalmente se considera un valor de 1*

W_i = Máximo porcentaje de HR en el interior deseado en la cabina, *%HR*

W_o = HR promedio para la ciudad de Quito, *%HR*

S = Contribución de fuentes internas de humedad, *kg de agua/h*

L = Otras pérdidas de humedad, *kg de agua/h*

Se considera un valor de $V = 0,026 \text{ m}^3$, $W_i = 80 \text{ %HR}$, $W_o = 50 \text{ %HR}$ y $S = L = 0 \text{ kg de agua/h}$ debido a que la cabina de la cámara se encuentra sellada herméticamente, lo que reemplazando resulta:

$$H = 1,22 * 0,026 * 1 * (80 - 50)$$

$$H = 0,9516 \text{ kg de agua/h} \approx 1 \text{ L/h}$$

Selección del Humidificador

El humidificador seleccionado es de tipo ultrasónico con una capacidad de nebulización de 1 L/h , como criterio de selección adicional es que el diámetro de las partículas de niebla debe ser menor o igual de 10 micras, para evitar daños en los instrumentos de calibración más sensibles, las especificaciones están descritas en el Apéndice H.

Sistema de Control

Para el diseño del sistema de control se deben considerar tres puntos importantes: El primer punto son los rangos de temperatura y humedad deseados para la cámara climática, para esto se debe considerar la aplicación objetivo de la cámara, como se estableció con

anterioridad, el objetivo es que se genere un volumen útil en el cual se puedan introducir instrumentos de medición de temperatura y humedad con el fin de emitir un criterio de funcionalidad del instrumento basado en la comparación de las medidas mostradas con las registradas por un instrumento patrón, para esto es importante el establecimiento de dichos rangos entre 0 °C – 80 °C para temperatura y 10 % – 90 %RH para humedad, esos valores son el punto de partida para la selección adecuada de todos los materiales involucrados en los sistemas, como se ha mencionado.

El segundo punto son las técnicas de control que son posibles implementarse para los sistemas de calefacción, refrigeración y humidificación, ya que serán diferentes para cada sistema como se verá a continuación, sin embargo, se realiza un análisis del tipo de técnica más adecuada a implementarse tomando en cuenta las funcionalidades del controlador y los actuadores disponibles.

El tercer punto es el funcionamiento de los modos automático y manual, ya que la cámara será de utilidad para procesos específicos tanto de calibración como de experimentación de nuevos métodos de calibración y caracterización basados en pruebas de medición indirecta de variables que relacionen la temperatura, humedad y presión.

Etapas de Sensado

Una vez seleccionado los rangos en los cuales funcionará la cámara climática, la selección del sensor más adecuado para esta aplicación se basa en el tipo, las magnitudes de medida y el protocolo de comunicación. Como en el marco referencial ya se realizó una comparativa previa de los sensores más utilizados en la industria, en el presente apartado se realizará una exclusión selectiva de los sensores para altas temperaturas (termopares) y los que no posean una buena linealidad en su respuesta (termorresistencias PTC y NTC), quedando únicamente las termorresistencias RTD y los sensores digitales descritos. La Tabla 11 muestra una comparación de los sensores que pueden ser útiles basados en las características técnicas respectivas.

Tabla 11

Comparación de sensores aplicables a la cámara climática

Características	RTD: PT100	DS18B20	SHT20	HMT330
Tipo	Resistencia	Circuito Integrado	Circuito Integrado, CMOSens	Circuito Integrado, Humicap
Rango de medición	- 50 °C hasta 205 °C	-55 °C hasta 125 °C	Temperatura: -55 °C hasta 125 °C Humedad: 0 %RH hasta 100 %RH	Multi-rango, Temperatura: 15 °C hasta 25 °C, -20 °C hasta 40 °C, -40 °C hasta 180 °C Humedad: 0 %RH hasta 100 %RH
Linealidad	Excelente	-	Excelente	Excelente
Estabilidad	Alta	Moderada	Alta	Alta
Repetibilidad	Alta	Alta	Temperatura: $\pm 0,1$ °C Humedad: $\pm 0,1$ %RH	Incluido en dato de precisión
Precisión	Alta	Media	Temperatura: $\pm 0,3$ °C Humedad: ± 3 %RH	Temperatura: $\pm 0,05$ °C Humedad: $\pm 0,6$ %RH
Resolución	0,1 °C	9 bits = 0,5 °C 10 bits = 0,25 °C 11 bits = 0,125 °C 12 bits = 0,0625 °C	Temperatura, 12 bits = 0,04 °C 14 bits = 0,01 °C Humedad, 8 bits = 0,7 %RH 12 bits = 0,04 %RH	
Sensibilidad	0,3 %/°C	-	-	$\pm 0,005$ %/°C a full escala
Robustez	Moderada, Para ambientes no agresivos	Moderada, Para ambientes no agresivos	Alta, para ambientes industriales (con carcasa de protección)	Sumamente alta, para aplicaciones en ambientes agresivos
Tiempo de respuesta	Media	Alta	Elevada	Elevada
Deriva	Moderada, Susceptible a golpes y vibraciones	Baja, Susceptible a golpes	-	-
Salida	Analógica	Digital,	Digital,	Analógica,

	1 cable	2 cables (Protocolo I2C)	Voltaje: 0 V a 1 V, 0 V a 5 V, 0 V a 10 V Corriente: 0 mA a 20 mA, 4 mA a 20 mA Digital, Protocolo RS-232, RS-485	
Costo	Bajo	Bajo	Moderado	Sumamente alto

Nota. Tabla adaptada de (Cadena & Laguna, 2021, Tabla 22) y las hojas de datos de los sensores SHT20 y HMT 330.

De la comparación mostrada en la Tabla 11 se obtienen las siguientes conclusiones: En primer lugar, los sensores mostrados pueden ser plenamente considerados para la aplicación ya que constan del rango de temperatura adecuado, ofrecen excelentes prestaciones de medición (precisión, estabilidad, repetibilidad, tiempo de respuesta, etc.), eléctricas y mecánicas, particularmente el sensor PT100 es de fácil obtención en el mercado, es altamente recomendado en aplicaciones de baja-mediana escala debido a su fácil instalación, las presentaciones para ambientes industriales son altamente robustas y su precio es relativamente bajo en comparación a las demás, sin embargo, uno de los principales inconvenientes es que es un tipo de sensor analógico, razón por la cual necesita de un módulo especial para su correcto acondicionamiento lo que en la mayoría de ocasiones depende del tipo de controlador implementado (por compatibilidad de ciertas marcas) y el otro inconveniente es que es un sensor netamente de temperatura por lo que para registros de humedad se necesitaría la implementación de un sensor dedicado de humedad, aumentando el costo y los materiales necesarios.

Un problema similar se tiene con los sensores DS18B20 los cuales han sido incluidos como un tipo de sensor con salida digital básico para medición de temperatura que de la misma manera presenta buenas características de medición y eléctricas, ya que consta de un circuito

integrado con un acondicionamiento particular y con una protocolo de comunicación sumamente flexible como lo es el de un cable (1-Wire / Una sola línea de datos con estructura maestro-esclavo mediante bus de datos), sin embargo, el principal inconveniente es que el sensor necesita de una carcasa adecuada para su implementación en sitios especiales, como es el presente caso, que debe estar fijo a la cabina que posteriormente se calentará a medida que la temperatura aumente en el interior, además de esto este tipo de protocolo de comunicación necesita de un módulo especial para la interpretación de sus datos directamente (protocolo que algunas marcas de controladores industriales no manejan directamente) o de una interfaz que interprete los datos y los envíe al controlador mediante otro protocolo de comunicación industrial como Modbus.

Finalmente, en el caso de los sensores SHT20 y HMT330 son sensores que se basan en circuitos integrados desarrollados y patentados por cada marca (Sensirion y Vaisala, respectivamente), son sensores enfocados al ámbito industrial pero también, según la experiencia en el campo, debido a su rango de medición flexible y la posibilidad de tener lecturas de temperatura y humedad en un solo dispositivo, son utilizados en instrumentos metrológicos (dataloggers) debido a sus excelentes características de medición, consumo energético y robustez mecánica. Con respecto al sensor SHT20 el inconveniente es que el único protocolo de comunicación es el de 2 cables o I2C (por sus siglas en inglés Inter-Integrated Circuit) lo que dificulta la transición de los datos ya que ningún controlador maneja este protocolo de comunicación y, además, su versión con carcasa para temperaturas y resistente al agua no es de fácil obtención en el mercado ecuatoriano. Con respecto al sensor HMT330 este es un sensor sumamente completo en todos los sentidos, ya que permite leer temperatura y humedad en rangos reducidos (siendo sensores específicos para aplicaciones particulares), excelentes características de medición, de consumo energético y para ambientes altamente agresivos, además de esto cuenta con un sistema operativo completo que ofrece varios protocolos de comunicación, conectividad a la red, base de datos, etc., los principales

inconvenientes son por un lado el precio ya que llega a un valor de más de mil dólares en USA, y por otro lado la obtención en el mercado ecuatoriano es totalmente nula.

Una vez realizado el análisis respectivo del grupo reducido de sensores que pueden ser aplicables al proyecto, se consideró la utilización de los sensores de tipo RTD, particularmente los PT100 para la etapa de pruebas de uniformidad, estabilidad y caracterización (la explicación se realizará en las secciones posteriores), finalmente el sensor SHT30 será utilizado como sensor principal para la obtención de los valores de temperatura y humedad dentro de la cámara, cabe resaltar que debido al protocolo de comunicación I2C que tiene dicho sensor, se utilizará un Arduino Uno como dispositivo intermediario que registrará los datos y los enviará al controlador mediante el protocolo de comunicación Modbus TCP/IP en donde el controlador será el dispositivo maestro y el Arduino Uno será el dispositivo esclavo.

Controlador

Como se mencionó con anterioridad, uno de los requisitos de la empresa es la utilización de los dispositivos disponibles en el área de mantenimiento, por lo que para el presente proyecto se utilizará el controlador LOGO! v8.3 de la marca Siemens, generalmente las primeras versiones de este dispositivo son considerados como relés programables, sin embargo, las nuevas versiones cuentan con nuevas funcionalidades que lo convierten en miniPLC para aplicaciones de baja a mediana escala, siendo de tipo mixto ya que es modular pero puede ser expandible para diferentes módulos de E/S, comunicación y especiales para sensores. A pesar de esto, en la Tabla 12 se presenta una comparación de este miniPLC con algunos PLCs de gama baja de algunas otras marcas para establecer puntos de comparación y justificar que el uso de este controlador satisface plenamente los requerimientos de la aplicación.

Tabla 12

Comparación de los modelos de PLCs de gama baja aplicables a la cámara climática

Características	MiniPLC Siemens LOGO! 24	Allen Bradley Micro820	Panasonic FPX-AFPX- C30RD	Xinje XC3-24T-E
Alimentación	24 VDC	24 VDC	24 VDC	100-240 VAC
Entradas digitales	8 DI	8 DI	16 DI	14 DI
Entradas analógicas	4 AI de las 8 integradas	4 AI	4 AI	-
Salidas digitales	4 DO a transistor	7 DO a relé	14 DO a transistor	10 DO a transistor
Salidas analógicas	-	1 AO	2 AO	-
Interfaz de comunicación	Ethernet (RJ45): Hasta 9 dispositivos Ethernet. Modbus TCP/IP: Hasta 8 LOGO! en modo esclavo	Ethernet RJ45 Modbus: RTU y TCP/IP Serial: RS-232 y RS-485	Ethernet RJ45 Modbus: RTU y TCP/IP Serial: RS-232 y RS-485	Serial: RS-232 y RS-485
Módulos de expansión	I/O hasta 24/20/8/8	2 módulos	Hasta 16/14	Máx 7 módulos
Memoria externa	MicroSD Estándar	MicroSD Estándar	-	-
Backup de programa	480 horas	-	20000 horas	-
Conectividad a HMI	LOGO! TDE / SIMATIC HMI Mediante puerto Ethernet	2080-REMLCD y PanelView	Serie HM y GT	HMI TouchWin
Software	LOGO! Soft Comfort v8.3	Connected Components Workbench	Control FFWIN Pro Version 5.1 / FFWIN GR Version 2.5	XDPPro
Tamaño (alto/ancho/espesor) en mm	90x71,5x58	90x104x75	90x100x79	102x63x73,3
Imagen referencial				
Costo	Bajo	Moderado	Moderado	Moderado

Nota. Adaptado de las hojas de datos de los PLCs.

La Tabla 12 muestra una comparativa de los controladores de diferentes marcas que poseen similares características que pueden ser plenamente utilizados para la presente aplicación, la diferencia radica en el precio ya que por ejemplo los controladores Allen Bradley Micro820 es un modelo discontinuado y no es de fácil obtención en la ciudad de Quito, los lugares que posiblemente disponen del modelo lo venden a un precio de alrededor de \$400 a \$600 lo que es un precio relativamente moderado mientras que los controladores Xinje tienen un precio de alrededor de \$300 a \$500 que es de la misma manera un precio relativamente moderado. Con respecto a las entradas y salidas, se considera de cierta manera un sobredimensionamiento el tener 16 entradas digitales cuando simplemente se van a ocupar dos o tres, por lo que es importante la selectividad del controlador y sus módulos, en caso de ser requeridos, acorde a las especificaciones de entradas y salidas necesarias. Finalmente, el MiniPLC LOGO! es un controlador relativamente barato ya que su precio está entre los \$150 y \$250, consta de una pantalla integrada con teclas direccionales que pueden ser utilizadas como teclas de función básicas y la principal novedad es que cuenta con una herramienta gratuita llamada LOGO! Web Editor mediante la cual es posible crear páginas web para monitorear y controlar el proceso desde cualquier dispositivo inteligente como celulares, tablets, PCs, etc., a esta herramienta se la pretende aprovechar al máximo para la implementación de la HMI, con lo que se reduce los costos totales del proyecto ya que no es necesario la implementación de una HMI física dedicada cuyo precio está por los \$200 en sus versiones más básicas, otro aspecto a tomar en cuenta es que la tendencia actual de la conectividad mediante el internet convierte a esta herramienta en una opción viable y totalmente funcional.

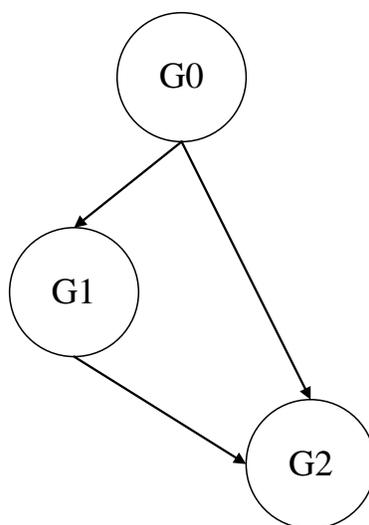
Lógica de Control

El PLC será el encargado de controlar simultáneamente 4 procesos: calefacción, refrigeración, humidificación y deshumidificación de la cabina interna de la cámara climática, por lo tanto, para llevar a cabo un correcto desarrollo del sistema de control se considera un diseño estructurado el cual consiste en la representación de forma individual de los diferentes

aspectos relacionados con el proceso como las acciones a llevar a cabo en el funcionamiento normal, los modos de marchas/paros aplicables al proyecto y las paradas de emergencia como medida de seguridad para asegurar un funcionamiento seguro del automatismo, esta es una estructura jerarquizada que utiliza diagramas Grafcet para la representación de los estados que incluyen cada uno de los aspectos mencionados, la Figura 34 muestra la jerarquía de los grafcet considerados para la implementación, para este caso en particular se considera a G0: Grafcet de seguridad, G1: Grafcet de modos de funcionamiento y G2: Grafcet de ejecución del proceso normal.

Figura 34

Diagrama de Grafcet jerarquizado



Para desarrollar la descripción de las etapas, las acciones asociadas y las transiciones que componen los Grafcet establecidos y mostrados en la Figura 34 se realiza el diagrama de flujo del proceso completo basado en los modos de funcionamiento en el cual se muestra el procedimiento que se lleva a cabo para cumplir con los objetivos particulares de cada subproceso obteniendo de esta manera un pleno conocimiento (a grandes rasgos) del funcionamiento total del sistema.

Diagrama de Flujo del Proceso de Calibración

Para realizar un control efectivo se debe considerar la naturaleza de los actuadores que participan en cada subproceso y la técnica de control disponible en el controlador, siendo para cada subproceso una combinación de actuadores con un elemento en común, un ventilador de mayor potencia que sirve para mezclar el aire en el interior de la cabina y para desfogarlo cuando sea necesario, para el caso de la calefacción se combina con la resistencia eléctrica, para el caso de la refrigeración se combina con las celdas Peltier y para el caso de la humidificación se combina con el ingreso de vapor por parte del humidificador, mientras que la técnica de control que dispone el PLC LOGO! es de tipo PI (Proporcional-Integral), por lo tanto, el diagrama de flujo para describir el proceso completo de la cámara climática se muestra en la Figura 35.

Figura 35

Diagrama de flujo del proceso completo según los modos de funcionamiento

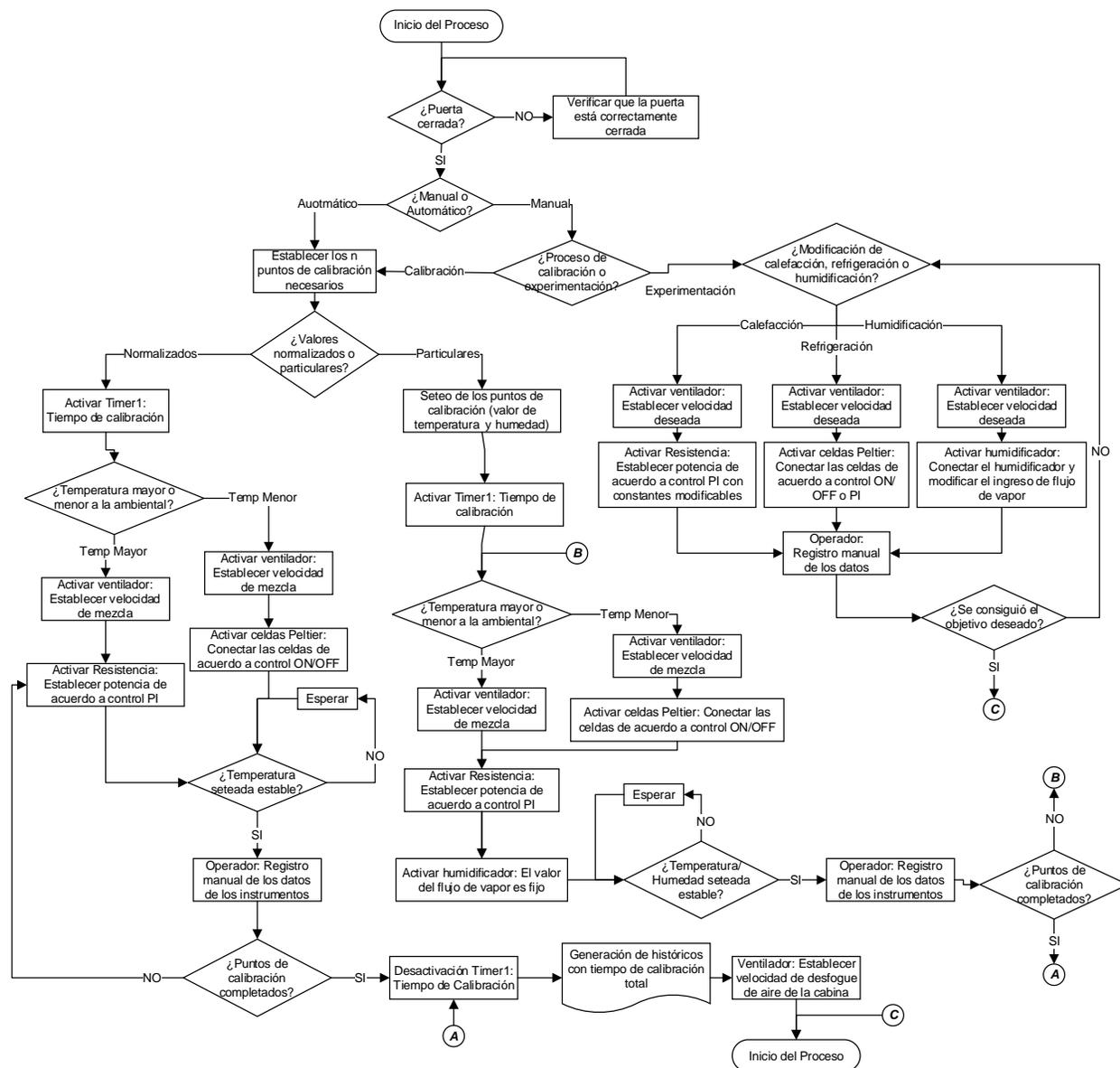


Diagrama Funcional del Control del Proceso

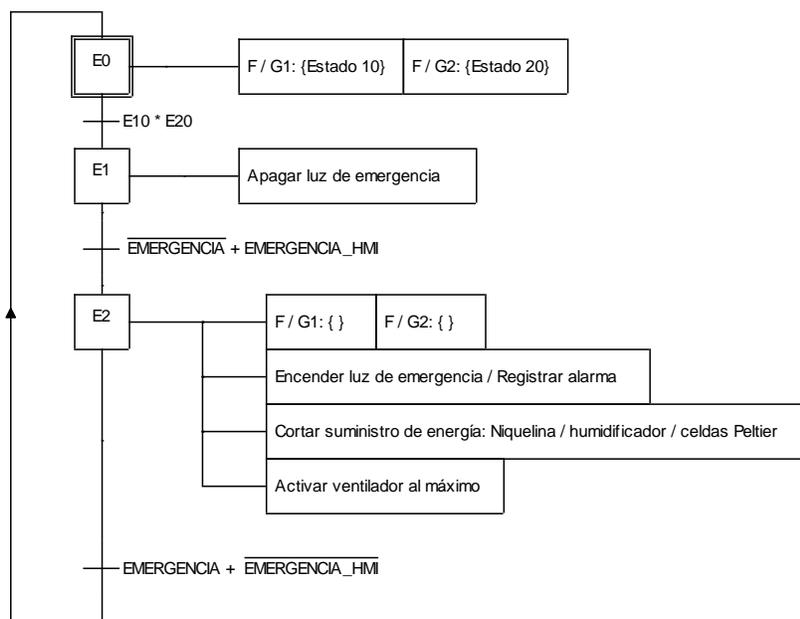
Una vez detallado el diagrama de flujo del proceso completo se describen las acciones asociadas a los estados que componen cada uno de los Grafcet propuestos.

G0: Grafcet de seguridad

Este Grafcet mostrado en la Figura 36 es el de mayor jerarquía y es un método de verificación y acción que está pensado para prevenir cualquier incidente que pueda afectar tanto a la integridad de la cámara climática como para la persona que lo está operando.

Figura 36

Grafcet de seguridad



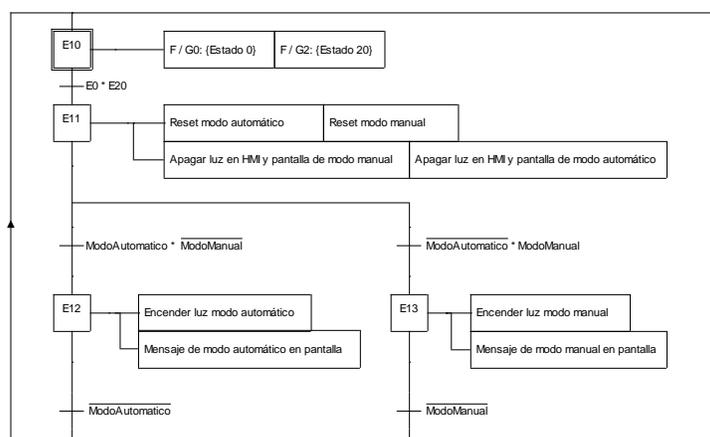
G1: Grafcet de modos de funcionamiento

Los modos de funcionamiento mostrados en la Figura 37 son de tipo manual y automático, un funcionamiento automático hace referencia a que el técnico puede establecer cuantos puntos de calibración requiere y el sistema (mediante confirmación de registro exitoso de datos) procede a automáticamente a establecer el siguiente punto de calibración, es importante señalar que dentro del modo automático la empresa ha solicitado que se establezcan ciertos valores de temperatura y humedad como valores normalizados para pruebas internas. Con respecto al modo manual este está pensado para tenga una función de calibración en donde se modifican individualmente los valores en cualquier momento y una

función de experimentación en la que se puedan hacer pruebas aisladas de cada uno de los actuadores de la cámara climática (resistencia eléctrica de calefacción, ventilador, celdas Peltier, humidificador y las luces) con el objetivo de modificaciones de los parámetros de sintonización del control PI o experimentación de nuevos métodos de medición indirectos que puedan mejorar los procedimientos internos de la empresa.

Figura 37

Graficet de modos de funcionamiento

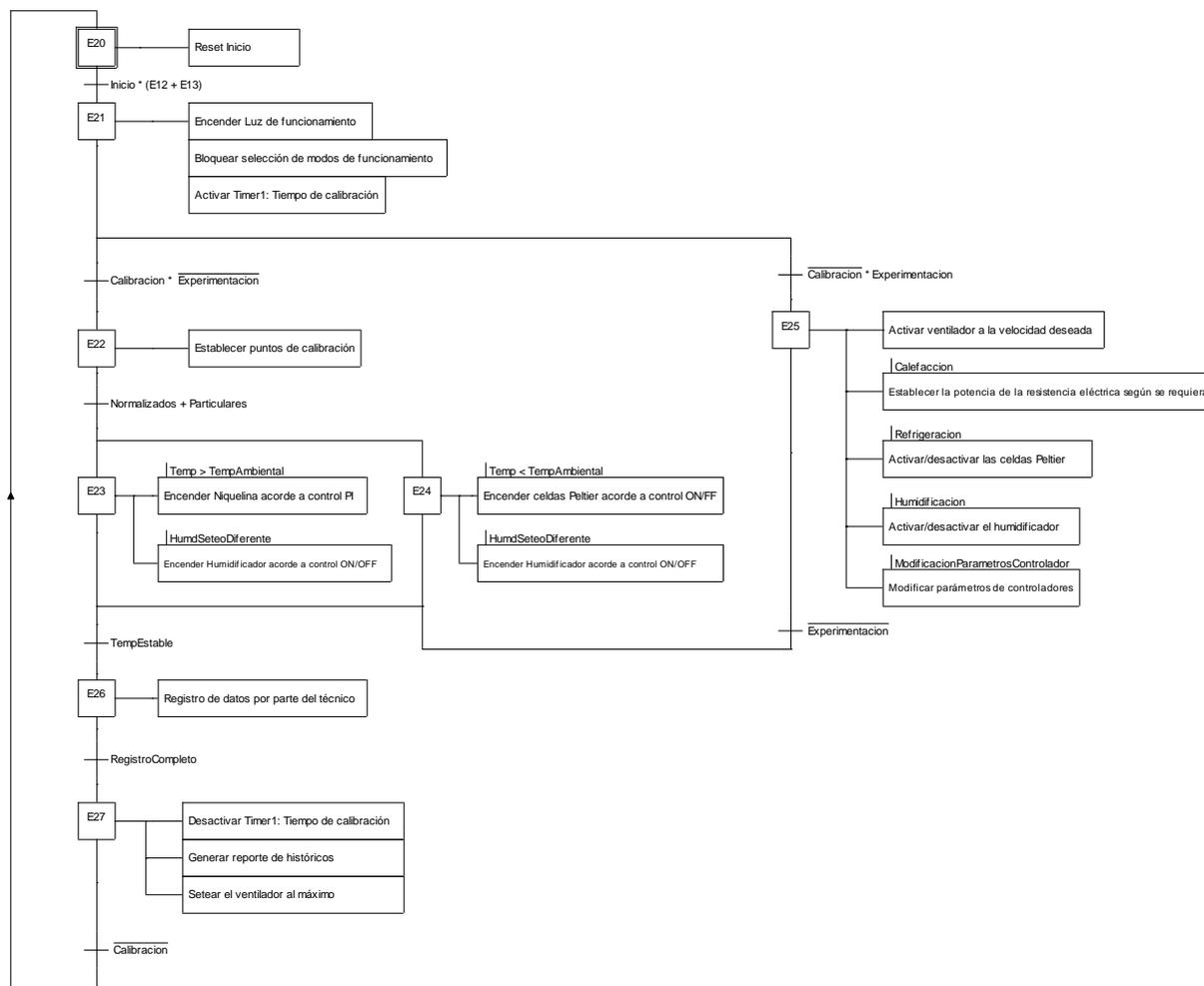


G2: Graficet de operación

El Graficet de operación mostrado en la Figura 38 describe como los actuadores entran en funcionamiento para alcanzar la estabilidad de la cámara en temperatura y humedad, lo cual es el principal objetivo que se persigue en el proyecto.

Figura 38

Graficet de operación

**Diseño de la HMI**

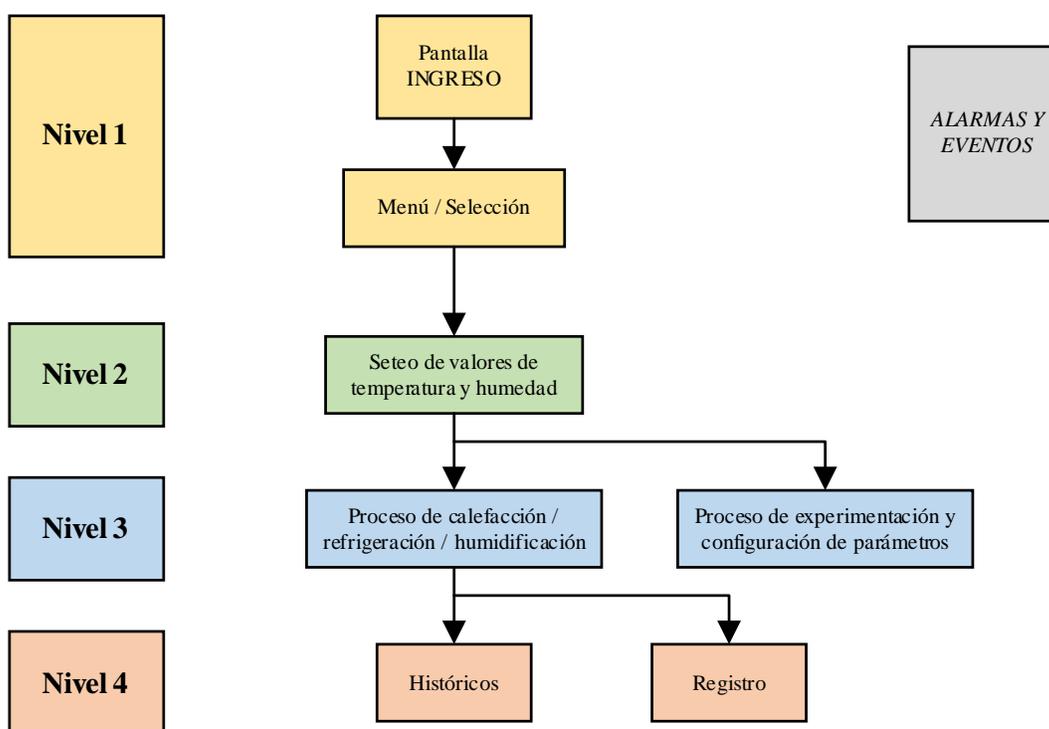
Se consideró para el diseño de la HMI a un modelo de pantallas bastante sencillo y práctico, que permita al técnico de calibración una visualización y monitoreo completo de la temperatura y la humedad interna de la cámara climática, así como de otros elementos que han sido solicitados por parte de los técnicos del laboratorio de temperatura y humedad de la empresa para que sean desplegados en la HMI.

Arquitectura

Para comenzar con el diseño de la interfaz se basa en la arquitectura mostrada en la Figura 39, en la cual se considera el orden del proceso y del procedimiento de calibración. La arquitectura mostrada es de tipo jerárquica y está dividida en cuatro niveles, siendo el primero el de mayor jerarquía y el cuarto de menor jerarquía.

Figura 39

Arquitectura de la HMI de la cámara climática



La descripción de las funcionalidades de las pantallas de la HMI propuesta son las siguientes:

- *Pantalla INGRESO*: Es la pantalla de acceso al sistema según el tipo de usuario en donde se otorgan permisos de administrador y técnico, para el caso de los administradores se establece una contraseña de acceso al sistema el cual puede modificar los parámetros del controlador y demás modificaciones del programa,

mientras que los técnicos pueden ingresar los puntos de calibración deseados y realizar todo el proceso con normalidad.

- *Menú / Selección:* Esta pantalla permite el acceso a las demás pantallas en los diferentes niveles inferiores mediante la navegación por un menú.
- *Seteo de valores de temperatura y humedad:* En esta pantalla se despliegan las opciones para ingresar el número de puntos de calibración y sus valores de establecimiento (Set Points).
- *Proceso de calefacción / refrigeración / humidificación:* Aquí se pueden supervisar los valores de temperaturas y humedades ingresados como puntos de calibración, así como el tiempo del proceso y el valor en el cual se encuentran los actuadores.
- *Proceso de experimentación y configuración de parámetros:* En esta pantalla se disponen de todas las opciones para cambiar los valores de temperatura y humedad, así como la configuración de los parámetros del controlador, los valores de los actuadores, configuraciones de red y del programa del PLC, cabe mencionar que a esta pantalla solo se puede acceder mediante privilegios de administrador.
- *Históricos:* En esta pantalla se puede observar de manera gráfica los valores de temperatura y humedad, tanto en el régimen transitorio como estable.
- *Registro:* En esta pantalla se puede realizar la confirmación del registro de los datos de calibración obtenidos en un proceso normal.
- *Alarmas y eventos:* En esta pantalla se despliegan todos los eventos que están fuera del comportamiento normal del proceso y que pueden ser perjudiciales para la cámara climática como para el técnico.

Distribución de las pantallas

Cada una de las pantallas establecidas debe contar con una distribución adecuada de los elementos que la componen en el espacio disponible, para esto se consideran las

directrices establecidas en la norma ISA 101, además de esto la guía GEDIS (Guía Ergonómica de Diseño de Interfaz de Supervisión) proporciona ciertas pautas para la ubicación del título, hora, fecha, menú de navegación de la interfaz, gestión de alarmas y de una representación del proceso, las pantallas propuestas se muestran en las Figuras 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46 y 47.

Figura 40

Distribución de los elementos de la pantalla de ingreso

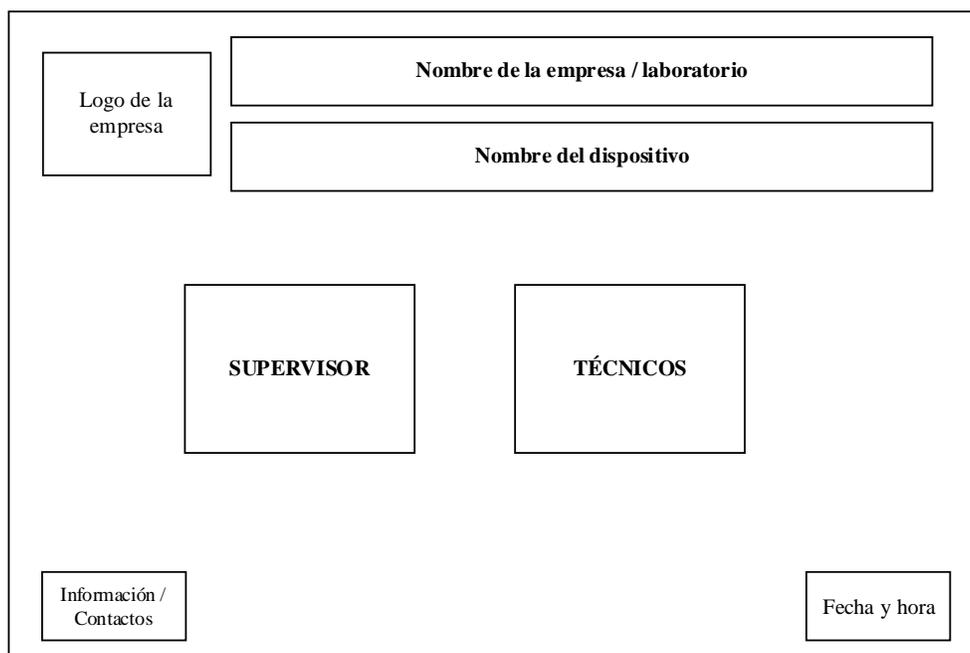
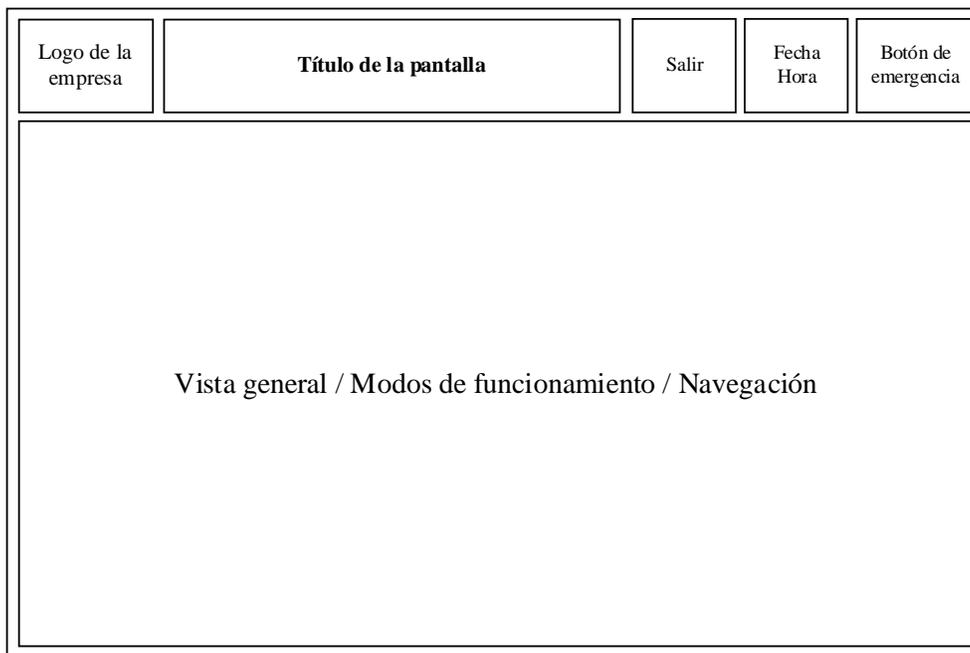


Figura 41

Distribución de los elementos de la pantalla de Menú / Selección

**Figura 42**

Distribución de elementos en la pantalla de seteo de valores de temperatura y humedad

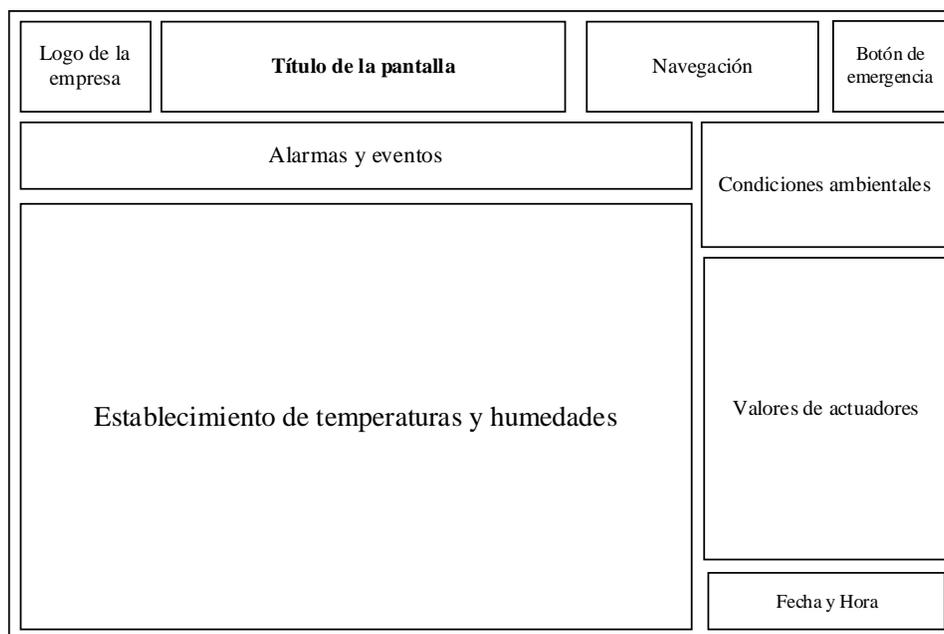
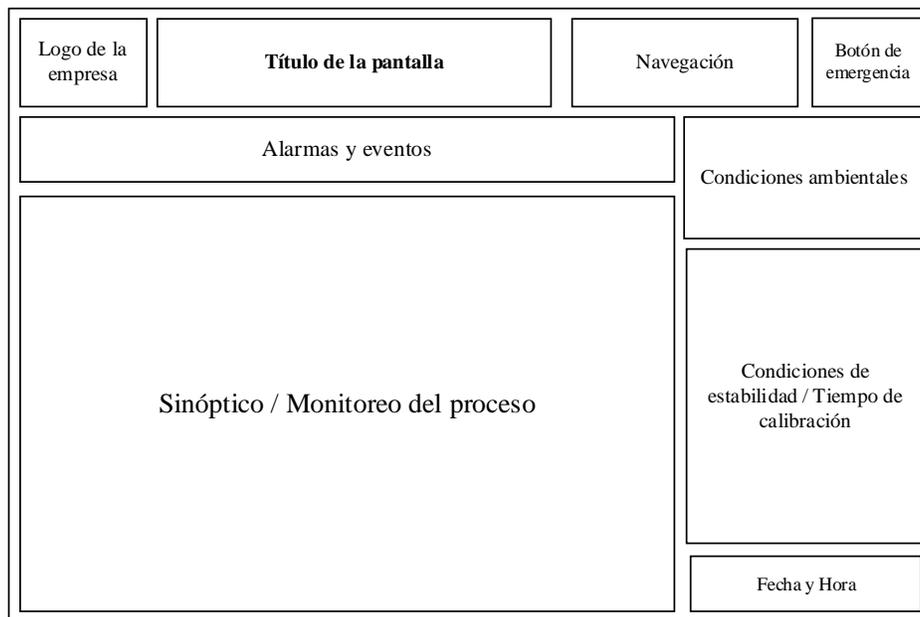
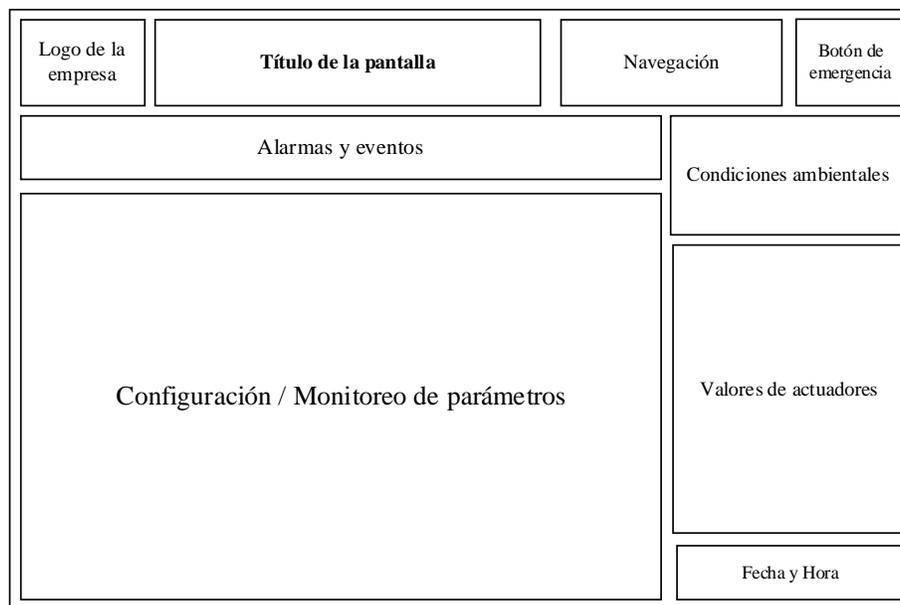


Figura 43

Distribución de los elementos de la pantalla de proceso de calefacción / refrigeración / humidificación

**Figura 44**

Distribución de los elementos de la pantalla del proceso de experimentación y configuración de parámetros



Una de los indicadores de la guía GEDIS es que se debe considerar una pantalla particular para la visualización de los gráficos de tendencias para evitar la aglomeración de la información en las pantallas, además de esto se deben considerar las siguientes recomendaciones adicionales:

- La gráfica mostrada debe ser de solo una variable.
- Los rangos de la gráfica deben ser adecuación para una correcta visualización e interpretación.
- Las escalas deben incrementarse en dirección vertical (de abajo hacia arriba).
- Se debe utilizar un mallado para mejorar la visualización de la evolución de la gráfica y los datos deben ser visualizados de manera gráfica y en forma textual.

Figura 45

Distribución de los elementos de la pantalla de históricos

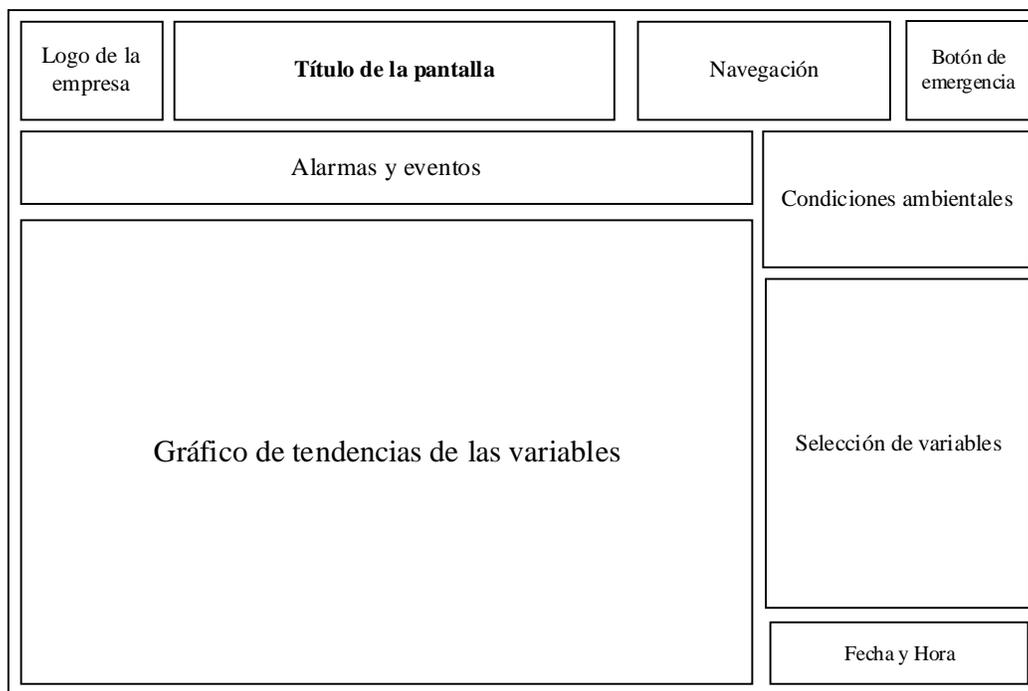
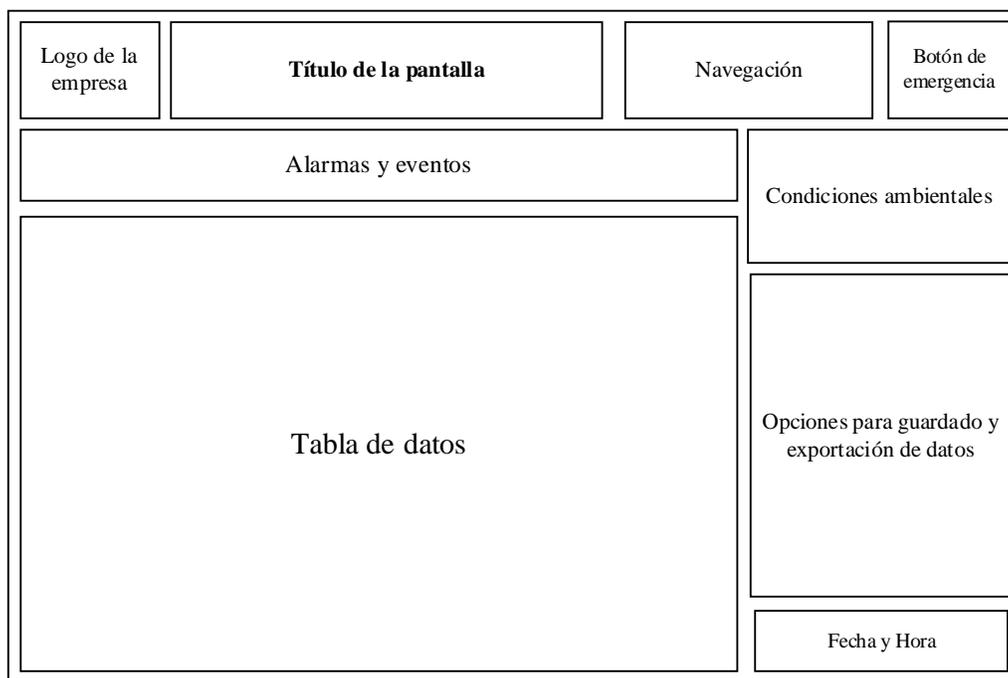
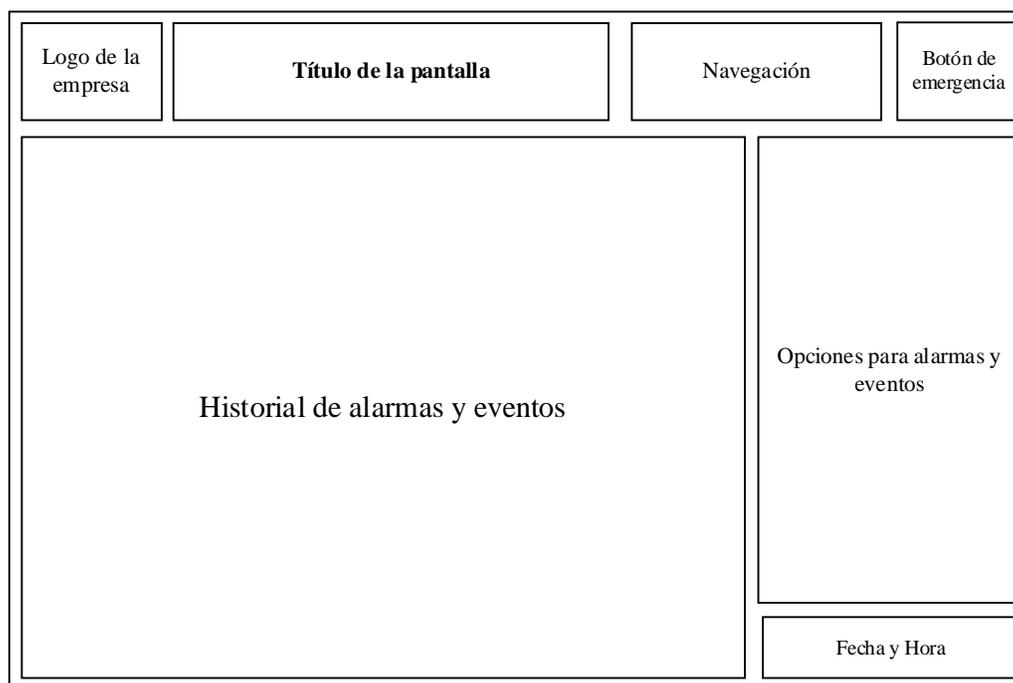


Figura 46

Distribución de elementos de la pantalla de registro

**Figura 47**

Distribución de los elementos de la pantalla de alarmas y eventos



Navegación

Según la guía GEDIS la orientación de las opciones de navegación dependerá del diseño de la HMI, además de esto se debe tomar en cuenta las recomendaciones:

- La dimensión de los botones en general debe ser lo suficientemente grande.
- La agrupación de los botones debe ser en un grupo en particular, en donde se mantenga su posición para evitar que el operador se confunda con las posiciones.
- Los textos descriptivos deben ser lo más claro y simplificado posible, por lo que es posible la utilización de acrónimos.
- La ubicación del acceso a la pantalla de alarmas debe ser paralela en todos los niveles de la HMI, para que su ingreso desde cualquier pantalla sea más rápido.

La navegación de los niveles de la HMI se los realiza de la siguiente manera:

- *Nivel 1:* La navegación es de tipo vertical descendente con dirección hacia el nivel 2.
- *Nivel 2:* Este nivel cuenta con una dirección de navegación de tipo vertical ascendente hacia el nivel 1 y descendente hacia el nivel 3.
- *Nivel 3:* Este nivel cuenta con una dirección de navegación horizontal entre las pantallas del mismo nivel y de tipo vertical ascendente hacia el nivel 2 y descendente hacia el nivel 4.
- *Nivel 4:* Este nivel cuenta con una dirección de navegación horizontal entre las pantallas del mismo nivel y de tipo vertical ascendente hacia el nivel 3.

Diseño Eléctrico

Cálculo del Calibre de los Cables

La NEC recomienda que para el cálculo del calibre del conductor eléctrico se debe considerar un factor de 1,25 (25%) del valor total de la corriente que circula por el conductor,

por lo tanto, se seccionará el cálculo del calibre de los cables para cada uno de los sistemas propuestos específicamente para la etapa de potencia, los calibres de los cables serán seleccionados acorde a la capacidad de amperaje mostrado en el Apéndice I.

Sistema de calefacción

El actuador es una resistencia eléctrica calefactora de 150 W por lo tanto,

$$I_{calefaccion} = 1,25 * I_{plenaCarga}$$

$$I_{calefaccion} = 1,25 * \frac{P_{resis}}{V_{resis}}$$

$$I_{calefaccion} = 1,25 * \frac{150 W}{127 V}$$

$$I_{calefaccion} = 1,48 A$$

El cable eléctrico seleccionado es de cobre con aislamiento TF de calibre 18.

Sistema de refrigeración

El actuador es una combinación de 4 celdas de Peltier con un consumo de 6 A cada una, por lo tanto,

$$I_{refrigeración} = 1,25 * 6 A$$

$$I_{refrigeración} = 7,5 A$$

El cable eléctrico seleccionado es de cobre con aislamiento TF de calibre 16.

Sistema de humidificación

El actuador es un humidificador de la marca Holmes el cual tiene con un consumo de 1 A cada una, por lo tanto,

$$I_{refrigeración} = 1,25 * 1 A$$

$$I_{refrigeración} = 1,5 A$$

El cable eléctrico seleccionado es de cobre con aislamiento TF de calibre 20 para aprovechar el cable.

Alimentación

Para la alimentación se consideró la utilización de una fuente conmutada de 5 A ha la cual estarán conectados el PLC LOGO! y los módulos respectivos, adicional a esto y como los requerimientos de corriente por parte de las celdas Peltier son mucho mayores se utilizará una fuente ATX la cual puede suministrar hasta un máximo de 28 A.

Diagrama Esquemático de Conexiones

El diagrama esquemático del proceso dispuesto en el espacio inferior de la cámara climática se muestra en el Apéndice J.

Diagrama de Borneras

El diagrama de borneras de las conexiones se muestra en el Apéndice K.

Capítulo V

IMPLEMENTACIÓN

Adecuaciones Físicas de la Cámara Climática

Debido al desgaste y roturas presentadas en la antigua cabina de la cámara climática mostrado en la Figura 48, se decidió readecuar una nueva cabina hecha de acero inoxidable brillante 204 con las dimensiones presentadas en el Apéndice D, además de esto, se realizó una readecuación de la estructura externa de la cámara climática con fines de movilidad para trabajos de calibración en campo, por lo tanto, la nueva estructura está hecha de Tool con las dimensiones mostradas en el Apéndice D y mostrada en la Figura 49.

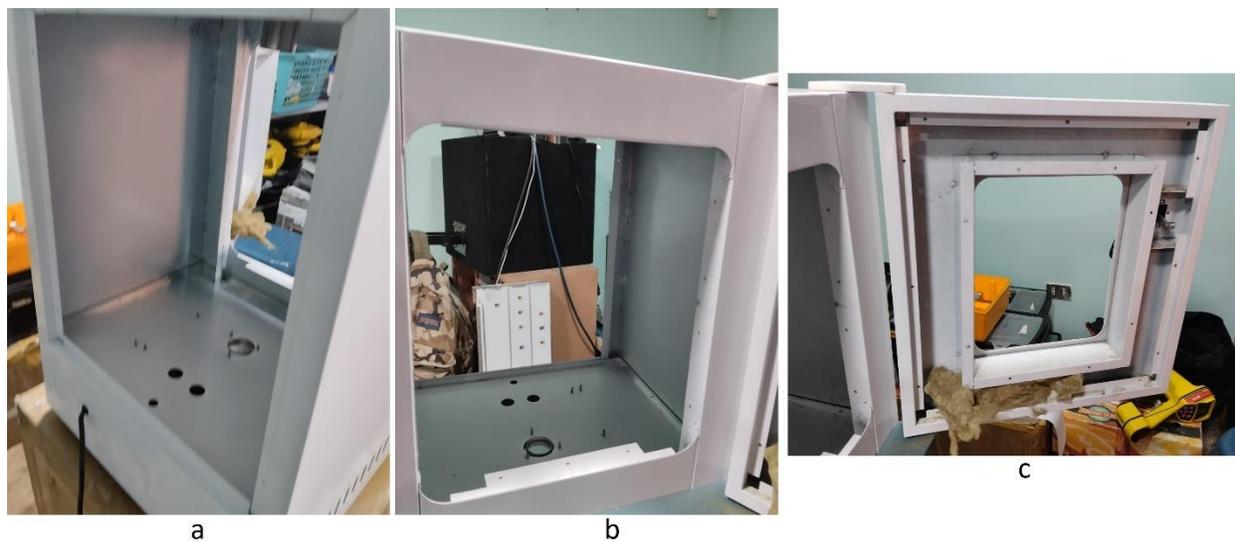
Figura 48

Interior antiguo de la cámara climática



Figura 49

Estructura externa diseñada y hecha de Tool



Nota. Vistas: a. Parte trasera, b. Parte frontal, c. Parte interna de la puerta.

Con las estructuras listas, se procedió a rellenar con lana de vidrio una capa de 5 cm a cada lado de la cabina y en la puerta (espesor de la puerta de 5 cm) como lo muestra la Figura 50.

Figura 50

Cubierta de lana de vidrio como aislante térmico



Se colocó un empaque de caucho especial para autoclaves en el contorno de la cabina para sellar el espacio, como lo muestra la Figura 51.

Figura 51

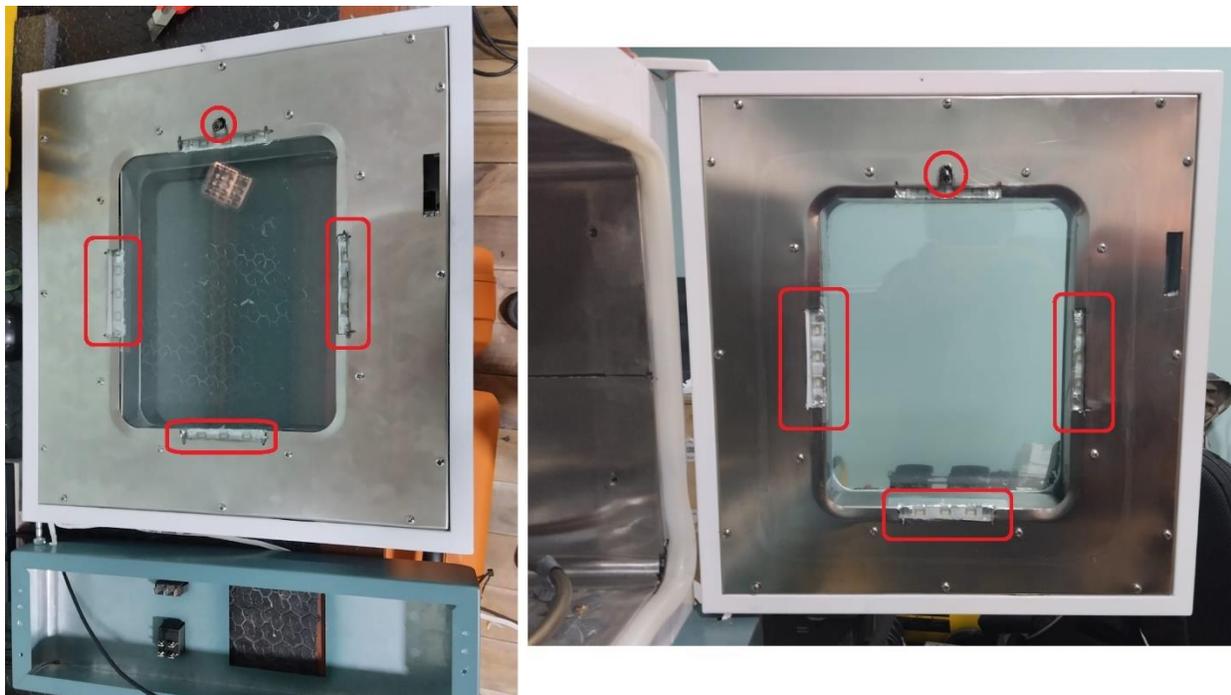
Fijación de caucho en el contorno de la cabina



Con respecto a la puerta, se debía colocar las luces LED para alumbrar el interior de la cabina, a partir de la experiencia se sabe que la luz de cualquier tipo influye sobremanera en la uniformidad de la temperatura interna de la cabina al estar expuesta directamente al volumen útil, por tal motivo uno de los criterios bajo los cuales se diseñó la puerta es que la ventana sea de doble vidrio con una separación de 6 mm para que en la separación de aire estén colocadas las luces LED impidiendo una incidencia directa de la luz en el volumen interno generado por la cámara climática, además de esto, se estableció un requerimiento extra al momento de la implementación, y es que debe tener una cámara USB para tener la opción de grabar los valores de los instrumentos en el proceso de calibración, una vez finalizadas las adecuaciones la puerta quedó modificada y colocada como lo muestra la Figura 52.

Figura 52

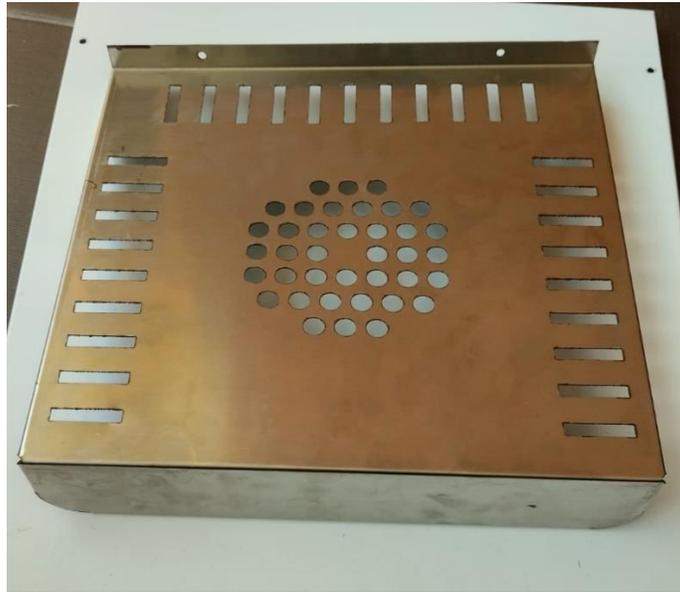
Puerta con las adecuaciones de cámara USB, luces LED y relleno de lana de vidrio como material aislante



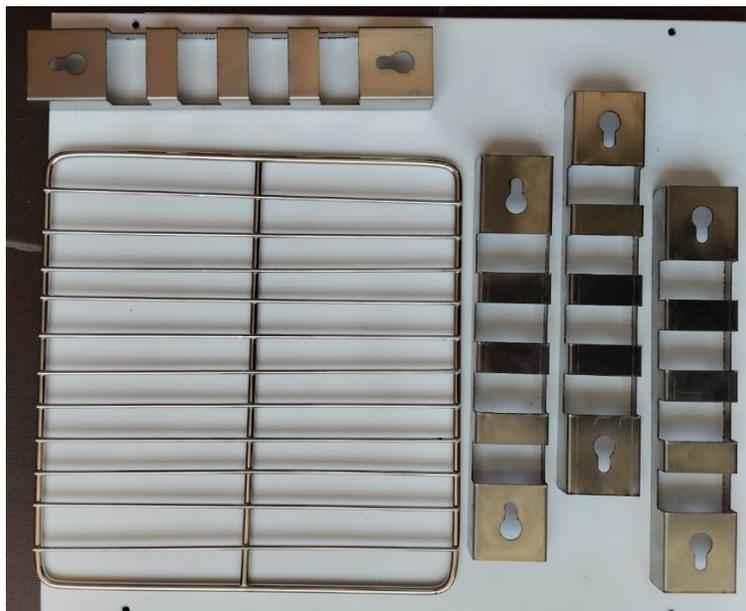
Con respecto a la cabina se dispuso de un espacio de 5 cm a partir de la base para que sea colocado la resistencia eléctrica de calefacción, para que esta resistencia no esté en contacto directo con los instrumentos se dispuso de una base superficial desmontable en la cual se tiene aberturas para la entrada de calor, rectangulares para las partes laterales y circular para la parte central coincidente con el ventilador, como lo muestra la Figura 53. Además de esto se diseñaron los soportes laterales multinivel y la rejilla para poder colocar los instrumentos en el interior, como lo muestra la Figura 54.

Figura 53

Base superficial desmontable en el interior de la cabina

**Figura 54**

Soportes laterales y rejilla para colocar los instrumentos dentro de la cabina

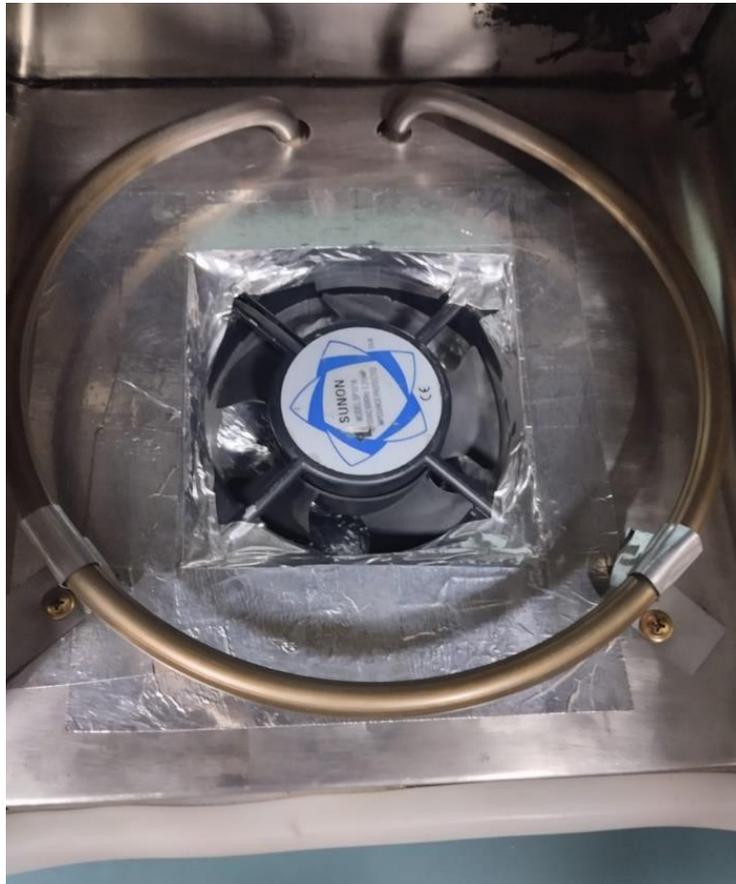


Sistema de Calefacción

Para el sistema de calefacción se colocaron el ventilador y la resistencia en las posiciones acordes a los planos como lo muestra la Figura 55.

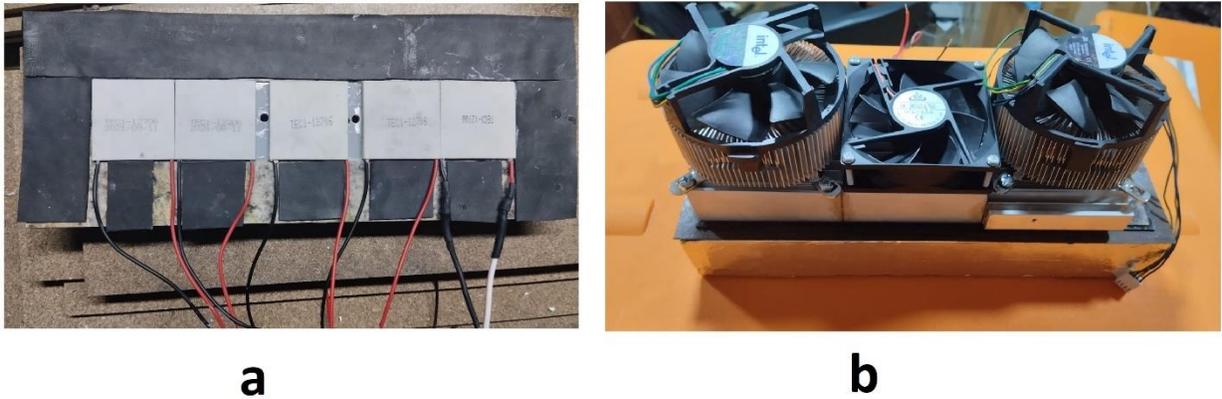
Figura 55

Ventilador y resistencia eléctrica de calefacción colocados en la base de la cabina

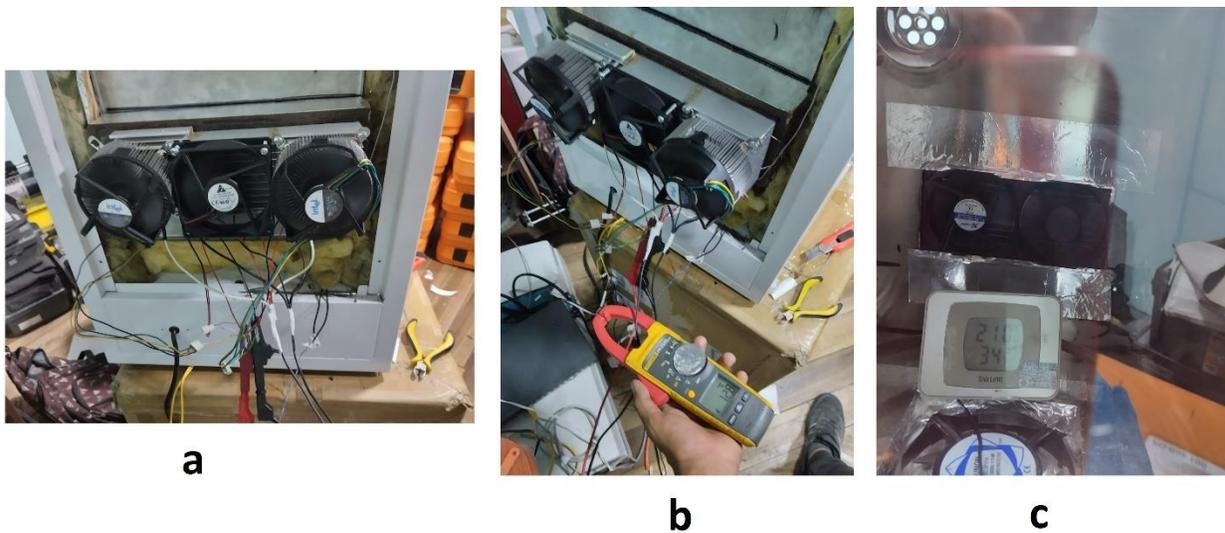


Sistema de Refrigeración

Para el sistema de refrigeración se realizó una abertura en la parte posterior de la cabina para adaptar un soporte para el módulo de celdas Peltier y los disipadores, como lo muestra la Figura 56, mientras que la figura 57 muestra el módulo adaptado a la cabina interna de la cámara climática.

Figura 56*Módulo de celdas Peltier*

Nota. a) Disposición horizontal de las celdas de Peltier. b) Ventiladores adaptados a los disipadores de calor dispuestos en la parte trasera del módulo.

Figura 57*Módulo de celdas Peltier adaptado a la cabina*

Nota. a) Vista posterior del módulo de celdas Peltier adaptado a la cabina. b) Medición de corriente DC de alimentación de las celdas Peltier. c) Vista frontal del módulo de refrigeración insertado en la cabina, vista de los ventiladores de ingreso de aire frío.

Sistema de Humidificación

Para el sistema de humidificación se consideró modificar la idea inicial para el ingreso de vapor de agua, en una primera instancia se consideró solamente el ingreso de vapor por una serie de agujeros conectados a una tubería en la parte superior izquierda de la pared posterior de la cabina, pero después de unas pruebas preliminares se observó que el flujo de ingreso no era el adecuado por lo que se consideró adaptar un sumidero el cual incluye una tubería que encajaba perfectamente con la boquilla del humidificador, como lo muestran las Figuras 58 y 59.

Figura 58

Adaptación de sumidero como ingreso de vapor (humedad)



Nota. A la izquierda la parte frontal y a la derecha la parte posterior.

Figura 59*Humidificador***Sistema de Control*****Ensayos de Identificación de la Planta***

El modelamiento matemático del comportamiento de la cámara climática se obtuvo a partir de dos señales principales de control: el voltaje AC del ventilador y el voltaje AC de la resistencia calefactora (modificando indirectamente la potencia). Este estudio fue basado en la metodología propuesta por (Segado, Ibarrola-Lacalle, Giménez-Gallego, & Torres-Sánchez, 2021) en la cual se indica que para facilitar el estudio se puede mantener constante el valor del voltaje AC aplicado al ventilador (estableciéndose como un valor de mezcla adecuada de aire) y únicamente se puede manipular el voltaje AC aplicado a la resistencia eléctrica calefactora para determinar el comportamiento dinámico del proceso, que debido a su naturaleza térmica se asemejará a un sistema de primer orden:

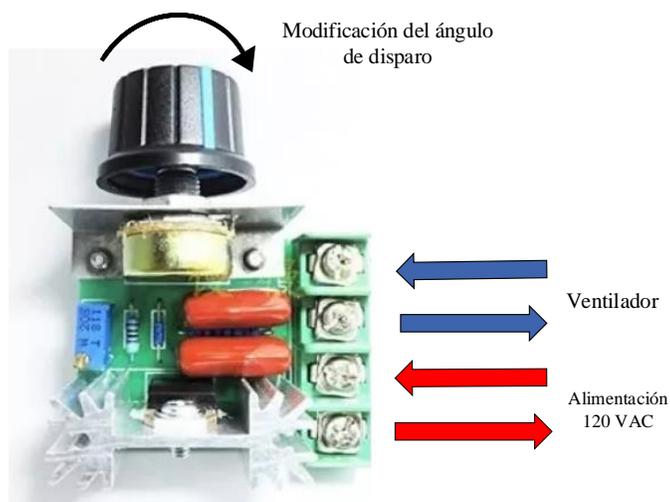
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{1 + \tau s}$$

Para las pruebas de identificación se utilizó una entrada de tipo escalón a la variable manipulada, pero para la obtención de los datos se realizaron pruebas preliminares mediante la

modificación del voltaje AC aplicado al ventilador para establecer una velocidad en la cual el aire interno pueda ser mezclado adecuadamente, es decir, para que se produzca un flujo lo más laminar posible que no genere grandes alteraciones térmicas, para esto se utilizó un módulo dimmer de modificación de fase mediante SCR como lo muestra la Figura 60.

Figura 60

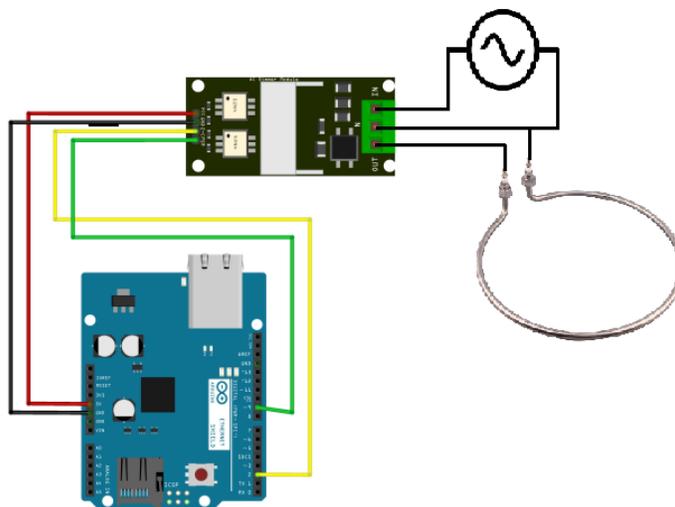
Esquema de módulo dimmer para el establecimiento de velocidad de mezcla del ventilador



Mediante la modificación del ángulo de disparo se estableció que el rango de voltaje AC de funcionamiento del ventilador era de $V_{min} = 93,2 \text{ VAC}$ con lo cual las aspas del ventilador tenían una velocidad de giro lenta, y un valor de $V_{máx} = 122,3 \text{ VAC}$ con lo cual se obtenía la velocidad máxima de giro del ventilador. De las pruebas realizadas se estableció como voltaje óptimo para producir una velocidad adecuada de mezcla un valor de $V_{mezcla} = 98,9 \text{ VAC}$, con este valor fijado se realizaron diferentes pruebas aplicando un voltaje AC distinto a la resistencia calefactora. Para establecer las capacidades en porcentaje de la resistencia calefactora se utilizó un módulo dimmer con cruce por cero controlado por una señal PWM con la ayuda de un Arduino UNO con el esquema de conexión mostrado en la Figura 61.

Figura 61

Esquema de módulo dimmer para control de voltaje AC en la resistencia eléctrica calefactora



Se establecieron como valores de prueba de escalón a los correspondientes al 30%, 50% y 70% de la capacidad de la resistencia calefactora, ya que con la potencia máxima se alcanzaban fácilmente temperaturas mayores a 160 °C que están fuera del alcance planteado.

Para la recopilación de datos la empresa autorizó el uso de los dataloggers que se utilizan para los procesos de calibración, estos instrumentos al estar calibrados y certificados ofrecen mayor confiabilidad de los datos presentados, particularmente se utilizaron los registradores de datos de cuatro canales modelo PT-104 de la marca Pico Technology, estos registradores poseen alta resolución (0,001 °C) y precisión (0,015 °C), funcionan con sensores PT100 y PT1000, admiten sensores de 2,3 y 4 hilos, no requieren una fuente de alimentación, poseen interfaces USB y Ethernet y pueden ejecutarse varias unidades en una sola computadora, los sensores utilizados son PT100 de 4 hilos.

Recopilación de datos

Como primer paso se establecen las posiciones de los sensores dentro de la cabina, estas posiciones están consideradas para observar la estabilidad y uniformidad de la

temperatura de los 8 espacios internos en los cuales se puede dividir a la cabina (esquinas), estas posiciones de los sensores se muestran en las Figuras 62 y 63.

Figura 62

Posición de los sensores para adquisición de datos preliminares

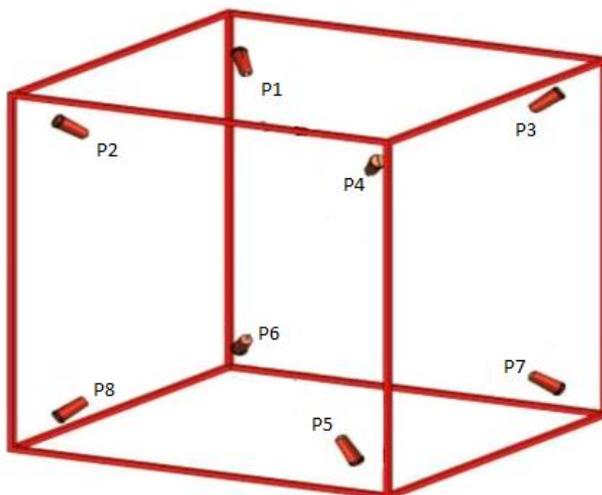
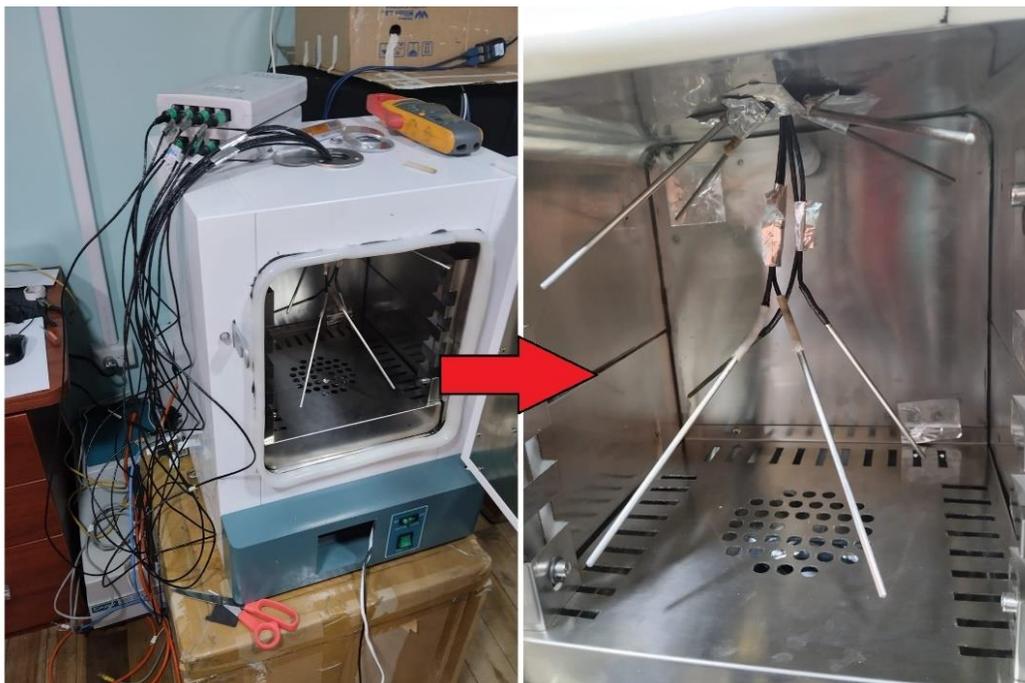


Figura 63

Ubicación de los sensores para pruebas preliminares de estabilidad y uniformidad

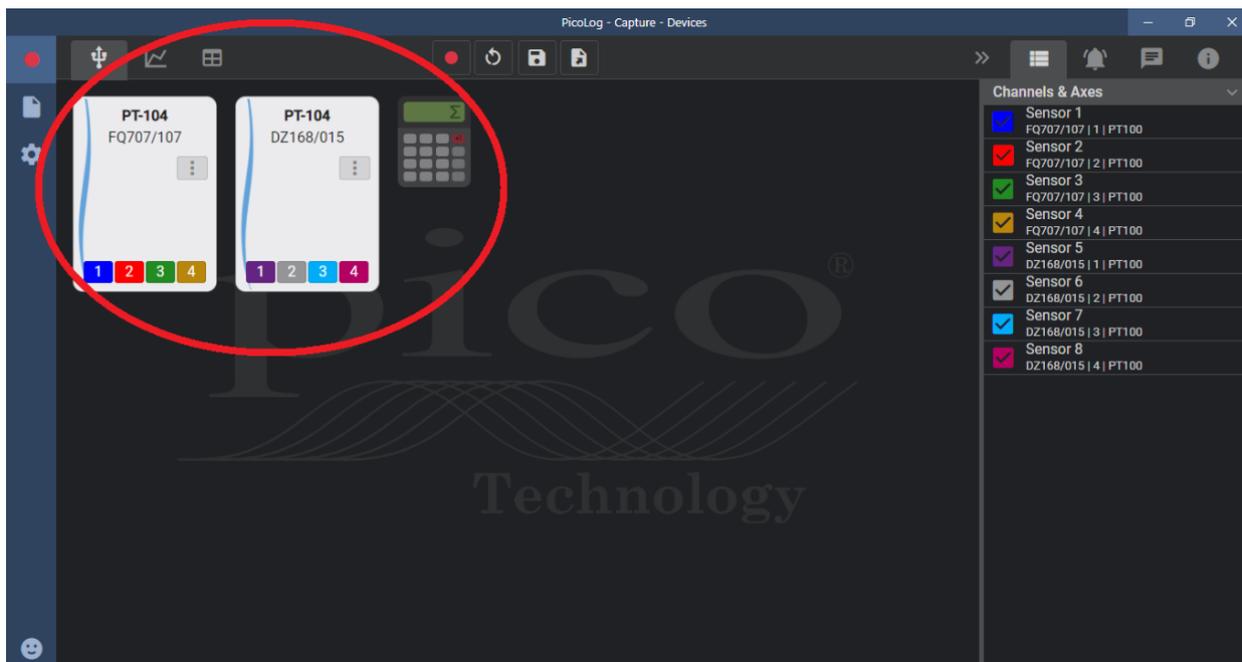


Una vez posicionados los sensores se configuran los dataloggers en el software PicoLog que es proporcionado por el fabricante en su página oficial, como se detalla a continuación:

- Se conectan los dos dataloggers y automáticamente el programa los detecta:

Figura 64

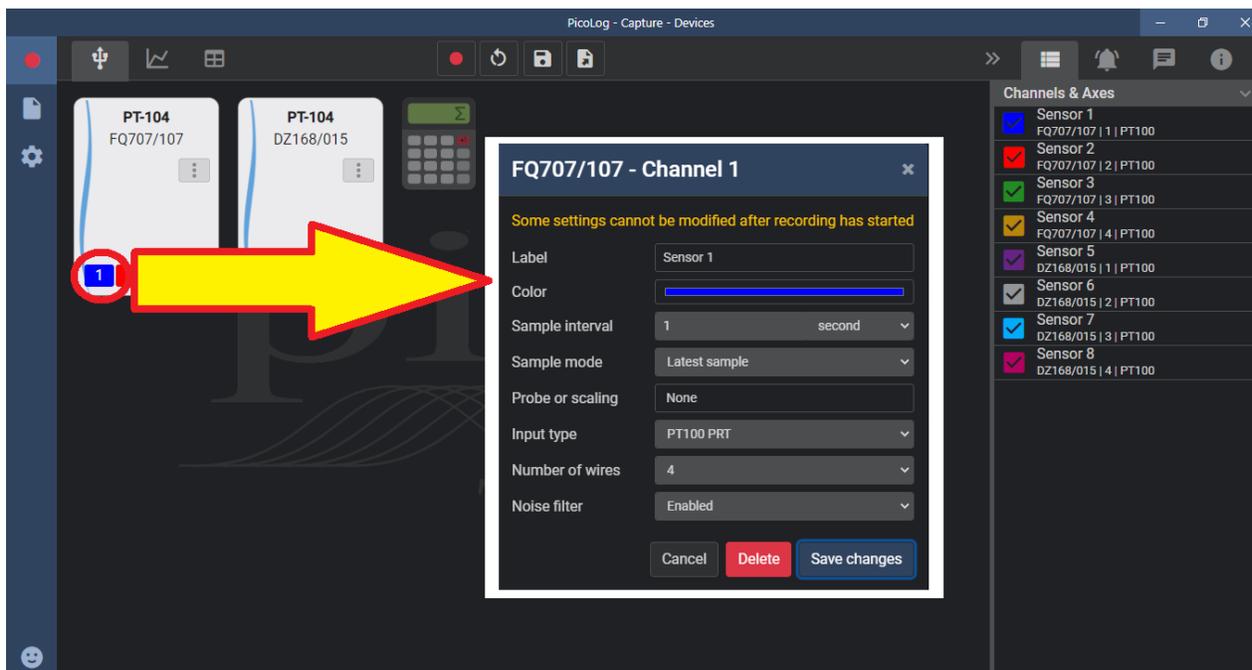
Detección de los dataloggers PT-104



- En cada sensor se configura los siguientes parámetros:

Figura 65

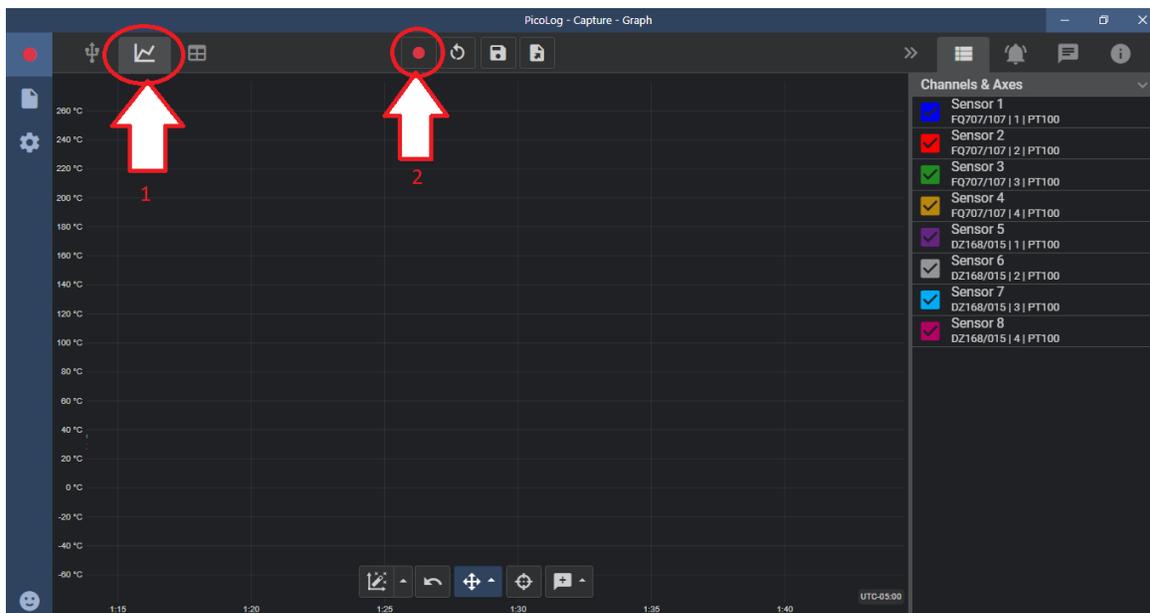
Configuración de sensores



- En el menú de navegación se cambia a la pantalla de “Gráfica” y en las opciones de procesamiento de datos se selecciona “Grabar datos”

Figura 66

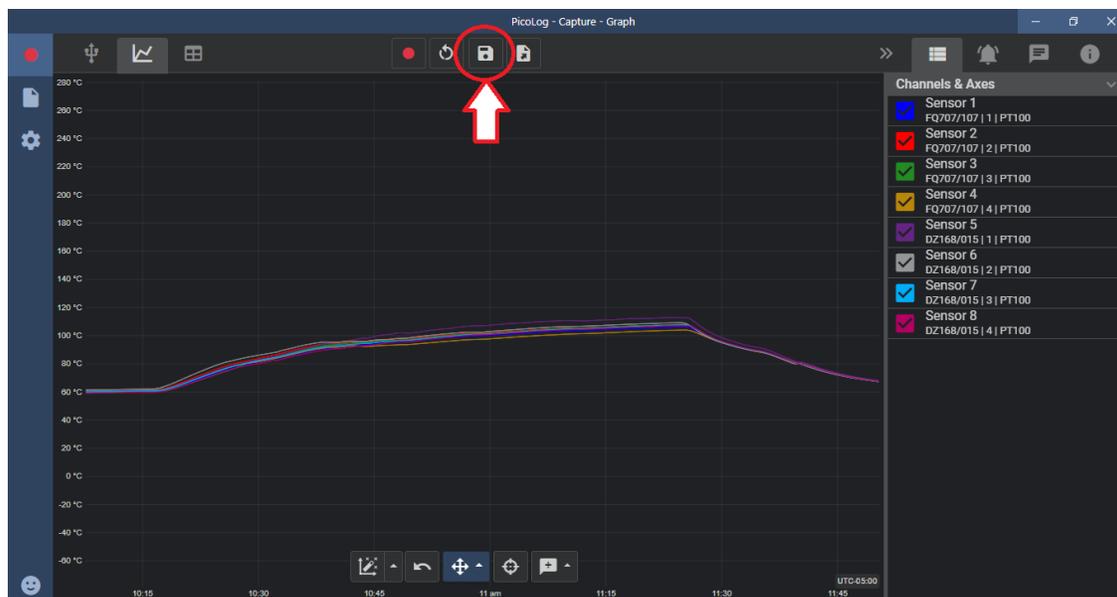
Selección de pantalla para visualización gráfica de los datos y grabación



- Una vez finalizado el registro de los datos, se selecciona la opción de guardar (extensión: .picolog).

Figura 67

Registro de los datos para análisis posteriores

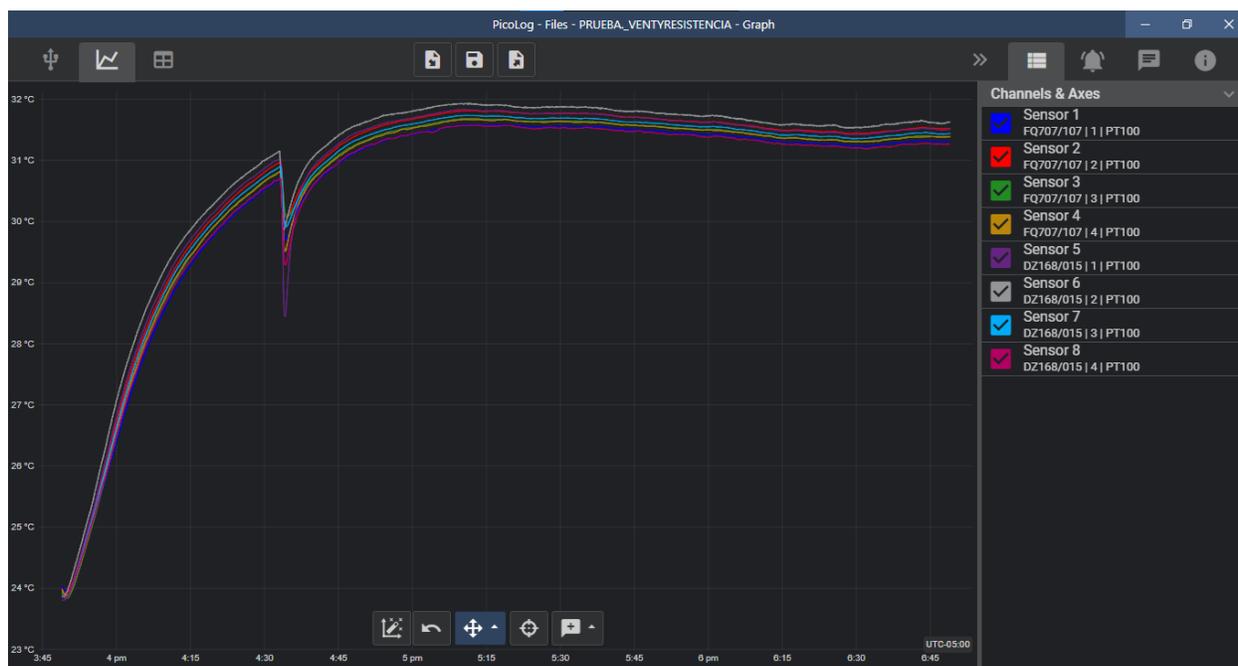


Prueba Preliminar 1

Para la primera prueba se consideraron los siguientes valores: $V_{Ventilador} = 98,9 \text{ VAC}$ y $V_{Resistencia} = 28,2 \text{ VAC}$ que corresponde una capacidad del 30 % con una duración de 3 horas en la cual la cámara no presentó ningún problema de funcionamiento por un tiempo prolongado, de esta resultaron un total de 10.808 datos recopilados en cada segundo, la Figura 68 muestra la gráfica resultante en el PicoLog donde se puede apreciar una reducción de la temperatura alrededor de los 50 minutos de comenzada la prueba, esto se debe a que la cámara fue abierta por accidente por unos 5 minutos, sin embargo, la cámara siguió su proceso de calentamiento hasta alcanzar la estabilidad a la hora y media de comenzada la prueba.

Figura 68

Gráfica obtenida de la primera prueba realizada a la cámara climática



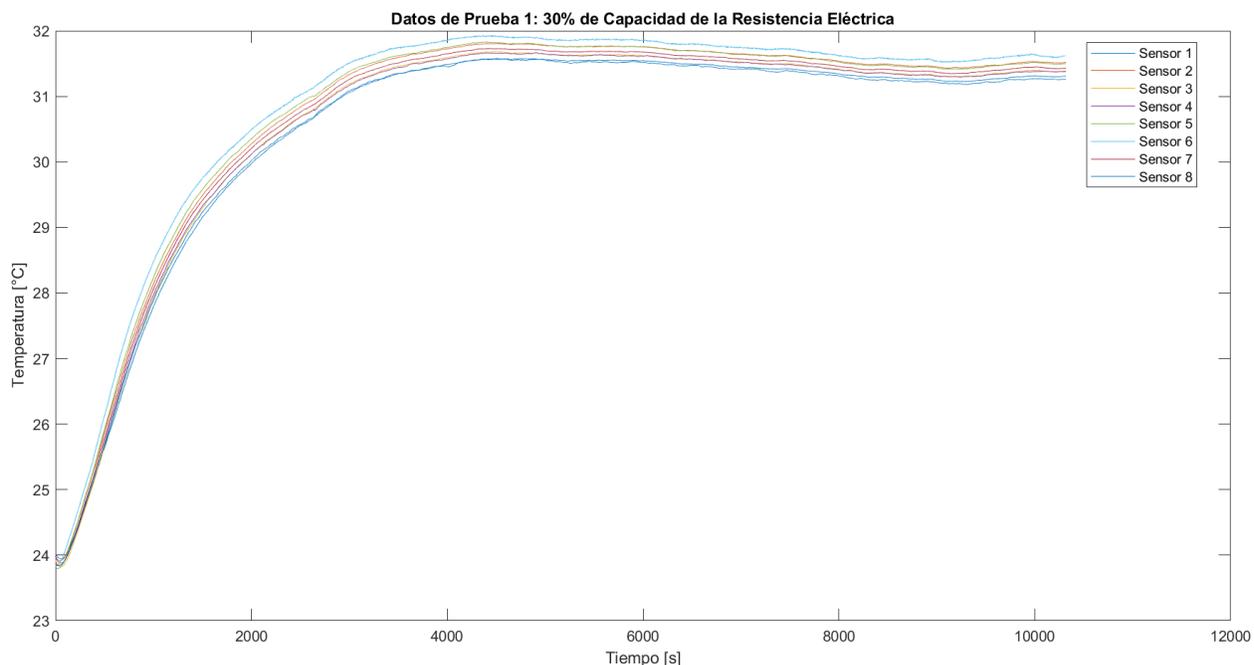
Nota. Ventilador con velocidad de mezcla y resistencia eléctrica a un 30 % de su capacidad máxima.

El Software PicoLog permite una visualización completa de los datos mediante sus herramientas, sin embargo, para el procesamiento de los datos es necesario la exportación de

los datos en un archivo con formato CSV para poder ser interpretados en MatLab, como se muestra en la Figura 69.

Figura 69

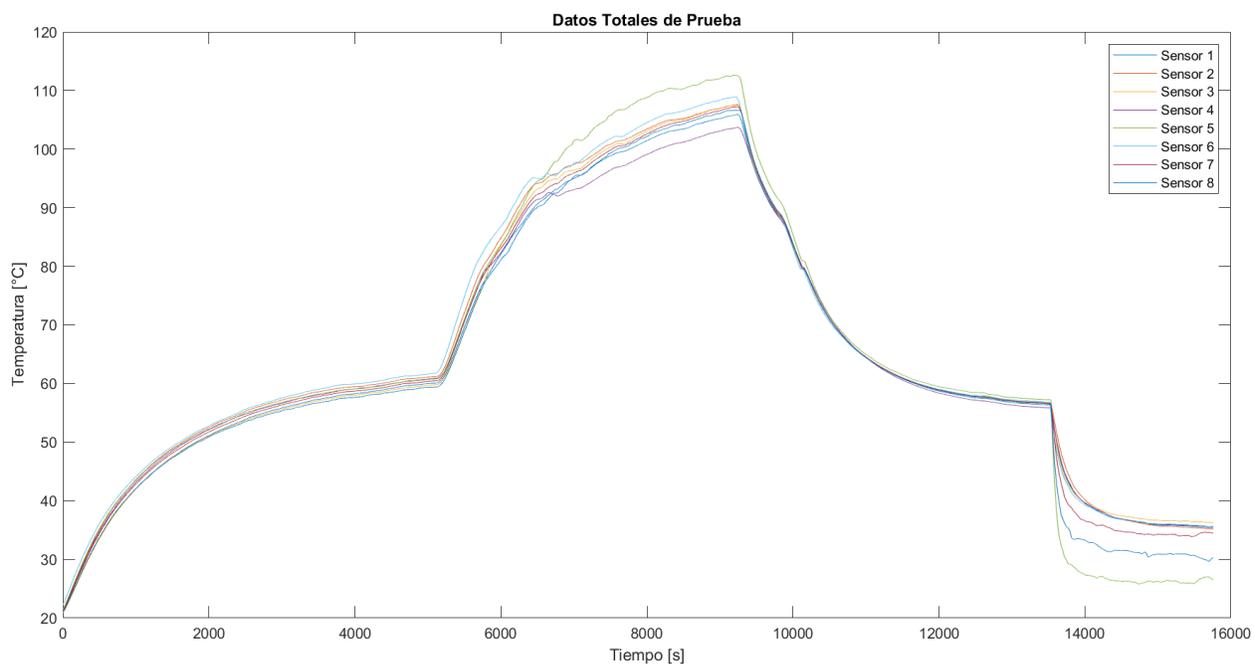
Datos obtenidos de la primera prueba



Al siguiente día se realizó una prueba completa del comportamiento de la cámara ante varios valores de establecimiento del ventilador y de la resistencia eléctrica en todo el día, obteniéndose los datos mostrados en la Figura 70, sin embargo, para una mejor visualización se hace una selección de los los datos obtenidos para cada valor seteado de resistencia eléctrica.

Figura 70

Datos obtenidos el segundo día de pruebas

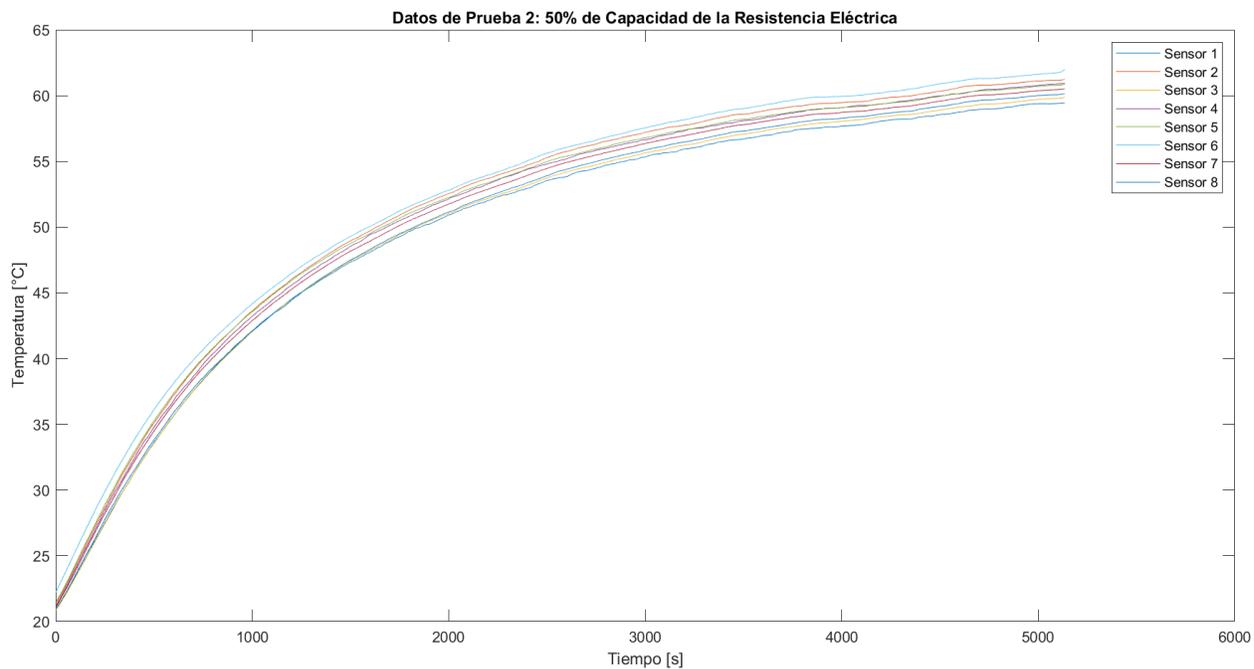


Prueba Preliminar 2

Para la segunda prueba se consideraron los siguientes valores: $V_{Ventilador} = 98,9 \text{ VAC}$, $V_{Resistencia} = 47,5 \text{ VAC}$ y $I_{Resistencia} = 1 \text{ A}$ que corresponde una capacidad del 50 % con una duración de 1 hora con 30 minutos, y como resultado se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 71.

Figura 71

Datos obtenidos de la segunda prueba preliminar

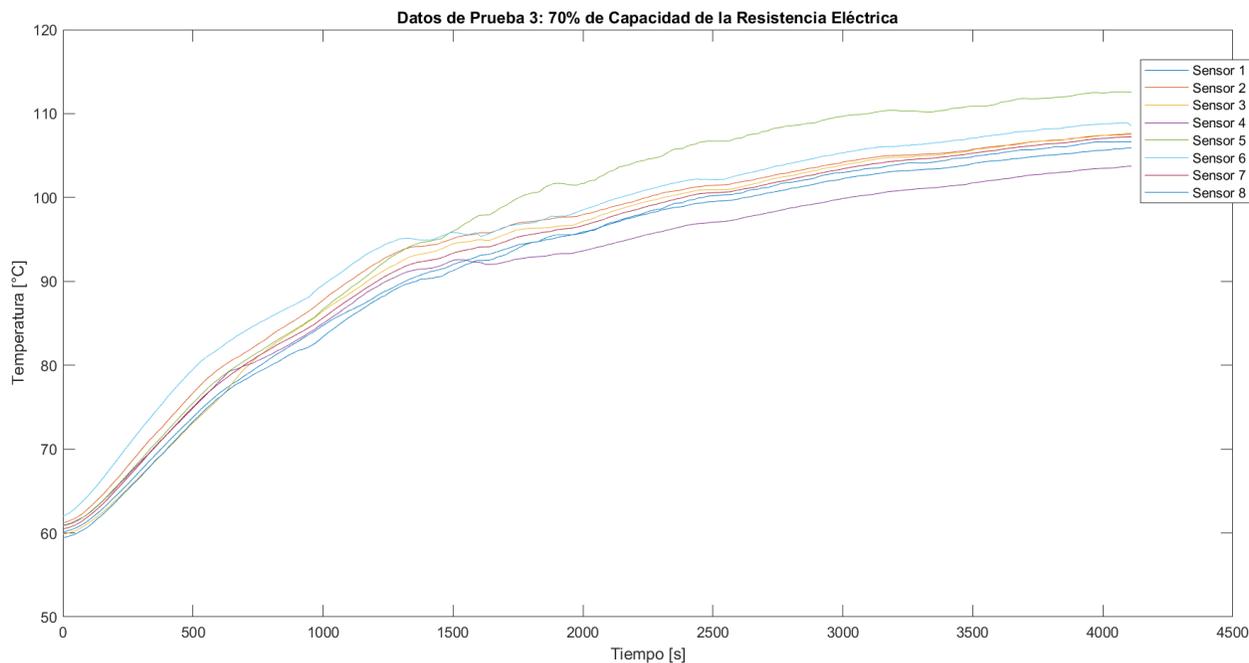


Prueba Preliminar 3

Para la segunda prueba se consideraron los siguientes valores: $V_{Ventilador} = 98,9 \text{ VAC}$, $V_{Resistencia} = 94,2 \text{ VAC}$ y $I_{Resistencia} = 1,7 \text{ A}$ que corresponde una capacidad del 70 % con una duración de 1 hora con 30 minutos, y como resultado se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 72.

Figura 72

Datos obtenidos de la tercera prueba preliminar

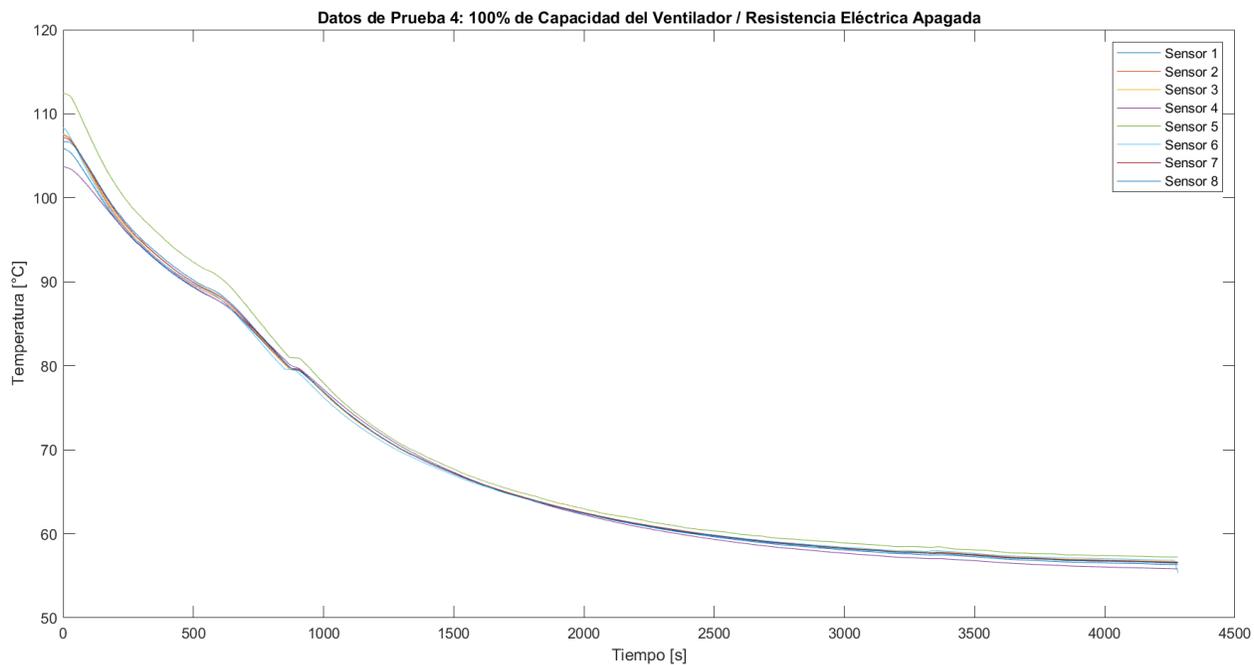


Prueba Preliminar 4

Para la cuarta prueba se decidió verificar el comportamiento de la temperatura en el interior de la cámara solamente con la influencia del ventilador, para ello se aumentó la potencia del ventilador a la máxima capacidad y se desenergiza la resistencia eléctrica, por lo tanto: $V_{Ventilador} = 122,2 \text{ VAC}$, $V_{Resistencia} = 0 \text{ VAC}$ y $I_{Resistencia} = 0 \text{ A}$ que corresponde una capacidad del 0 % con una duración de 30 minutos, y como resultado se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 73 donde se observa que por sí solo el ventilador es un aporte importante para el proceso de enfriamiento de la cámara climática.

Figura 73

Datos obtenidos de la cuarta prueba preliminar

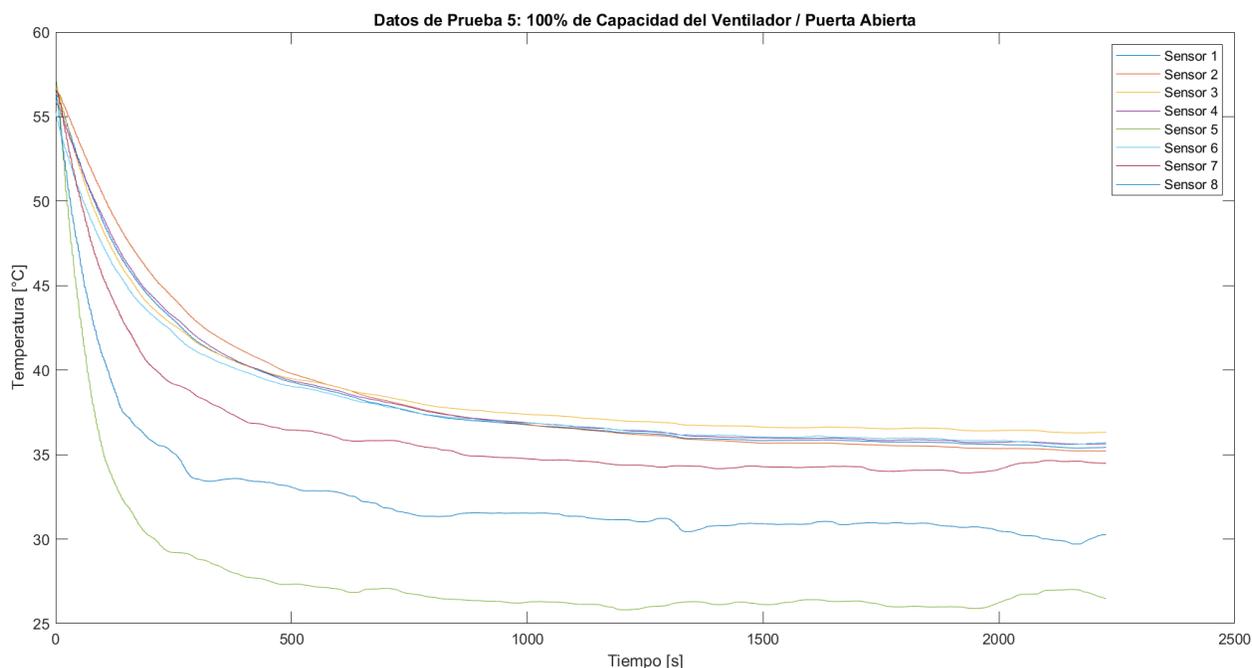


Prueba Preliminar 5

Finalmente se comprobó cómo se comporta la temperatura en la cámara al abrir la puerta en un ciclo de refrigeración únicamente con el ventilador funcionando, por lo tanto, se abrió la compuerta por 30 minutos, y como resultado se obtiene la gráfica mostrada en la Figura 74.

Figura 74

Datos obtenidos de la quinta prueba preliminar



En la Figura 74 se muestra datos bastante desviados que pertenecen a los sensores 5, 6 y 7 que representan una reducción de temperatura mucho más brusca, esto es de esperarse debido a que la puerta está abierta por lo que la temperatura trata de compensarse con la ambiental, sin embargo, el sensor 8 muestra valores acordes a los de más adentro de la cámara esto se debe a que debido a las pruebas las cintas adhesivas perdieron fijación y el sensor 8 se movió hasta las al centro de cabina.

Función de transferencia

Finalmente, para obtener la función de transferencia a partir de los datos experimentales obtenidos se utiliza la herramienta "Ident / System Identification" de MatLab la cual permite modelar sistemas dinámicos, para esto primero se exportan los datos de la temperatura obtenidos experimentalmente el segundo día de pruebas en el que se generen cambios de la potencia entregada a la resistencia eléctrica con el propósito de obtener la respuesta del proceso al escalón como se muestra en la Figura 76, después se selecciona

solamente el rango en donde ocurre la respuesta al escalón en el menú desplegable de preprocesamiento como se muestra en la Figura 77, estos datos serán los que utilice la herramienta para realizar la estimación y la validación del modelo, finalmente se obtiene el modelo del proceso mediante la configuración mostrada en la Figura 78.

Figura 75

Herramienta de identificación de sistemas Ident

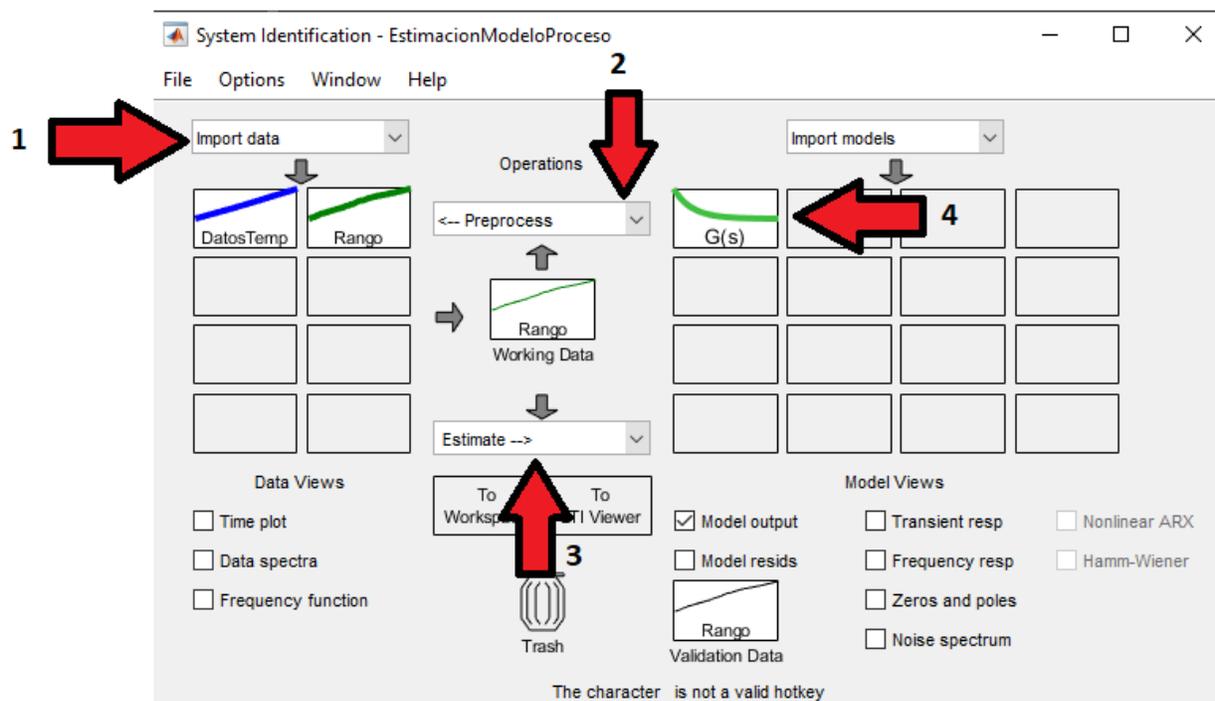


Figura 76

Exportación de los datos experimentales

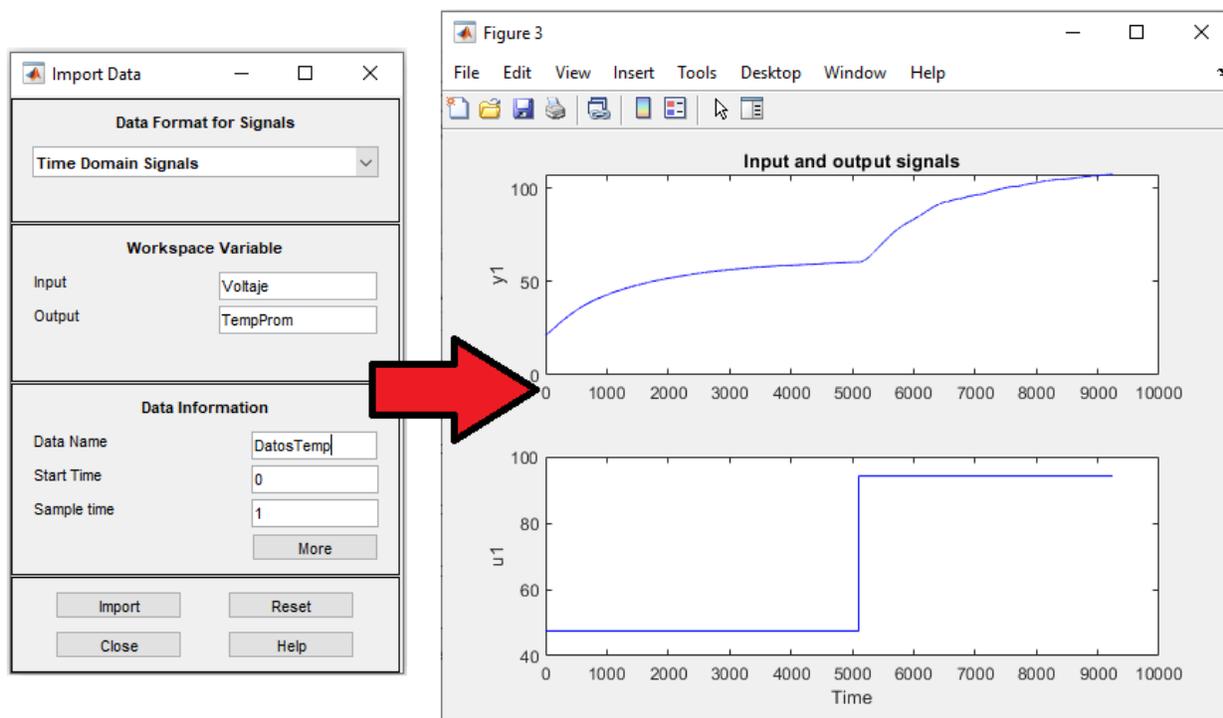


Figura 77

Selección de rango para estimar el modelo del proceso

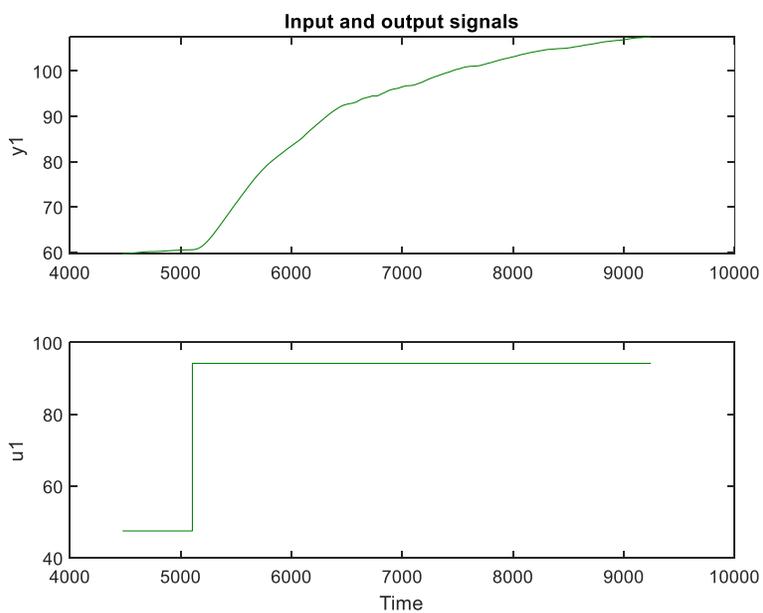


Figura 78

Selección del modelo de proceso a estimar

The screenshot shows the 'Process Models' window with the following settings:

- Transfer Function:** A first-order model is selected, represented by the equation
$$K \frac{1}{(1 + T_p1 s)}$$
- Poles:** Set to 'All real'.
- Disturbance Model:** Set to 'None'.
- Focus:** Set to 'Simulation'.
- Initial condition:** Set to 'Auto'.
- Covariance:** Set to 'Estimate'.
- Initial Guess:** 'Auto-selected' is chosen.
- Parameters Table:**

Par	Known	Value	Initial Guess	Bounds
K	<input type="checkbox"/>		Auto	[-Inf Inf]
Tp1	<input type="checkbox"/>		Auto	[0 Inf]
Tp2	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tp3	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 Inf]
Tz	<input type="checkbox"/>	0	0	[-Inf Inf]
Td	<input type="checkbox"/>	0	0	[0 30]
- Name:** G(s)

Figura 79

Comparación de la función de transferencia estimada con el proceso real

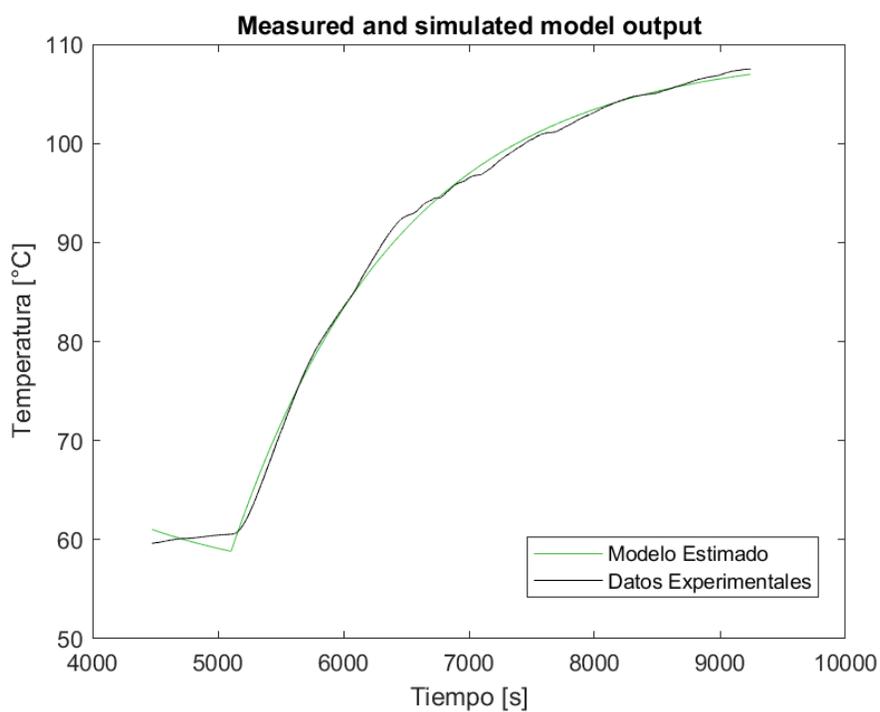
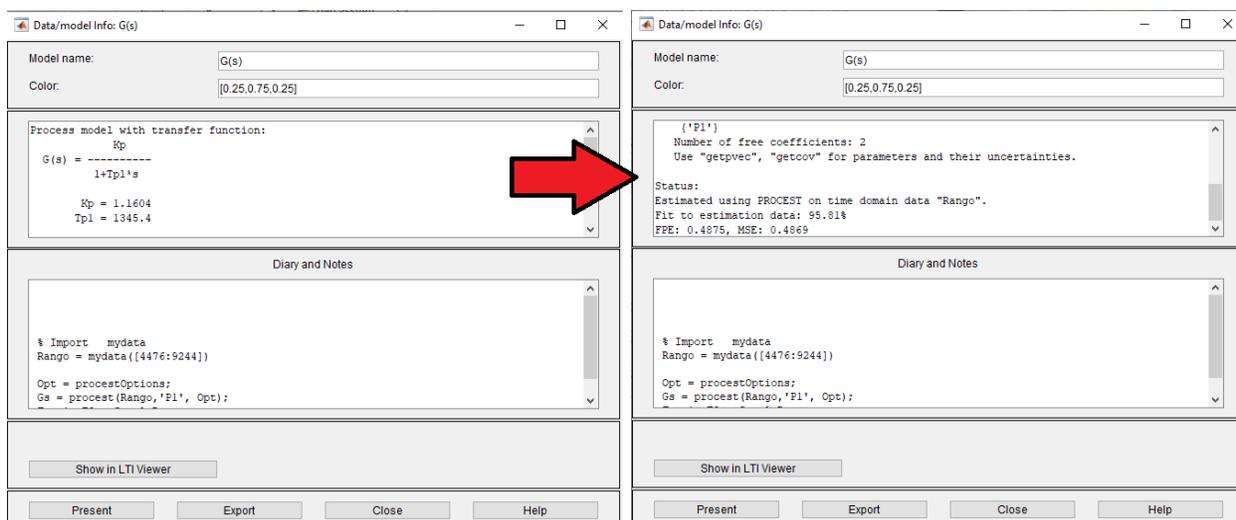


Figura 80*Resultados de la estimación del proceso*

Como se observa en la Figura 80 la función de transferencia estimada es de primer orden y tiene un porcentaje de coincidencia del 95,81% de exactitud, por lo tanto, reemplazando los valores resulta la función de transferencia de la cámara climática:

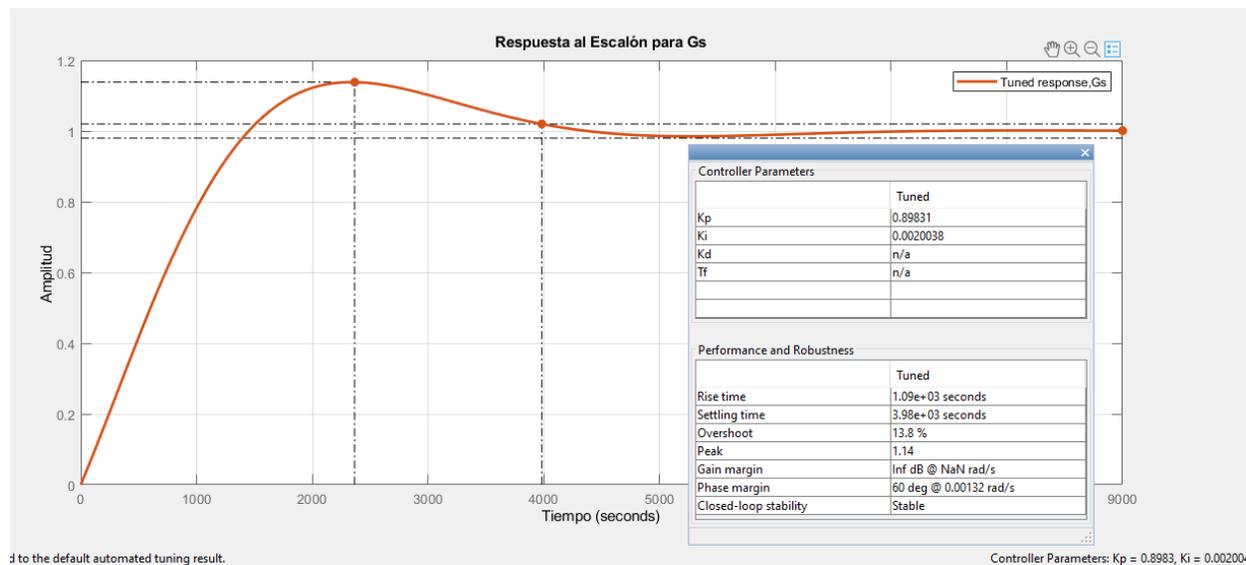
$$G(s) = \frac{1,1604}{1 + 1345,4s}$$

Diseño del Controlador

Existen muchos métodos para diseñar un controlador, uno de los principales aspectos a tomar en cuenta es que el controlador debe funcionar a lazo cerrado, es decir, que se tiene un error en estado estacionario de cero, lo que implicaría un polo en el origen del diagrama complejo. Sin embargo, para simplificar el proceso se utilizará la herramienta “PIDTuner” de MatLab, como lo muestra la Figura 81:

Figura 81

Obtención de los valores de las constantes K_p y K_i del controlador PI diseñado mediante el PIDTuner



Los valores obtenidos de la herramienta son: $K_p = 0,8983$ y $K_i = 0,002$ con lo que se obtiene un controlador PI con la siguiente fórmula:

$$m(t) = K_p * e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) d(t)$$

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}$$

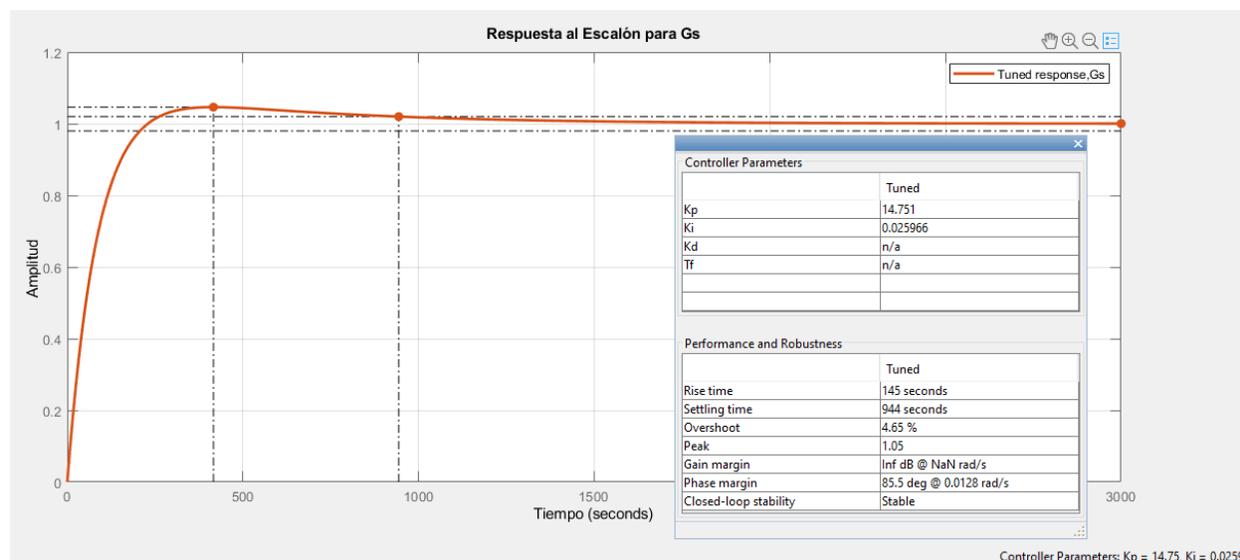
$$G_C(s) = 0,898 + \frac{0,002}{s}$$

Sintonización

Para la sintonización del controlador diseñado se modifican los valores en la sección de las herramientas de sintonización, donde tomando en cuenta el objetivo de hacer que la cámara climática estabilice la temperatura generada lo más rápido posible (para reducir el tiempo del proceso de calibración en general) y que el sobre impulso no supere el 5% se consiguieron los resultados mostrados en la Figura 82.

Figura 82

Sintonización del controlador diseñado en la herramienta PIDTuner



Los valores obtenidos son: $K_p = 14,75$ y $K_i = 0,026$ con los cuales se realizaron pruebas preliminares para comprobar el comportamiento ideal de la sintonización del controlador, estos datos serán ingresados en el bloque de controlador PI que dispone el LOGO!, donde la configuración es la mostrada en la Figura 84. Con respecto al control del sistema de refrigeración (celdas de Peltier) y del sistema de humidificación (humidificador) se consideró un tipo de control ON/OFF debido a que para el primer caso, se consigue un rendimiento óptimo de las celdas Peltier al proporcionarles un suministro de energía completo (12 VDC y 6 A), mientras que para el segundo caso, el humidificador es un equipo hermético de muy alta calidad y la cantidad de humedad dispuesta en el interior de la cabina se puede modificar con el ventilador principal, por lo que es con dicho tipo de control es suficiente.

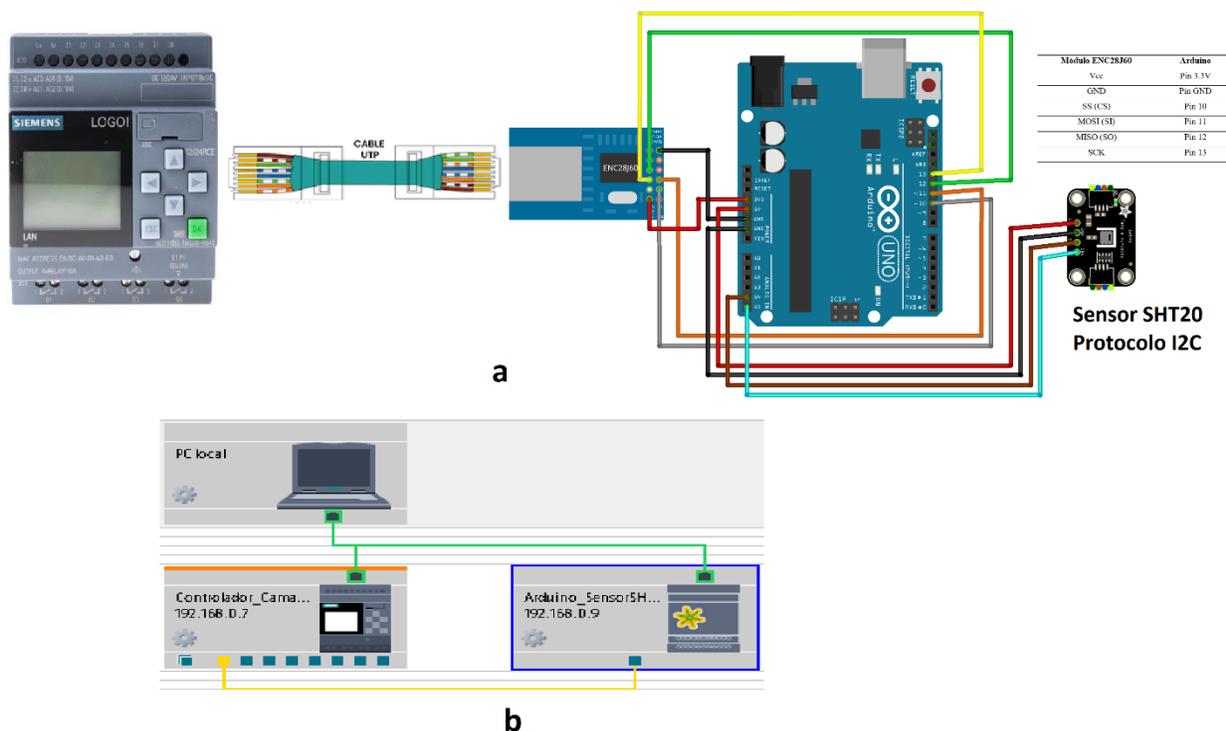
Programación del LOGO!

Debido a las limitaciones del controlador y a un acuerdo de confidencialidad con la empresa, en este apartado solamente se mostrarán las configuraciones de la etapa de sensado y el diseño de la interfaz gráfica. Con respecto a la etapa de sensado, como ya se mencionó en

el capítulo de diseño, el sensor SHT20 tiene un protocolo de comunicación I2C y el MiniPLC LOGO! no cuenta con un módulo específico para esta comunicación, por lo tanto, se utilizó un Arduino para enviar los datos del sensor al MiniPLC mediante protocolo Modbus TCP/IP utilizando una función de entrada analógica de red, el esquema de conexión se muestra en la Figura 83 donde se utilizó el módulo de red ENC28J60 y en la programación las bibliotecas: “Ethercard.h”, “Modbus.h”, “ModbusIP_ENC28J60.h”, “Wire.h” y “DFRobot_SHT20.h”, mientras que para el envío de los datos se utilizan la función “Ireg” la cual utiliza como atributos una dirección (50 para temperatura y 60 para humedad) y el valor leído de temperatura y humedad.

Figura 83

Esquema de conexión para envío de datos de temperatura y humedad mediante protocolo Modbus



Nota. a) Diagrama esquemático de conexión de módulo ENC28J60 y el sensor SHT20 al Arduino UNO mediante protocolo I2C. b) Diagrama esquemático de red formado por MiniPLC LOGO! y Arduino UNO mediante protocolo Modbus TCP/IP.

En el MiniPLC se configura la entrada analógica de red como lo muestra la Figura 84 y ese valor se envía al bloque del controlador PI como “Process Variable” como lo muestra la Figura 85 el cual, según la configuración del mismo, es el valor real del sensor el cual se obtiene multiplicando el valor obtenido del sensor por la ganancia establecida en el escalado y ese es el valor con el cual realiza el control, cabe resaltar que el software de programación para estos modelos de MiniPLC es el LOGO!Soft Comfort en donde la versión que particularmente se utilizó para el presente trabajo es la v8.3.

Figura 84

Configuración del bloque de entrada analógica de red para lectura de valor de temperatura y humedad

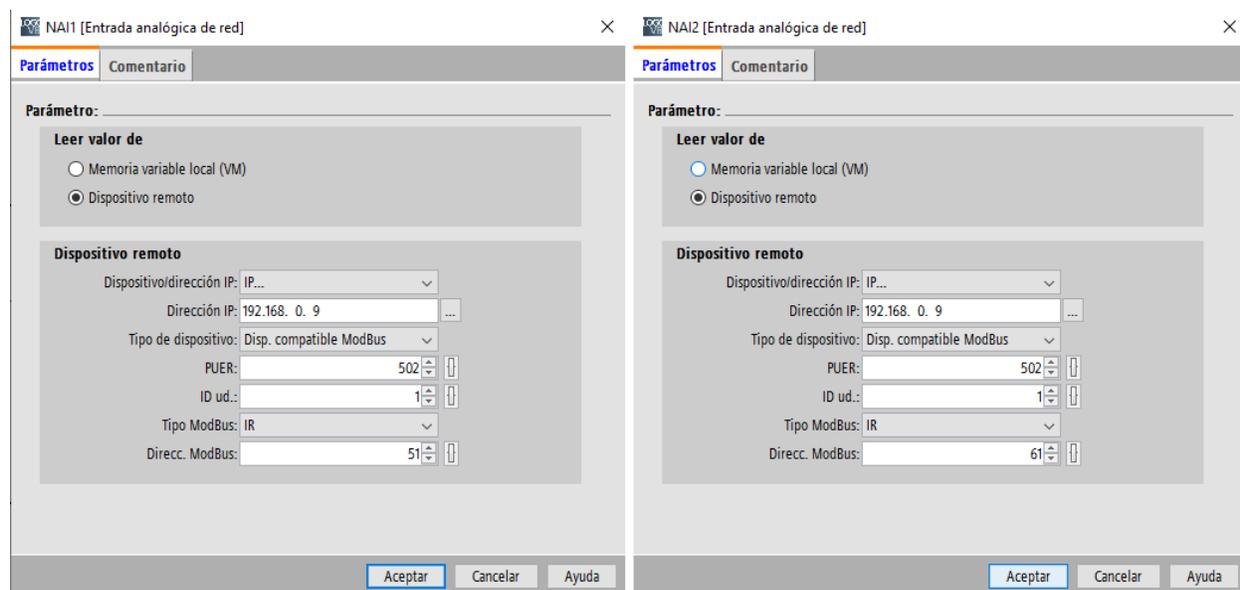


Figura 85

Configuración del bloque de control PI del MiniPLC LOGO!

B005 [Regulador PI]

Parámetros Comentario

Salida

Consigna (SP) 500

Salida manual (Mq) 0

Parámetro:

Juego de parámetros: Usuario definido

Ganancia del regulador (KC): 14,75

Tiempo integral (TI): 9 : 45 Minutos (m:s)

Sentido (Dir): Hacia arriba (+)
 Hacia abajo (-)

Posiciones decimales

Decimales en el texto de aviso: 0 +12345

Otros

Remanencia
 Protección activa

Aceptar Cancelar Ayuda

Programación de la Pantalla HMI

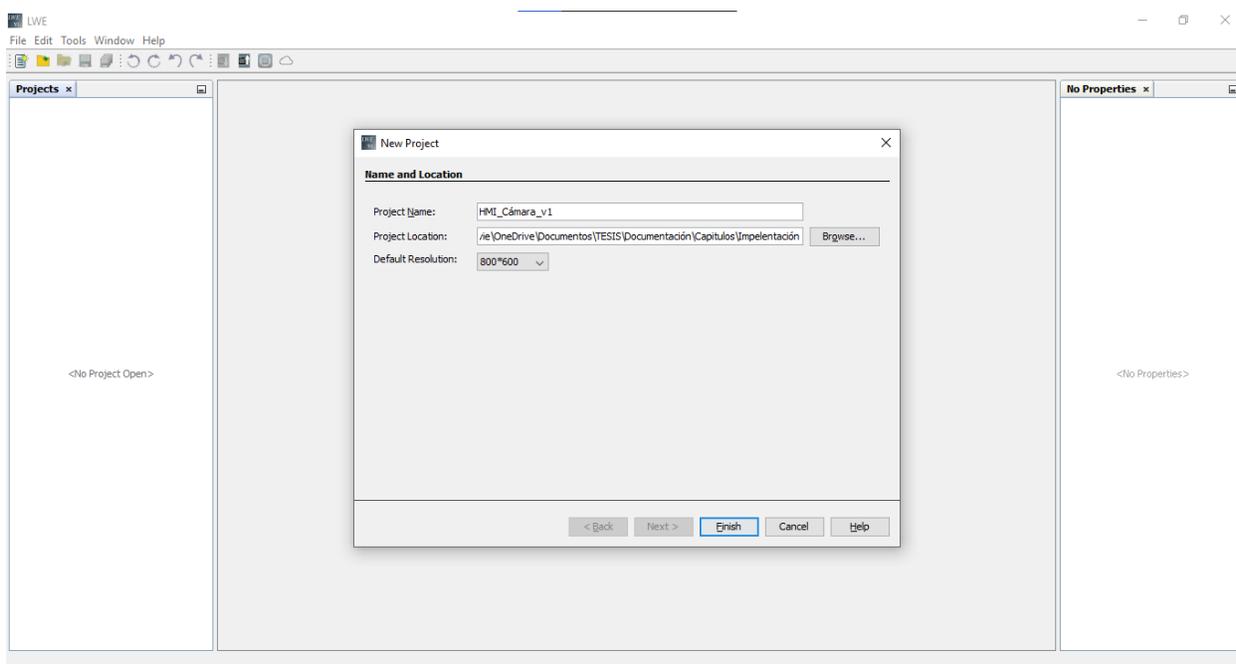
Para la implementación de la interfaz gráfica se consideró la exploración y utilización de la herramienta gratuita de Siemens LOGO! Web Editor la cual permite la creación de interfaces web mediante las cuales se puede monitorear y controlar el MiniPLC desde cualquier dispositivo inteligente. Después de una examinación preliminar de todas las funciones de las cuales dispone el LOGO! Web Editor, se consideró como una buena opción la creación de las pantallas utilizando esta herramienta, para su implementación en el MiniPLC es necesario que este cuente con una memoria microSD debido a que es ahí en donde se guardan todas las

pantallas diseñadas, el tamaño de la microSD puede variar dependiendo el número de pantallas y la complejidad de las mismas (debido a los recursos gráficos), para el presente trabajo se utilizó una memoria con una capacidad de 4GB de la marca Kingston.

El proceso de diseño parte de la ejecución del software LWE que viene incluido en la actualización del LOGO!Soft Comfort v8.3 en donde se crea un nuevo proyecto con una resolución de 800*600, como se muestra en la Figura 86.

Figura 86

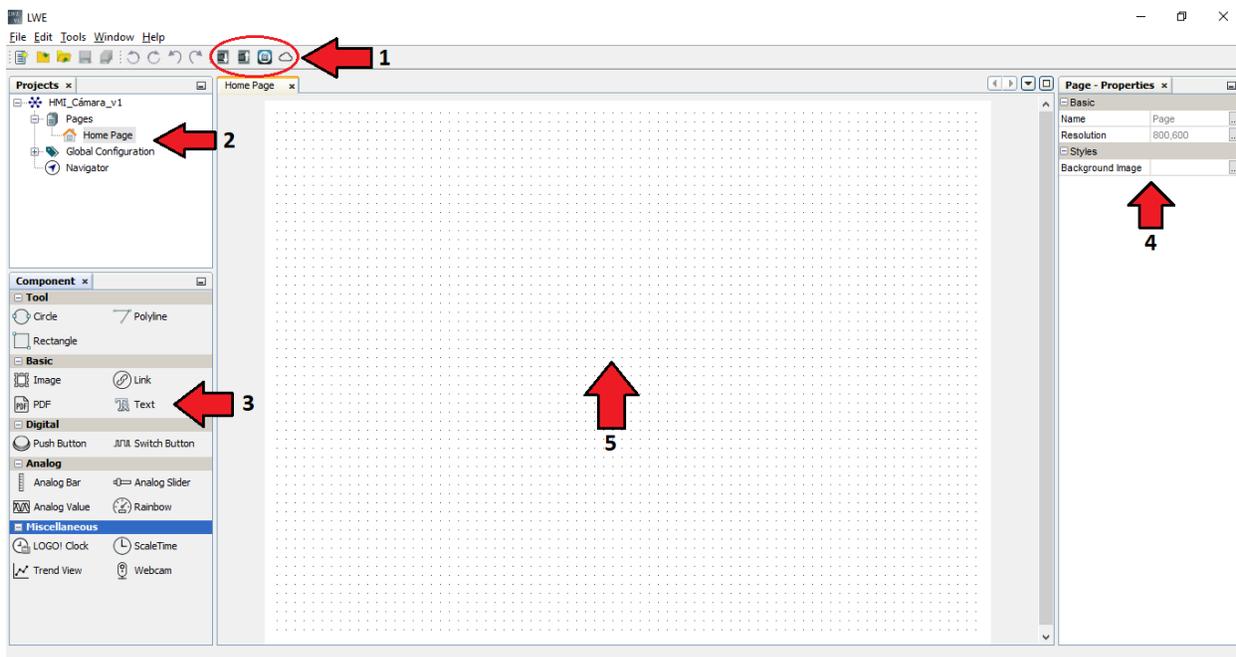
Inicialización del LOGO! Web Editor mediante el aplicativo LWE y creación de nuevo proyecto



Una vez creado el proyecto se despliega la pantalla de edición con los menús y barras de herramientas que dispone el software los cuales se detallan a continuación:

Figura 87

Menús de selección y herramientas del aplicativo LWE

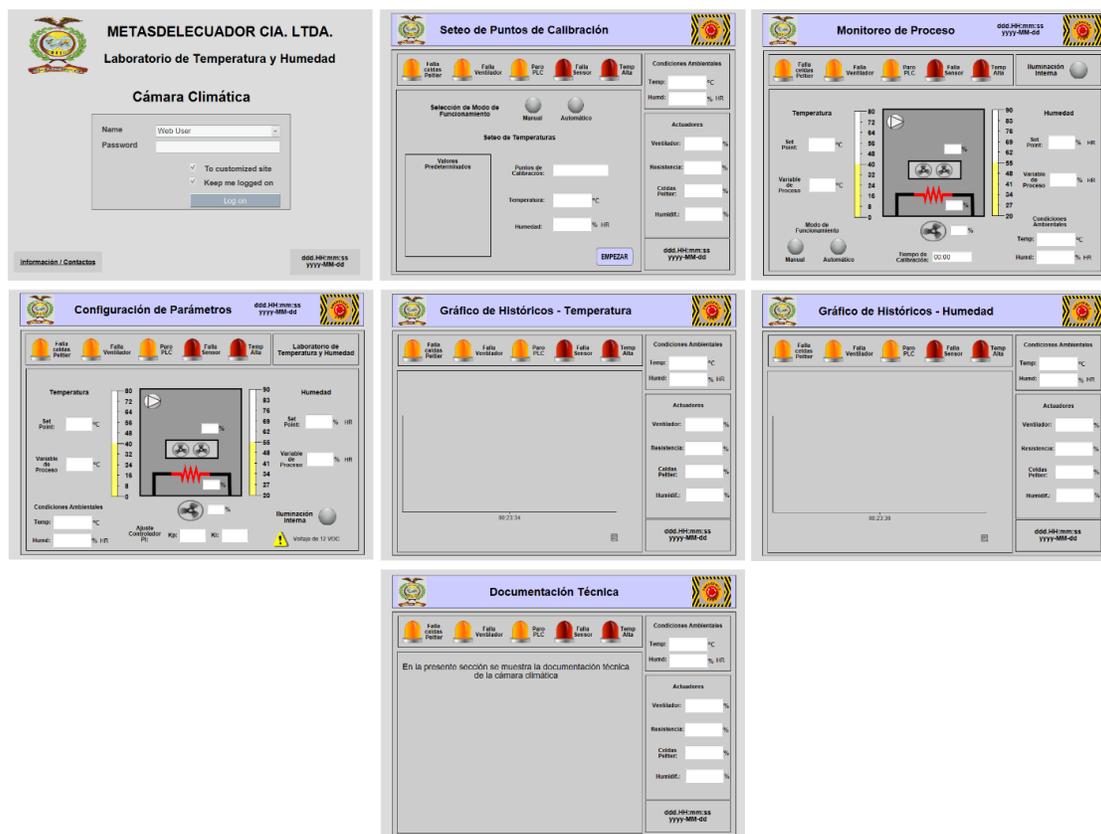


1. Menú para carga y descarga de las pantallas diseñadas en el MiniPLC LOGO! o en la nube AWS (Amazon Web Server).
2. Árbol de proyecto donde se despliegan las pantallas diseñadas, las configuraciones globales del proyecto y el menú de navegación, el cual se despliega de manera lateral y no puede ser configurado.
3. Menú de las opciones de los componentes de edición que están disponibles para diseñar pantallas, es importante mencionar que los componentes disponibles en el software son limitados por lo que algunas funcionalidades que se pretendía incluir fueron reconsideradas.
4. Menú de configuración de atributos de los componentes añadidos a las pantallas diseñadas.
5. Espacio disponible para la creación de las pantallas.

Las pantallas diseñadas se muestran en la Figura 88, pero es importante resaltar que este software en la versión más actualizada a la fecha 27 de julio del 2023 no cuenta con una funcionalidad particular para la gestión de privilegios ni permisos de usuarios, esto no representa un inconveniente de consideración ya que en el laboratorio se cuenta con dos personas encargadas del proceso de calibración que están únicamente autorizadas a operar la cámara climática, de la misma manera cuenta con componentes y una biblioteca de símbolos bastante limitada, aunque si permite la visualización de símbolos basados en imágenes exportadas en formato PNG, por lo que para que el sinóptico represente al proceso de manera adecuada se realizaron la mayoría de símbolos en Photoshop que es un software de edición de imágenes.

Figura 88

Pantallas diseñadas



Capítulo VI

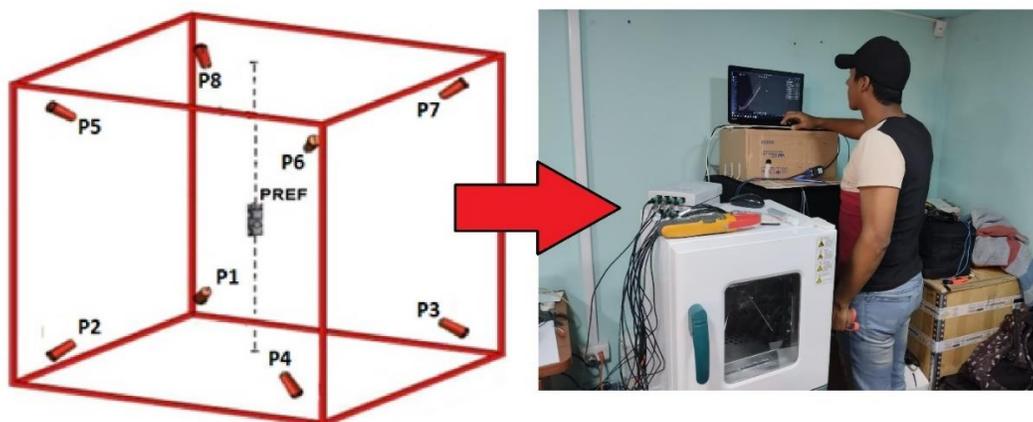
Validación, Pruebas y Resultados

Pruebas y Análisis de Funcionamiento

Una vez implementados los subsistemas de calefacción, refrigeración y humidificación y montado el MiniPLC LOGO! con la lógica de programación establecida y parametrizada se realizaron pruebas de estabilidad y uniformidad para los valores de temperatura y humedad que se muestran a continuación. Los resultados de las pruebas válidas que son consideradas adecuadas para asegurar calidad en el proceso de calibración se basan en el procedimiento de calibración, principalmente en la ubicación de los sensores como muestran a continuación, por lo tanto, como un mecanismo de comparación y verificación de los valores obtenidos se utilizaron nuevamente los Dataloggers Pico con los sensores Pt100 (sensores utilizados para realizar calibración y caracterización de temperatura) dispuestos en las posiciones mostradas en las Figuras 89 con un sensor extra que sirve de referencia el cual está ubicado en el centro del volumen interno de la cabina, asimismo para el tratamiento de los datos en Matlab, estos son exportados del software PicoLog en formato CSV.

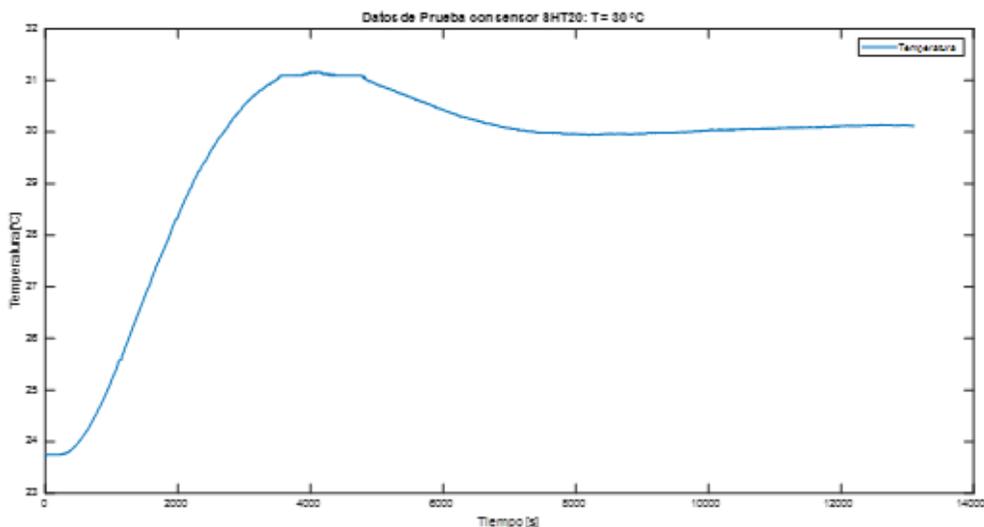
Figura 89

Disposición de los sensores PT100 de los dataloggers pico para estudios de uniformidad y estabilidad con respecto a la temperatura



Prueba 1: $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ **Figura 90**

Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=30\text{ }^{\circ}\text{C}$

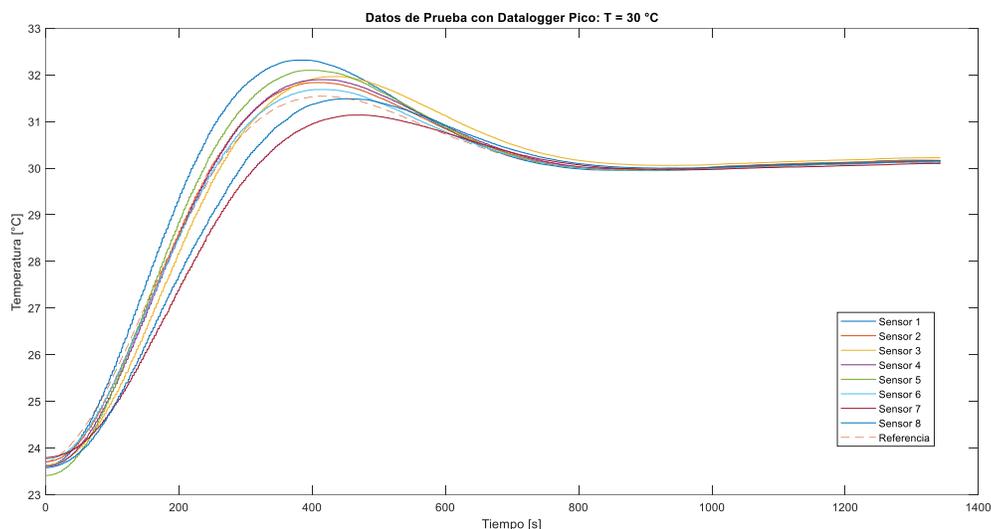


Nota. Valores obtenidos del sensor SHT20 incorporado en la misma cámara.

La Figura 90 muestra la respuesta con respecto a la temperatura dentro de la cámara climática, este valor es obtenido del sensor SHT20 incorporado dentro de la cabina, por lo que es la “señal del proceso” que comanda el comportamiento del controlador PI del MiniPLC, se comprueba que la cámara llega a su temperatura de establecimiento (seteo) aproximadamente a los 13 minutos, tiempo a partir del cual ya se puede empezar a tomar datos del instrumento bajo prueba introducido en el interior de la cámara climática.

Figura 91

Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=30\text{ °C}$



Nota. Valores obtenidos con el datalogger Pico.

Para el análisis de uniformidad y estabilidad se consideran las directrices brindadas por la DKD-R 5-7 (Red Colombiana de Metrología, 2019) las cuales mencionan que los estudios de uniformidad (la cual se la realiza con respecto al espacio) se determinan como la máxima desviación de las ubicaciones dentro de la cabina o pared según la DIN EN 60068-3-5 o DIN 50011-12 respectivamente, con respecto a una ubicación de referencia que por lo general está ubicada en el centro de la cabina interna, siempre y cuando la cámara climática haya alcanzado condiciones de estabilidad, para ello se considera la siguiente ecuación, lo que resulta:

$$|\delta T_{uniformidad}| = \text{máx}|T_{ref} - T_i|$$

Tabla 13

Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4	Sref-S5	Sref-S6	Sref-S7	Sref-S8	Sref-S1
0,03	0,027	0,084	0,01	0,005	0,009	0,032	0,016	0,03
Resultado								
Máxima Diferencia		0,084						
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]		30						
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]		30,084						
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]		29,916						

En donde el valor máximo es 0,084 el cual indica la máxima variación de temperaturas en las esquinas de la cabina con respecto a la temperatura en el centro, es decir, con una temperatura de establecimiento de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ se asegura que las temperaturas de las esquinas con respecto a la temperatura en el centro de la cabina pueden variar entre $29,916\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $30,084\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de esto, se asegura que para esta temperatura el sistema de generación presenta un error del 0,28 %.

Con respecto a la estabilidad, este es un estudio que se lo realiza con respecto al tiempo teniendo un cálculo similar al del estudio de uniformidad con la diferencia de que se consideran los valores de temperatura máximos y mínimos de cada sensor en estado estable, como lo muestra la Tabla 14.

Tabla 14

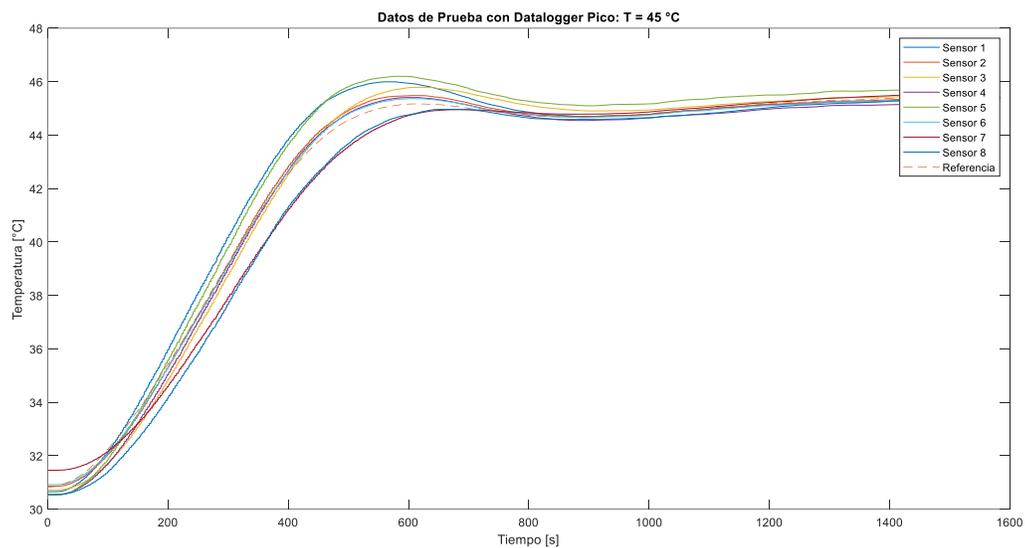
Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 30\text{ °C}$

Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	30,167	29,974	0,193
Sensor 2	30,168	29,981	0,187
Sensor 3	30,223	30,058	0,165
Sensor 4	30,152	29,973	0,179
Sensor 5	30,135	29,95	0,185
Sensor 6	30,123	29,957	0,166
Sensor 7	30,099	29,963	0,136
Sensor 8	30,156	29,999	0,157
Referencia	30,129	29,967	0,162
Resultado			
Máxima Diferencia	0,193		
Set Point [°C]	30		
Límite Sup [°C]	30,193		
Límite Inf [°C]	29,807		

Por lo tanto, el valor máximo es 0,193 el cual indica que una vez que la cámara climática ha alcanzado la estabilidad de acuerdo a una temperatura de establecimiento de 30 °C se asegura que las temperaturas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 29,807 °C hasta 30,193 °C, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener esta temperatura durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 0,64 %.

Prueba 2: $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$ **Figura 92**

Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=45\text{ }^{\circ}\text{C}$



Nota. Valores obtenidos con el datalogger Pico.

La Figura 92 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse una temperatura de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 13 minutos, esta nueva temperatura fue establecida después de la primera prueba con la temperatura establecida de $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, por lo que los datos comienzan en dicha temperatura. Los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15

Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4	Sref-S5	Sref-S6	Sref-S7	Sref-S8
0,056	0,037	0,096	0,202	0,239	0,073	0,080	0,134
Resultado							
Máxima Diferencia		0,239					
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]		45					
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]		45,239					
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]		44,761					

En donde el valor máximo es 0,239 por lo que con una temperatura de establecimiento de $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ se asegura que las temperaturas de las esquinas con respecto a la temperatura en el centro de la cabina pueden variar entre $44,761\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $45,239\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de esto, se asegura que para esta temperatura el sistema de generación presenta un error del 0,53 %.

Tabla 16

Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 45\text{ }^{\circ}\text{C}$

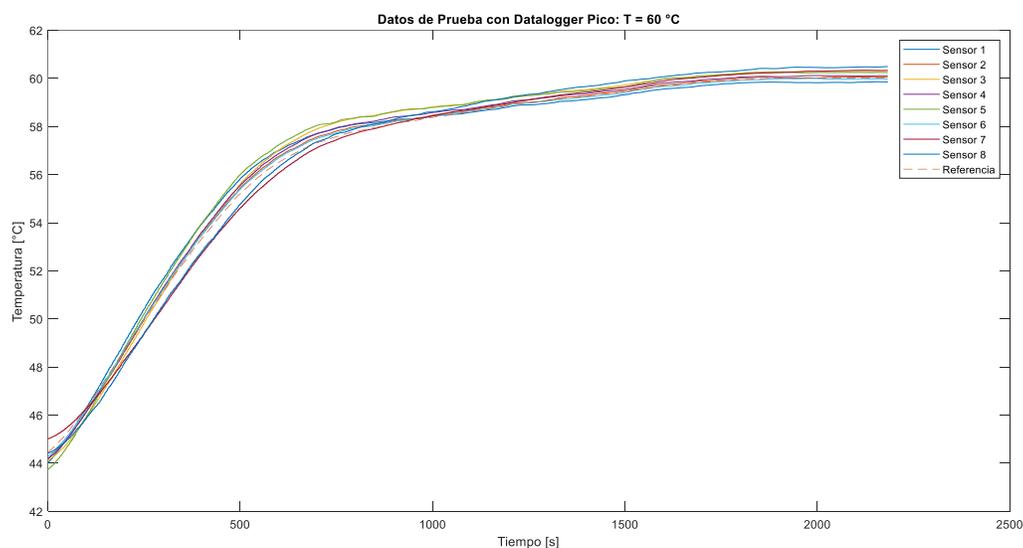
Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	45,424	44,703	0,721
Sensor 2	45,467	44,696	0,771
Sensor 3	45,584	44,903	0,681
Sensor 4	45,288	44,559	0,729
Sensor 5	45,727	45	0,727
Sensor 6	45,427	44,662	0,765
Sensor 7	45,647	44,788	0,859
Sensor 8	45,4	44,583	0,817
Referencia	45,53	44,702	0,828
Resultado			
Máxima Diferencia		0,859	
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]		45	
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]		45,859	
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]		44,141	

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 16 se observa que el valor máximo es 0,859 que para una temperatura de establecimiento de 45 °C se asegura que las temperaturas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 44,141 °C hasta 45,859 °C, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener esta temperatura durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 1,91 %.

Prueba 3: T = 60 °C

Figura 93

Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de T=60 °C



Nota. Valores obtenidos con el datalogger Pico.

La Figura 93 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse una temperatura de 60 °C donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 21 minutos, esta nueva temperatura fue establecida después de la primera prueba con la temperatura establecida de 45 °C, por lo que los datos comienzan en dicha temperatura. Los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 17.

Tabla 17

Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4	Sref-S5	Sref-S6	Sref-S7	Sref-S8
0,161	0,036	0,273	0,095	0,24	0,029	0,269	0,427
Resultado							
Máxima Diferencia	0,427						
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]	60						
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]	60,427						
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]	59,573						

En donde el valor máximo es 0,427 por lo que con una temperatura de establecimiento de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ se asegura que las temperaturas de las esquinas con respecto a la temperatura en el centro de la cabina pueden variar entre $59,573\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $60,427\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de esto, se asegura que para esta temperatura el sistema de generación presenta un error del 0,71 %.

Tabla 18

Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 60\text{ }^{\circ}\text{C}$

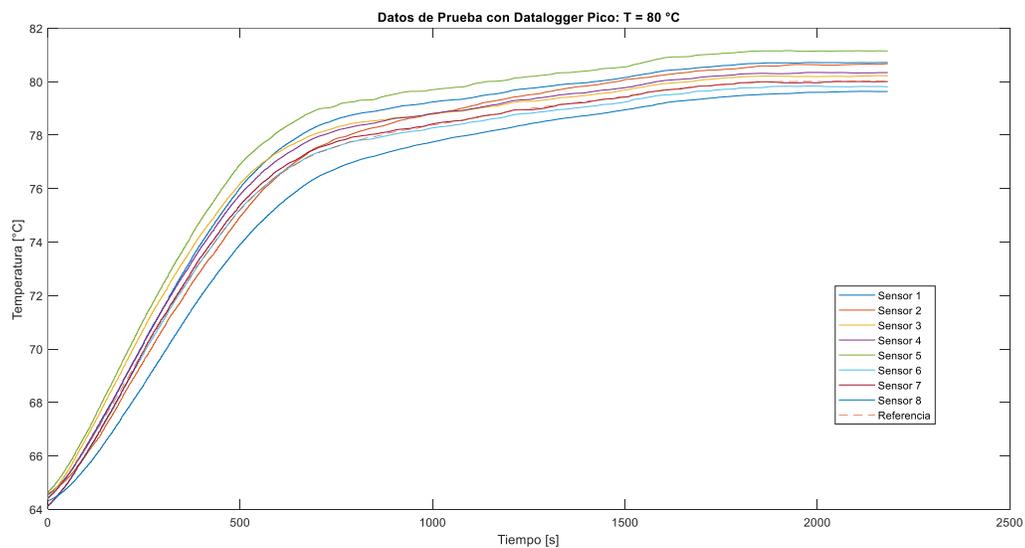
Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	59,859	59,71	0,149
Sensor 2	60,058	59,891	0,167
Sensor 3	60,289	60,116	0,173
Sensor 4	60,117	59,958	0,159
Sensor 5	60,253	60,111	0,142
Sensor 6	59,997	59,815	0,182
Sensor 7	60,336	60,071	0,265
Sensor 8	60,491	60,25	0,241
Referencia	60,026	59,852	0,174
Resultado			
Máxima Diferencia	0,265		
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]	60		
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]	60,265		
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]	59,735		

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 18 se observa que el valor máximo es 0,265 que para una temperatura de establecimiento de 60 °C se asegura que las temperaturas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 59,735 °C hasta 60,265 °C, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener esta temperatura durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 0,44 %.

Prueba 4: $T = 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 94

Respuesta de la cámara climática a una temperatura establecida de $T=80 \text{ }^{\circ}\text{C}$



Nota. Valores obtenidos con el datalogger Pico.

La Figura 94 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse una temperatura de 80 °C donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 26 minutos, esta nueva temperatura fue establecida después de la primera prueba con la temperatura establecida de 60 °C, por lo que los datos comienzan en dicha temperatura. Los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 19.

Tabla 19

Diferencia de las temperaturas promedio de cada sensor con respecto a la referencia para una temperatura de establecimiento de $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4	Sref-S5	Sref-S6	Sref-S7	Sref-S8
0,702	0,614	0,200	0,322	1,145	0,190	0,017	0,420
Resultado							
Máxima Diferencia	1,145						
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]	80						
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]	81,145						
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]	78,855						

En donde el valor máximo es 1,145 por lo que con una temperatura de establecimiento de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ se asegura que las temperaturas de las esquinas con respecto a la temperatura en el centro de la cabina pueden variar entre $78,855\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $80,145\text{ }^{\circ}\text{C}$, además de esto, se asegura que para esta temperatura el sistema de generación presenta un error del 1,43 %.

Tabla 20

Diferencia de las temperaturas máximas y mínimas de cada sensor para una temperatura de establecimiento de $T = 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

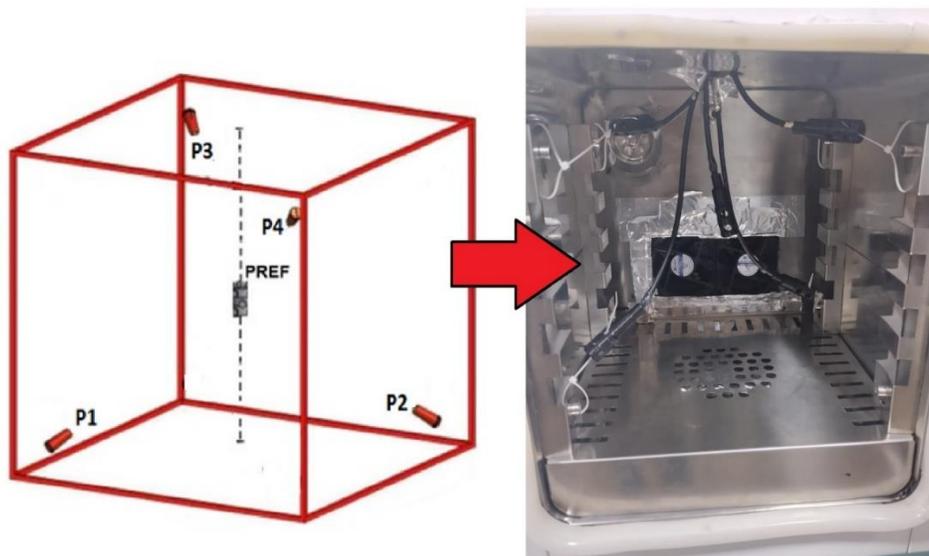
Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	80,719	80,635	0,084
Sensor 2	80,671	80,488	0,183
Sensor 3	80,228	80,173	0,055
Sensor 4	80,347	80,271	0,076
Sensor 5	81,163	81,098	0,065
Sensor 6	79,837	79,752	0,085
Sensor 7	80,008	79,955	0,053
Sensor 8	79,641	79,476	0,165
Referencia	80,027	79,937	0,09
Resultado			
Máxima Diferencia	0,183		
Set Point [$^{\circ}\text{C}$]	80		
Límite Sup [$^{\circ}\text{C}$]	80,183		
Límite Inf [$^{\circ}\text{C}$]	79,817		

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 20 se observa que el valor máximo es 0,183 que para una temperatura de establecimiento de 80 °C se asegura que las temperaturas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 79,817 °C hasta 80,183 °C, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener esta temperatura durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 0,23 %.

Con respecto al análisis de los resultados de humedad se consideran los valores listados a continuación en donde se aplican los mismos estudios de uniformidad y estabilidad para el análisis del comportamiento de la cámara climática con la principal diferencia que el datalogger utilizado es un proyecto propio desarrollado para la empresa como parte de las actividades realizadas en las prácticas preprofesionales, el datalogger consta de 8 sensores SHT30 implementados en un sistema embebido, con lo cual se obtienen valores de temperatura y humedad útiles para caracterizaciones en humedad y para el presente trabajo se consideran 5 sensores dispuestos como se muestra en la Figura 95.

Figura 95

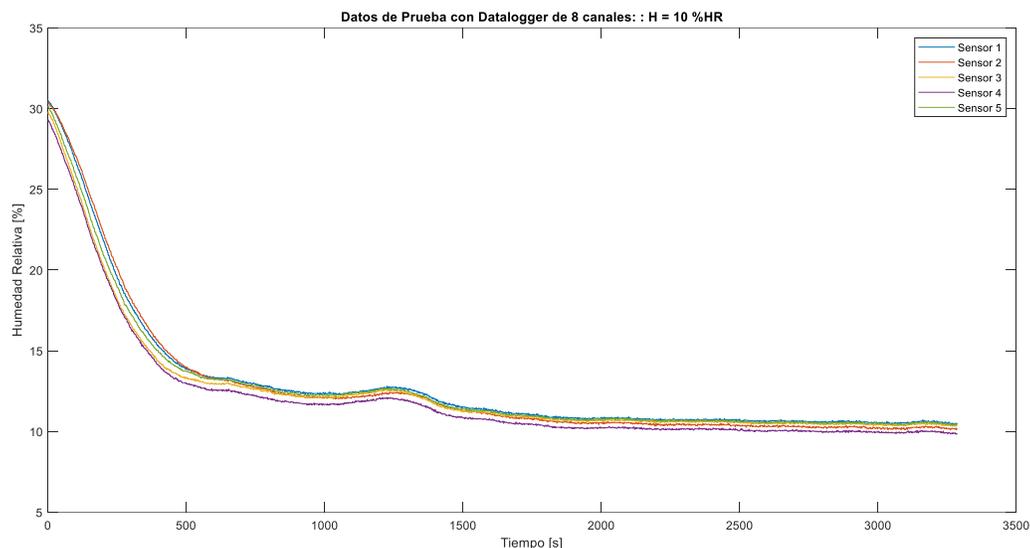
Disposición de los sensores SHT30 del Datalogger de 8 canales para estudios de uniformidad y estabilidad con respecto a la humedad



Prueba 5: $H = 10 \% HR$

Figura 96

Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de $H=10 \%HR$



Nota. Valores obtenidos con el datalogger de 8 canales.

La Figura 96 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse un valor de humedad de 10 %HR donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 26 minutos, este valor de humedad relativa fue establecida después de las pruebas realizadas con respecto a un incremento de temperatura, los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 21.

Tabla 21

Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 10 \%HR$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4
0,161	0,021	0,179	0,601
Resultado			
Máxima Diferencia		0,601	
Set Point [%HR]		10	
Límite Sup [%HR]		10,601	
Límite Inf [%HR]		9,399	

En donde el valor máximo es 0,601 por lo que con un valor de humedad establecida de 10 %HR se asegura que las humedades relativas de las esquinas con respecto a la humedad relativa en el centro de la cabina pueden variar entre 9,399 %HR hasta 10,601 %HR, además de esto, se asegura que para este valor de establecimiento el sistema de generación presenta un error del 6,01 %.

Tabla 22

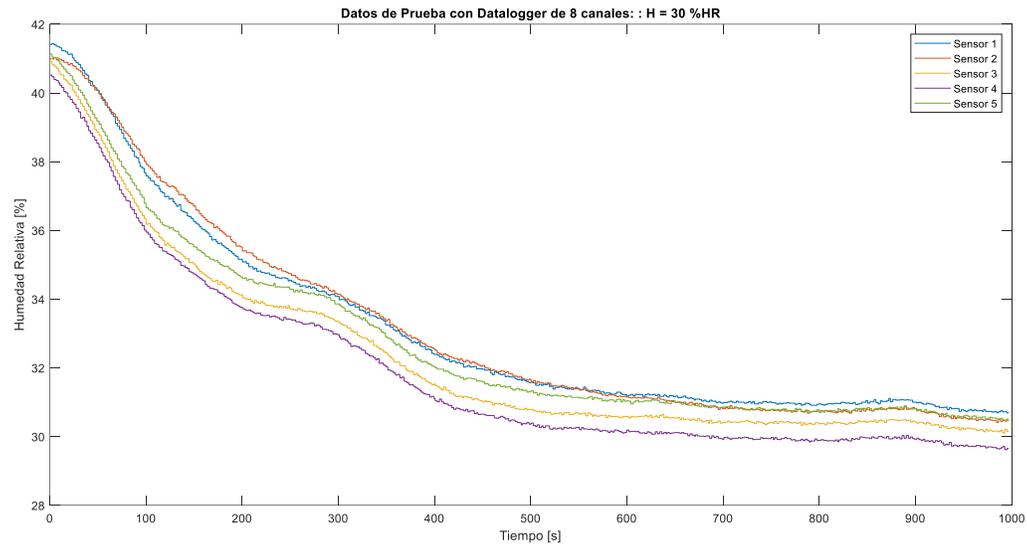
Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 10$ %HR

Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	11,26	10,43	0,83
Sensor 2	10,99	10,11	0,88
Sensor 3	11,05	10,31	0,74
Sensor 4	10,67	9,83	0,84
Referencia	11,17	10,37	0,8
Resultado			
Máxima Diferencia	0,88		
Set Point [%HR]	10		
Límite Sup [%HR]	10,88		
Límite Inf [%HR]	9,12		

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 22 se observa que el valor máximo es 0,88 que para un valor de humedad relativa de establecimiento de 10 %HR se asegura que las humedades relativas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 9,12 %HR hasta 10,88 %HR, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener estos valores de humedades relativas durante un periodo de tiempo de 30 minutos con un error del 8,8 %.

Prueba 6: H = 30 % HR**Figura 97**

Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de H=30 %HR



Nota. Valores obtenidos con el datalogger de 8 canales.

La Figura 97 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse un valor de humedad de 30 %HR donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 10 minutos, este valor de humedad relativa fue establecida después de las pruebas realizadas con respecto a la temperatura, los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 23.

Tabla 23

Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 30$ %HR

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4
0,344	0,341	0,455	0,863
Resultado			
Máxima Diferencia		0,863	
Set Point [%HR]		30	
Límite Sup [%HR]		30,863	
Límite Inf [%HR]		29,137	

En donde el valor máximo es 0,863 por lo que con un valor de humedad establecida de 30 %HR se asegura que las humedades relativas de las esquinas con respecto a la humedad relativa en el centro de la cabina pueden variar entre 29,137 %HR hasta 30,863 %HR, además de esto, se asegura que para este valor de establecimiento el sistema de generación presenta un error del 2,88 %.

Tabla 24

Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 30$ %HR

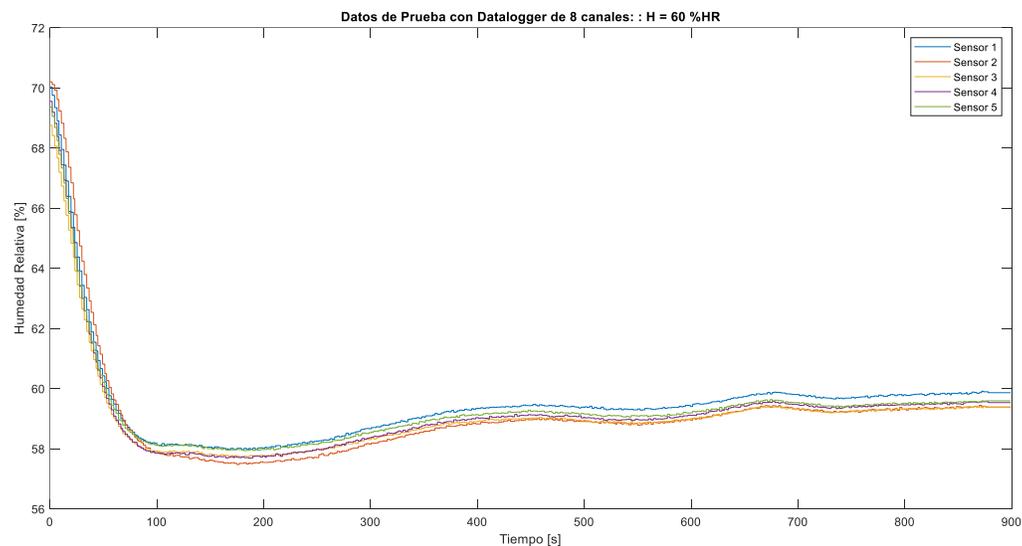
Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	31,25	30,69	0,56
Sensor 2	30,59	30,41	0,18
Sensor 3	30,05	29,62	0,43
Sensor 4	29,89	29,62	0,27
Referencia	30,97	30,48	0,49
Resultado			
Máxima Diferencia	0,56		
Set Point [%HR]	30		
Límite Sup [%HR]	30,56		
Límite Inf [%HR]	29,44		

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 24 se observa que el valor máximo es 0,56 que para un valor de humedad relativa de establecimiento de 30 %HR se asegura que las humedades relativas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 29,44 %HR hasta 30,56 %HR, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener estos valores de humedades relativas durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 1,87 %.

Prueba 7: H = 60 % HR

Figura 98

Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de H=60 %HR



Nota. Valores obtenidos con el datalogger de 8 canales.

La Figura 98 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse un valor de humedad de 60 %HR donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 12 minutos, este valor de humedad relativa fue establecida después de las pruebas realizadas con respecto a la temperatura, los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 25.

Tabla 25

Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 60\%HR$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4
0,202	0,177	0,225	0,122
Resultado			
Máxima Diferencia		0,225	
Set Point [%HR]		60	
Límite Sup [%HR]		60,225	
Límite Inf [%HR]		59,775	

En donde el valor máximo es 0,225 por lo que con un valor de humedad establecida de 60 %HR se asegura que las humedades relativas de las esquinas con respecto a la humedad relativa en el centro de la cabina pueden variar entre 59,775 %HR hasta 60,225 %HR, además de esto, se asegura que para este valor de establecimiento el sistema de generación presenta un error del 0,38 %.

Tabla 26

Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 60\%HR$

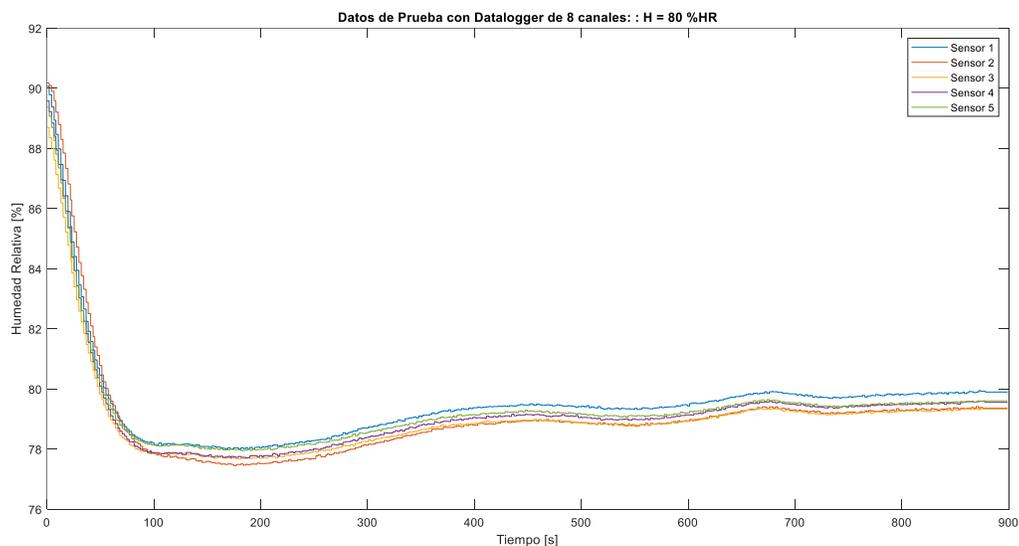
Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	59,91	57,96	1,95
Sensor 2	59,44	57,47	1,97
Sensor 3	59,41	57,72	1,69
Sensor 4	59,57	57,68	1,89
Referencia	59,63	57,93	1,7
Resultado			
Máxima Diferencia	1,97		
Set Point [%HR]	60		
Límite Sup [%HR]	61,97		
Límite Inf [%HR]	58,03		

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 26 se observa que el valor máximo es 1,97 que para un valor de humedad relativa de establecimiento de 60 %HR se asegura que las humedades relativas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 58,03 %HR hasta 61,97 %HR, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener estos valores de humedades relativas durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 3,28 %.

Prueba 8: H = 80 % HR

Figura 99

Respuesta de la cámara climática a un valor de humedad relativa de H=80 %HR



Nota. Valores obtenidos con el datalogger de 8 canales.

La Figura 99 muestra la respuesta de la cámara climática al establecerse un valor de humedad de 80 %HR donde se observa que se estabiliza después de aproximadamente 13 minutos, este valor de humedad relativa fue establecida después de las pruebas realizadas con respecto a la temperatura, los resultados del análisis de uniformidad se muestran en la Tabla 27.

Tabla 27

Diferencia de las humedades promedio de cada sensor con respecto a la referencia para un valor de humedad de establecimiento de $H = 80 \%HR$

Sref-S1	Sref-S2	Sref-S3	Sref-S4
80,01	80,05	80,05	80,16
Resultado			
Máxima Diferencia		0,11	
Set Point [%HR]		80	
Límite Sup [%HR]		80,11	
Límite Inf [%HR]		79,89	

En donde el valor máximo es 0,11 por lo que con un valor de humedad establecida de 80 %HR se asegura que las humedades relativas de las esquinas con respecto a la humedad relativa en el centro de la cabina pueden variar entre 79,89 %HR hasta 80,11 %HR, además de esto, se asegura que para este valor de establecimiento el sistema de generación presenta un error del 0,14 %.

Tabla 28

Diferencia de las humedades máximas y mínimas de cada sensor para un valor de humedad de establecimiento de $H = 80 \%HR$

Ubicación	Máximo	Mínimo	Diferencia Máx-Mín
Sensor 1	80,18	79,96	0,22
Sensor 2	80,21	79,88	0,33
Sensor 3	80,36	79,65	0,71
Sensor 4	80,41	80,01	0,4
Referencia	80,29	80,01	0,28
Resultado			
Máxima Diferencia	0,71		
Set Point [%HR]	80		
Límite Sup [%HR]	80,71		
Límite Inf [%HR]	79,29		

Con respecto a la estabilidad, en los resultados mostrados en la Tabla 28 se observa que el valor máximo es 0,71 que para un valor de humedad relativa de establecimiento de 80 %HR se asegura que las humedades relativas en las esquinas y en el centro del volumen útil pueden variar entre 79,29 %HR hasta 80,71 %HR, además de esto, se asegura que el sistema de generación puede mantener estos valores de humedades relativas durante un periodo de tiempo máximo de 30 minutos con un error del 0,89 %.

Características de Funcionamiento

Después de las pruebas y caracterizaciones realizadas a la cámara climática en los valores de temperatura y humedad detallados en el apartado anterior y priorizando el cumplimiento de los requisitos de aptitud para la calibración de instrumentos de medición de temperatura y humedad dentro de una cámara climática propuestas por la (Red Colombiana de Metrología, 2019), se puede mencionar que la cámara climática una vez repotenciada tiene:

- Disponibilidad del sensor para medición de temperatura y humedad relativa cuyos valores pueden ser visualizados en una pantalla HMI accesible desde cualquier dispositivo inteligente y en el display del MiniPLC LOGO! dispuesto en la parte frontal del equipo (componentes de la cámara climática).
- Disponibilidad de lazos de control individuales para los subsistemas de calefacción, refrigeración y humidificación, los cuales están dispuestos de manera modular como componentes de la cámara climática.
- Detalle de las especificaciones técnicas del diseño e implementación, en los cuales se incluyen el posicionamiento y las especificaciones del sensor SHT20, las hojas de datos del material aislante instalado (fibra de vidrio) provisto por el fabricante, planos de la cabina interna, estructura externa y diagramas de conexión de los elementos eléctricos/electrónicos dentro de la cabina de control.

Evaluación de la Interfaz HMI

Como se mencionó en el Capítulo de Diseño, la interfaz HMI ha sido diseñada considerando la norma ISA 101 y la guía GEDIS. Como método de evaluación de la utilidad y usabilidad de la interfaz HMI se utilizaron las tablas descritas a continuación las cuales fueron llenadas y calificadas por los dos técnicos que están autorizados a la manipulación de la cámara climática dentro del laboratorio de temperatura y humedad. La guía Gedis consta de 10 indicadores los cuales poseen cada uno un peso del 10 % de la evaluación final como lo muestra la Tabla 29.

Tabla 29

Indicadores de evaluación para la interfaz HMI implementada en el proyecto con sus respectivos pesos

N°	Indicador	Peso [%]
1	Arquitectura	10
2	Distribución de pantallas	10
3	Navegación	10
4	Uso efectivo del color	10
5	Uso de fuentes e información textual	10
6	Estatus de los equipos y eventos del proceso	10
7	Información y valores del proceso	10
8	Gráficos de tendencias y tablas	10
9	Comando y entradas de datos	10
10	Gestión de alarmas	10
TOTAL		100

Cada uno de estos indicadores se dividen en subindicadores que de la misma manera poseen un peso respectivo el cual contribuye a la evaluación final tal y como lo muestra la Tabla 30.

Tabla 30

Subindicadores de evaluación para la interfaz HMI implementada en el proyecto con sus respectivos pesos

N°	Indicador	Subindicador	Peso [%]
1	Arquitectura	Correspondencia con la planta	20
		Número de capas	50
		Existencia de mapa	30
2	Distribución de pantallas	Consistencia	25
		Densidad	25
		Simetría y balance	25
		Flujo de proceso	25
3	Navegación	Correspondencia con la arquitectura	35
		Accesibilidad	35
		Consistencia	30
4	Uso efectivo del color	Visibilidad	20
		Contraste con el fondo de las pantallas	20
		Número de colores utilizados	15
		Diferenciabilidad entre colores	15
		Uso de colores típicos	15
		Consistencia	15
5	Uso de fuentes e información textual	Número de fuentes utilizadas	10
		Tamaños de las fuentes utilizadas	15
		Visibilidad del texto	15
		Espacio entre textos	10
		Alineación	10
		Uso del énfasis	10
		Uso de acrónimos	10
		Color del texto	10
		Consistencia	10
6	Estatus de los equipos y eventos del proceso	Facilidad de reconocimiento	35
		Visibilidad del estado del equipo	35
		Consistencia	30
7	Información y valores del proceso	Visibilidad	20
		Ubicación de los valores representativos	20
		Distribución	20
		Agrupación de datos	20
		Consistencia	20
8	Gráficos de tendencias y tablas	Formato	15
		Visibilidad	20
		Ubicación	15

		Agrupación	20
		Flexibilidad de configuración	15
		Consistencia	15
9	Comando y entradas de datos	Visibilidad	25
		Maniobrabilidad	25
		Retroalimentación	25
		Consistencia	25
		Visibilidad	15
10	Gestión de alarmas	Accesibilidad	15
		Ubicación de alarmas	15
		Informatividad de los textos de alarmas	15
		Visibilidad de alarmas en sinóptico	15
		Facilidad de reconocimiento	15
		Consistencia	10
		TOTAL	

La evaluación de cada uno de los subindicadores se lo realiza mediante la ecuación:

$$Subindicador = \frac{\sum_{j=1}^j W_j * SubInd_j}{\sum_{j=1}^j W_j}$$

Donde:

W_j = Peso de cada uno de los subindicadores

$SubInd_j$ = Subindicador

Con los valores de cada uno de los subindicadores calculados, se realiza el cálculo total de los indicadores obteniendo una calificación que servirá para realizar una evaluación final mediante la siguiente ecuación:

$$Indicador = \frac{\sum_{i=1}^i P_i * Ind_i}{\sum_{i=1}^i P_i}$$

Donde:

P_i = Peso de cada uno de los indicadores

Ind_i = Indicador

Resultados de la evaluación de la interfaz HMI

Las calificaciones resultantes de la evaluación realizada por parte de los técnicos de calibración del laboratorio de temperatura y humedad se muestran en las Tabla 31 y Tabla 32 y están puntuadas del 1 al 5 en donde 1 representa una característica mal o incorrectamente implementada y el 5 representa una calificación alta denotando una característica correctamente implementada.

Tabla 31

Resultados obtenidos de la evaluación de la interfaz HMI implementada en el proyecto por parte del primer técnico de calibración

Indicador	Subindicador	Puntos	Peso [%]	Calificación del indicador
Arquitectura	Correspondencia con la planta	5	20	3,6
	Número de capas	4	50	
	Existencia de mapa	2	30	
Distribución de pantallas	Consistencia	5	25	4,75
	Densidad	4	25	
	Simetría y balance	5	25	
	Flujo de proceso	5	25	
Navegación	Correspondencia con la arquitectura	5	35	4
	Accesibilidad	3	35	
	Consistencia	4	30	
Uso efectivo del color	Visibilidad	5	20	4,55
	Contraste con el fondo de las pantallas	5	20	
	Número de colores utilizados	4	15	
	Diferenciabilidad entre colores	4	15	
	Uso de colores típicos	5	15	
Uso de fuentes e información textual	Consistencia	4	15	4,25
	Número de fuentes utilizadas	4	10	
	Tamaños de las fuentes utilizadas	3	15	
	Visibilidad del texto	4	15	
	Espacio entre textos	4	10	
	Alineación	5	10	
Uso del énfasis	4	10		

	Uso de acrónimos	5	10	
	Color del texto	5	10	
	Consistencia	5	10	
Estatus de los equipos y eventos del proceso	Facilidad de reconocimiento	5	35	
	Visibilidad del estado del equipo	5	35	5
	Consistencia	5	30	
Información y valores del proceso	Visibilidad	5	20	
	Ubicación de los valores representativos	4	20	
	Distribución	5	20	4,6
	Agrupación de datos	4	20	
	Consistencia	5	20	
Gráficos de tendencias y tablas	Formato	4	15	
	Visibilidad	5	20	
	Ubicación	3	15	3,9
	Agrupación	4	20	
	Flexibilidad de configuración	2	15	
Comando y entradas de datos	Consistencia	5	15	
	Visibilidad	5	25	
	Maniobrabilidad	4	25	4,25
	Retroalimentación	4	25	
Gestión de alarmas	Consistencia	4	25	
	Visibilidad	5	15	
	Accesibilidad	5	15	
	Ubicación de alarmas	5	15	
	Informatividad de los textos de alarmas	5	15	5
	Visibilidad de alarmas en sinóptico	5	15	
	Facilidad de reconocimiento	5	15	
Consistencia	5	10		
TOTAL				4,39

Tabla 32

Resultados obtenidos de la evaluación de la interfaz HMI implementada en el proyecto por parte del segundo técnico de calibración

Indicador	Subindicador	Puntos	Peso [%]	Calificación del indicador
Arquitectura	Correspondencia con la planta	5	20	4,2
	Número de capas	4	50	
	Existencia de mapa	4	30	
Distribución de pantallas	Consistencia	5	25	4,25
	Densidad	4	25	
	Simetría y balance	4	25	
	Flujo de proceso	4	25	
Navegación	Correspondencia con la arquitectura	4	35	4,35
	Accesibilidad	5	35	
	Consistencia	4	30	
Uso efectivo del color	Visibilidad	5	20	4,8
	Contraste con el fondo de las pantallas	4	20	
	Número de colores utilizados	5	15	
	Diferenciabilidad entre colores	5	15	
	Uso de colores típicos	5	15	
	Consistencia	5	15	
Uso de fuentes e información textual	Número de fuentes utilizadas	4	10	4,65
	Tamaños de las fuentes utilizadas	4	15	
	Visibilidad del texto	5	15	
	Espacio entre textos	5	10	
	Alineación	5	10	
	Uso del énfasis	5	10	
	Uso de acrónimos	4	10	
	Color del texto	5	10	
	Consistencia	5	10	
Estatus de los equipos y eventos del proceso	Facilidad de reconocimiento	5	35	5
	Visibilidad del estado del equipo	5	35	
	Consistencia	5	30	
Información y valores del proceso	Visibilidad	5	20	4,4
	Ubicación de los valores representativos	3	20	
	Distribución	4	20	

	Agrupación de datos	5	20	
	Consistencia	5	20	
Gráficos de tendencias y tablas	Formato	4	15	4,35
	Visibilidad	4	20	
	Ubicación	5	15	
	Agrupación	5	20	
	Flexibilidad de configuración	3	15	
	Consistencia	5	15	
	Consistencia	5	15	
Comando y entradas de datos	Visibilidad	5	25	4,75
	Maniobrabilidad	5	25	
	Retroalimentación	4	25	
	Consistencia	5	25	
Gestión de alarmas	Visibilidad	5	15	4,85
	Accesibilidad	5	15	
	Ubicación de alarmas	5	15	
	Informatividad de los textos de alarmas	4	15	
	Visibilidad de alarmas en sinóptico	5	15	
	Facilidad de reconocimiento	5	15	
	Consistencia	5	10	
TOTAL			4,56	

Para la evaluación final se considera un criterio de conformidad general basado en un rango de 1 a 5 del resultado de las evaluaciones particulares realizadas, en el cual un valor de 1 denota una característica de la interfaz con la cual el técnico de calibración no se siente conforme o siente que no es necesaria, mientras que un valor de 5 corresponde a una total conformidad con la característica implementada, por lo tanto, con respecto al técnico de calibración 1 del cual se obtuvo una calificación de 4,39/5 correspondiente a la Tabla 31 se concluye que la HMI diseñada cumple con los criterios de conformidad y aceptación de las funcionalidades implementadas, del mismo modo, con respecto al técnico de calibración 2 del cual se obtuvo una calificación de 4,56/5 correspondiente a la Tabla 32 se concluye que la HMI diseñada es un aporte muy importante en el seguimiento y supervisión del proceso.

Conclusiones

- Se consiguió la automatización del sistema de generación de temperatura y humedad logrando repotenciar la cámara climática que se tenía en el laboratorio, modificando sus módulos individuales de generación y sus respectivos controladores con lo cual ya no se necesita una supervisión permanente ni una manipulación directa de dichos módulos, esto se lo realizó mediante la implementación de un controlador lógico programable dedicado para la industria como lo es el MiniPLC LOGO! de la marca Siemens el cual tiene como elemento de sensado y de retroalimentación a un sensor de temperatura/humedad SHT20 y como sistemas de generación de humedad a un humidificador de marca Holmes, para el sistema de refrigeración a un arreglo de 4 celdas Peltier y para el sistema de calefacción a una resistencia eléctrica de calefacción.
- Se logró disminuir el tiempo de estabilidad del medio isoterma generado para las diferentes temperaturas y humedades de establecimiento en un rango de 51,11 % hasta un 71,43 % del tiempo total resultante antes de la repotenciación de la cámara climática, esto se consiguió mediante el diseño y sintonización del controlador PI a través de las herramientas de análisis dedicado que ofrece el software MatLab cuyo diseño dependió de una identificación apropiada de la planta (comportamiento del volumen útil), de un acondicionamiento apropiado de la cabina y de la elección adecuada del material aislante. Además de esto, mediante el desarrollo de la interfaz HMI se pudieron agregar nuevas funcionalidades para una supervisión y control efectivo del proceso de generación y llevar una correcta documentación del tiempo de calibración total, la evaluación de la HMI diseñada realizada por los técnicos de calibración tiene como resultados 4,39/5 y 4,56/5 respectivamente, lo que equivale a un porcentaje de aceptación de 87,8 % para el técnico 1 y un porcentaje de aceptación del 91,2 % para el técnico 2.

- Se realizó una sustitución efectiva de los sistemas de refrigeración y humidificación antiguos que estaban constituidos por controladores dedicados individuales y que eran manejados de manera manual por un solo controlador en el cual están implementados las técnicas de control y la lógica adecuada para que cada subsistema pueda funcionar de manera automática con lo cual se optimiza el proceso de calibración en donde el técnico calibrador solamente cumple funciones de supervisor y registrador de datos. De la misma manera, a través de la repotenciación se optimizó el espacio que ocupaba la cámara climática, reduciendo las dimensiones de la cámara climática en un 75 % con respecto al alto, un 30 % con respecto al ancho y un 30 % con respecto a la profundidad.
- Se logró aumentar el alcance del rango de calibración mediante el aumento de la capacidad de calefacción de la resistencia eléctrica, reducción de la cabina interna y el cambio de material aislante, así como la integración de las técnicas de control adecuadas para cada uno de los subsistemas repotenciados en un solo controlador, con respecto a la temperatura se consiguió aumentar el alcance en un 25 %, mientras que con respecto a la humedad se consiguió aumentar el alcance en un 31,25 %.
- Se implementaron varias funcionalidades extras como la incorporación de fuentes de luz LED para alumbrar el interior de la cabina que puede ser encendida desde las opciones del HMI y desde el panel frontal, así como la incorporación de una mini cámara web la cual fue solicitada por los técnicos del laboratorio para poder obtener un respaldo en videograbaciones de la calibración de los instrumentos, con lo cual se asegura aún más la calidad del proceso de calibración brindado por la empresa.
- Mediante la incorporación de la función de modificar individualmente la capacidad de funcionamiento de los actuadores como la resistencia calefactora, la potencia del

ventilador en la base, la conexión o desconexión de las celdas Peltier y el ingreso de humedad al interior de la cabina, se puede seguir investigando en las formas alternativas de los procesos de generación para los métodos de calibración en temperatura y humedad relativa como por ejemplo, la relación entre la temperatura, punto de rocío, humedad relativa y presión de la masa de aire interno en el interior de la cabina.

Recomendaciones

- Establecer los puntos de calibración en orden ascendente con respecto a la temperatura y en orden descendente con respecto a la humedad, ya que existe una relación inversa entre la temperatura y la humedad dentro de la cabina, mientras mayor sea el valor de temperatura, la humedad relativa va a ser menor y viceversa.
- Siempre vaciar el tanque del humidificador al terminar de utilizarlo, y cuando se necesite transportarlo a otro lugar desmontar desde la tubería dispuesta en la parte trasera de la cámara climática, es el único modulo adicional, de la misma manera cambiar la pasta térmica del arreglo de celdas Peltier cada 6 meses principalmente del lado caliente de las celdas para asegurar una correcta disipación del calor.
- Aunque la cámara climática puede generar temperaturas mayores de 100 °C no es recomendable establecer dicha temperatura debido a que el ventilador dispuesto en la parte inferior de la cabina se utiliza para realizar la mezcla del aire en el interior, y tiene una temperatura máxima de funcionamiento de 90 °C por lo que si se sobrepasa esa temperatura podría provocar daños en el ventilador y para el reemplazo se requiere del desmontaje del material aislante colocado en la base y desoldar el soporte.

Trabajos Futuros

La competitividad con respecto al diseño de cámaras climáticas radica en la capacidad del sistema de generación de alcanzar los valores de temperaturas y humedades deseables lo más estable y uniformemente posibles, para esto se utilizan los diferentes mecanismos

expuestos en capítulos anteriores implementados de manera modular, sin embargo, el módulo diferenciador el cual representa al cerebro que comanda el funcionamiento de la cámara climática es el controlador, en el presente proyecto se exploró la utilización de un PLC debido a las características deseadas de movilidad, robustez y confiabilidad en la generación de un medio isoterma, una de las mejoras que se propuso para una versión futura de la cámara es realizar el diseño de un sistema embebido basado en microcontroladores dedicados para temperatura, humedad, control de potencia AC, potencia DC, así como el manejo de periféricos de entrada y salida de diferentes protocolos de comunicación. Otra de las opciones propuestas que se expuso como mejora futura fue el diseño de la interfaz HMI mediante la plataforma SCADA Ignition la cual basa su funcionamiento en un servidor central que sirve datos a cada uno de los clientes conectados mediante red, pudiendo ser estos PLCs de cualquier marca así como cualquier base de datos sin ningún límite, sin embargo esta aplicación dependerá totalmente de rango de generación de temperatura , humedad y de las dimensiones internas de la cámara climática.

Bibliografía

- Alzate, O., & Guerrero, J. (Septiembre de 2018). *DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN PROTOTIPO DE CONTROL DE HUMEDAD RELATIVA PARA UNA CÁMARA EXISTENTE EN EL LABORATORIO DE METROLOGÍA DE VARIABLES ELÉCTRICAS DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA*. Obtenido de UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA: <https://core.ac.uk/download/pdf/188427713.pdf>
- AniSalud. (2019). *LA HUMEDAD EN ESPACIOS DE TRABAJO, FACTOR DE RIESGO A EVITAR POR LOS EMPLEADOS*. Obtenido de Anis: Informadores de la Salud: <https://anisalud.com/actualidad/notas-de-prensa-anis/1862-la-humedad-en-espacios-de-trabajo-factor-de-riesgo-a-evitar-por-los-empleados>
- ASHRAE Handbook. (2014). *Load Calculation Applications Manual -SI Edition*. doi:978-1-936504-76-3
- ASHRAE Handbook. (2018). *Refrigeration -SI Edition*. doi:978-1-939200-98-3
- ASHRAE Handbook. (2021). *Fundamentals - SI Edition*. ASHRAE Research. doi:978-1-947192-90-4
- Benavides, P., & Carrasco, S. (2010). *Diseño y construcción de una cámara climatizada de temperatura y humedad para calibrar y certificar instrumentos de precisión comandada y monitoreada por PC [Tesis de pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/3057>
- Bernal, J. (18 de Octubre de 2012). *Despliegue de la función calidad (QFD): Guía de uso. Para qué sirve el QFD y cómo realizarlo*. Obtenido de <https://www.pdcahome.com/1932/qfd-despliegue-calidad/>
- Blatt, F. (1991). *Fundamentos de Física*. México: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.
- Cadena, Á., & Laguna, B. (2021). *Modernización de una máquina de fabricación artesanal de planchado textil para servicio en la ciudad de Otavalo - provincia de Imbabura [Tesis de*

- pregrado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE]. Repositorio Institucional.*
Obtenido de <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/25261>
- Calefacción Caloryrío.com. (21 de Enero de 2021). *Principio de funcionamiento de las calderas de condensación, por WOLF [archivo de video].* Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=XxcaOgFB4nY&ab_channel=Calefacci%C3%B3nCaloryfrio.com
- Çengel, Y., & Michael, B. (2011). *Termodinámica* (Séptima ed.). New York: McGraw-Hill/Interamericana. doi:978-607-15-0743-3
- Centro Español de Metrología. (2012). *VIM*. Obtenido de Vocabulario Internacional de Metrología: <https://www.cem.es/sites/default/files/vim-cem-2012web.pdf>
- Coluccio Leskow, E. (15 de Julio de 2021). *Temperatura*. Obtenido de Departamento de Física, Universidad de Buenos Aires. Blog: <https://concepto.de/temperatura/>
- De González, A. (s.f.). *Mil ideas de decoración*. Obtenido de TIPOS DE HUMIDIFICADORES. VAPOR FRÍO, CALIENTE, ULTRASÓNICOS...: <https://www.milideas.net/tipos-humidificadores>
- EMIS. (14 de Enero de 2022). *In, on and for Engineering Markets*. Obtenido de METROLOGOS ASOCIADOS DEL ECUADOR COMPAÑIA DE CALIBRACION METASDELECUADOR CIA.LTDA (ECUADOR): https://www.emis.com/php/company-profile/EC/Metrologos_Asociados_del_Ecuador_Compania_de_Calibracion_Metasdelecuardor_CiaLtda_es_4903650.html
- Escamilla, A. (2014). *Metrología y sus Aplicaciones*. México: Grupo Editorial Patria.
- Fernández, J. (2022). *Primera Ley de la Termodinámica*. Obtenido de FísicaLAB: <https://www.fisicalab.com/apartado/primer-principio-termo#vertambien>
- Ferrotec. (s.f.). *Referencia Técnica Termoeléctrica*. Obtenido de Thermal Ferrotec: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric-reference-guide/thermalref09/>

- Godoy, L. (2016). *Diseño, construcción y evaluación energética de una cámara con celdas Peltier (efecto termoeléctrico) para refrigeración de vacunas [Tesis de pregrado, Escuela Politécnica Nacional]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/16901/1/CD-7481.pdf>
- Gutiérrez, M., & Iturralde, S. (2017). *Fundamentos Básicos de Instrumentación y Control* (Primera ed.). Santa Elena: UPSE. doi:978-9942-8603-7-8
- ILAC. (10 de Julio de 2020). *Política sobre la trazabilidad de los resultados de medición*. Obtenido de International Organisation for Accreditation Bodies: https://ilac.org/latest_ilac_news/revised-ilac-p10-published/
- INEN. (9 de Octubre de 2018). *INEN destaca la importancia del Sistema Internacional de Unidades*. Obtenido de Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN: <https://www.normalizacion.gob.ec/inen-destaca-la-importancia-del-sistema-internacional-de-unidades/#:~:text=En%20Ecuador%20se%20adopt%C3%B3%20mediante,9%20de%20enero%20de%201974.>
- InfoPLC. (18 de Noviembre de 2015). *ISA101 Norma para el diseño HMI*. Obtenido de Estandars & Normativa & Legislacion: <https://www.infoplcn.net/actualidad-industrial/item/102902-isa101-hmi>
- INTI. (Agosto de 2015). *Procedimiento específico: PEC16*. Obtenido de CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS: <https://www.inti.gob.ar/publicaciones/descargac/448>
- INTI. (Agosto de 2015). *Procedimiento específico: PEC16 CALIBRACIÓN DE TERMOHIGRÓMETROS*. Obtenido de Instituto Nacional de Tecnología Industria: <https://docplayer.es/25025227-Procedimiento-especifico-pec16-calibracion-de-termohigrometros-copia-no-controlada-instituto-nacional-de-tecnologia-industrial.html>
- Ley 76. (29 de Diciembre de 2010). *Ley del Sistema Ecuatoriano de Calidad*. Obtenido de http://www.oas.org/juridico/PDFs/mesicic4_ecu_sistema.pdf

- Medina, J. (11 de Diciembre de 2019). 22. *¿Por qué una banda bimetálica se flexiona al cambiar su temperatura? [Archivo de video]*. Obtenido de https://www.youtube.com/watch?v=nxelg521NQc&ab_channel=JORGEENRIQUEMEDI NARIVEROS
- Moreno, J. (2020). *Evaluación de una celda de peltier como disipador de calor para un sistema fotovoltaico de concentración [Tesis de Grado]*. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://cio.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1002/1184/1/17854.pdf>
- Red Colombiana de Metrología. (5 de Diciembre de 2019). *Traducción Directriz DKD-R 5-7 Calibración de Cámaras Climáticas INM/GTM-T/03*. Obtenido de Instituto Nacional de Metrología de Colombia: https://www.inm.gov.co/web/wp-content/uploads/2019/12/Guia_DKDR5-7-2019.pdf
- SAE. (Abril de 2022). *Cómo acreditarse: laboratorios*. Obtenido de Servicio de Acreditación Ecuatoriano: <https://www.acreditacion.gob.ec/como-acreditarse-laboratorios/>
- SAE. (10 de Mayo de 2022). *Organismos acreditados por Sector y Actividad*. Obtenido de Servicio de Acreditación Ecuatoriano: <https://public.tableau.com/app/profile/servicio.de.acreditacion.ecuatoriano/viz/OrganismosacreditadosporSectorActividad/OECacreditadosporsectoryactividad>
- Segado, M., Ibarrola-Lacalle, J., Giménez-Gallego, J., & Torres-Sánchez, R. (2021). *Diseño y construcción de cámara climática controlada para reproducir episodios de transporte de mercancías perecederas [Artículo de XLII Jornadas de Automática de la Universidad Politécnica de Cartagena]*. Departamento de Automática, Ing. Eléctrica y Tecnología Electrónica, Cartagena. doi:978-84-9749-804-3
- Seguridad360. (9 de Enero de 2023). *Una guía completa para entender y aplicar las normas ASHRAE*. Obtenido de <https://revistaseguridad360.com/noticias/normas-ashrae/#:~:text=Las%20normas%20ASHRAE%20se%20utilizan%20para%20crear%20>

edificios%20c%C3%B3modos%20seguros,los%20edificios%20comerciales%20y%
20residenciales.

SensoresTOP. (19 de Noviembre de 2019). *Termómetro Higrómetro*. Obtenido de
https://sensores.top/termometro-higrometro/#Como_funcionan_los_higrometros

Solé, A. (2015). *Exactitud, precisión, incertidumbre, error y tolerancia*. Obtenido de
ASOLENGIN: [https://asolengin.files.wordpress.com/2015/08/exactitud-precisic3b3n-
incertidumbre-error-tolerancia.pdf](https://asolengin.files.wordpress.com/2015/08/exactitud-precisic3b3n-incertidumbre-error-tolerancia.pdf)

Wikipedia. (3 de Enero de 2023). *Refrigeración por absorción*. Obtenido de
https://es.wikipedia.org/wiki/Refrigeraci%C3%B3n_por_absorci%C3%B3n

Acrónimos

- SAE. Servicio de Acreditación Ecuatoriano
- OEC. Organismos Evaluadores de la Conformidad
- NTE. Norma Técnica Ecuatoriana
- INEN. Servicio Ecuatoriana de Normalización
- ISO. International Organization for Standardization
- IEC. International Electrotechnical Commission
- DIN. Instituto Alemán de Normalización
- EN. Norma Europea
- PEC. Procedimiento Específico de Calibración
- INTI. Instituto Nacional de Tecnología Industrial
- ANSI. American National Standards Institute
- UNE. Asociación Española de Normalización
- NEC. Norma Ecuatoriana de la Construcción
- ISA. International Society of Automation
- VIM. Vocabulario Internacional de Metrología
- OIML. Organización Internacional de Metrología Legal
- CIPM. Comité Internacional de Pesas y Medidas
- JCGM. Comité Conjunto para las Guías en Metrología
- ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
- RITE. Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios
- HVAC. Heating, Ventilating, Air Conditioned
- HR. Humedad Relativa
- IBC. Instrumento Bajo Calibración
- IR. Instrumento de Referencia

- QFD. Quality Function Deployment
- PI. Proporcional Integral
- PID. Proporcional Integral Derivativo
- SQ. Square
- IN. Inches
- FT. Feet
- MI. Mile
- CU. Cubic
- YD. Yard
- SI. Sistema Internacional
- BTU. Unidad Térmica Británica
- CRT. Coeficiente Resistivo de Temperatura
- PTC. Positive Temperature Coefficient
- NTC. Negative Temperature Coefficient
- RTD. Resistance Temperature Detector
- PWM. Pulse Width Modulation
- I2C. Inter-Integrated Circuit
- FBD. Function Block Diagram
- PLC. Programmable Logic Controller
- HMI. Human-Machine Interface

Apéndices

Apéndice A: Símbolos y Equivalencias de las Magnitudes y sus Unidades

Apéndice B: Factores de Conversión a SI

Apéndice C: Ficha Técnica de Lana de Vidrio

Apéndice D: Dimensiones de la Cámara Climática

Apéndice E: Datos Climáticos de Quito

Apéndice F: Ficha Técnica de celda Peltier TEC-12706

Apéndice G: Ficha Técnica de Disipador de Calor y Ventilador

Apéndice H: Ficha Técnica de Humidificador Marca Holmes

Apéndice I: Capacidad de Amperaje de Cables

Apéndice J: Diagrama Esquemático

Apéndice K: Diagrama de Borneras