



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO

ESCUELA DE POSGRADO

**DOCTORADO EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO
AMBIENTE**



TESIS

**TECNOLOGÍA PARA LA OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE
CALEFACCIÓN Y OTROS BENEFICIOS DE CONFORT DE
HABITABILIDAD DE UN PROTOTIPO DOMO EXPERIMENTAL
UTILIZANDO MATERIALES DE CAMBIO DE FASE (PCM) INSTALADO EN
LA CIUDAD DE URUBAMBA - CUSCO**

PRESENTADA POR:

MATEO ALEJANDRO SALINAS MENA

PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE:

DOCTORIS SCIENTIAE EN CIENCIA, TECNOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE

PUNO, PERÚ

2020



DEDICATORIA

- Mi más profundo dedicación y amor a mis hijos Eder, Elard, Rosario, Piero, a mis nietos Amy, Mateo y a mi esposa Sebina que son el motivo de mi felicidad, además de su comprensión y apoyo incondicional.
- A la memoria de mi abuelita Salomena pionera de mi fe en Dios como un acto más sublime y hermoso que hizo en mi vida y de mis padres Antonio y Constantina a quienes le debo mi existencia.

AGRADECIMIENTO

- A Jehová por darnos la vida y su bondad inmerecida cuando más lo necesité, por enseñarme a vivir en temor y brindarme el regalo de la sabiduría y fortaleza para enfrentar los problemas que nunca me faltaron, por enseñarme a caminar en justicia y amor por el camino correcto a seguir para crecer integralmente.
- Agradezco a la Escuela Posgrado de la Universidad Nacional del Altiplano por su apoyo para culminar mis estudios del doctorado en Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente a cuya universidad entregue mis esfuerzos de trabajo, dedicación y lealtad.
- Mi agradecimiento especial a los expertos: Dr. Manuel Domínguez Alonso, de la Universidad Complutense de Madrid, e Instituto del frío-España, y al Ing. Duberlis Correa Peña y Lillo. De la Universidad Nacional de Chile por sus asesoramientos en el desarrollo del presente proyecto. Así como a la Empresa Domos Perú: a los ingenieros Pablo Correa, Javier Velazco y Diego Sánchez, por el financiamiento realizado a través del proyecto FENCYT y mi participación como integrante del equipo investigador en el desarrollo del proyecto de calefacción realizado en la ciudad de Urubamba – Cusco y Mazocruz – Puno.
- Mi agradecimiento a los miembros integrantes del jurado calificador: Dr. Eusebio Benique Olivera, Dra. María Maura Salas Pilco y Dr. Leonidas Vilca Callata por sus apoyos y orientaciones y al Dr. Norman Jesús Beltran Castañon por su asesoramiento en el presente trabajo de investigación motivo de tesis.
- Un agradecimiento especial al Dr. Vladimiro Ibañez Quispe por su asesoramiento especial en el desarrollo de la presente tesis.
- A los docentes, colegas y compañeros del Doctorado como José Ramos, Omar Chaiña, Chura Acero, entre otros por compartir momentos de estudio que impulsan a lograr mi proyecto de vida, guardando una estima personal al Ing. José Ramos por su apoyo, aportes y dedicación para la concreción de la presente tesis.
- A mis amigos quienes fueron motivos de mi afecto, en especial a mi hermano de la fe Luciano Ojeda Tito, Berrios, Wuildo, Huaracha entre otros por el esfuerzo en el tipeado, colaboración y contribución para la culminación de la presente tesis.



ÍNDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE ANEXOS	xvii
ÍNDICE DE ACRÓNIMOS	xviii
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
INTRODUCCIÓN	1

CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico	2
1.1.1. El frio	2
1.1.2. Calefacción	3
1.1.3. Demanda energética en calefacción	4
1.1.4. Materiales de Cambio de Fase (PCMs)	6
1.1.5. Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la Climatización	7
1.1.6. Tipos de Materiales de Cambio de Fase	7
1.1.7. Características de los materiales de Cambio de Fase	9
1.1.8. Inercia térmica de la envolvente	10
1.1.9. Sistema de almacenamiento con cambio de fase (PCM)	12
1.1.10. Ventajas de los sistemas PCM	13
1.1.11. Energía solar	14
	iii



1.1.12. La Energía Solar Térmica	14
1.1.13. Enfoque de almacenamiento de Energía Térmica	15
1.1.14. Características del domo	17
1.1.15. Confort térmico	18
1.1.16. Parámetros del confort	20
1.1.17. Temperatura del aire	20
1.1.18. Humedad relativa	21
1.1.19. Curvas de confort	22
1.1.20. Teoría del balance térmico	23
1.1.21. Origen del modelo estático	23
1.1.22. Consumo eléctrico	24
1.1.23. Consumo de combustible fósiles	25
1.1.24. Almacenamiento y transporte de energía térmica	25
1.1.25. Almacenamiento de calor Sensible	26
1.1.26. Almacenamiento térmico de calor latente	28
1.1.27. Regresión lineal múltiple	29
1.1.28. Multicolinealidad	31
1.1.29. Análisis de los residuos	33
1.1.30. Heteroscedasticidad estimación MCG	35
1.1.31. Multicolinealidad	36
1.1.32. Normalidad De Las Perturbaciones	37
1.2. Antecedentes	38

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema	45
2.2. Enunciados del problema	48



2.2.1. Problema general	53
2.2.2. Problemas específicos	54
2.3. Justificación	54
2.3.1. Sustento de Mercado del producto (bien o servicio)	55
2.3.2. Innovación Tecnológica y/o productiva	56
2.4. Objetivos	58
2.4.1. Objetivo general	58
2.4.2. Objetivos específicos	58
2.5. Hipótesis	59
2.5.1. Hipótesis general	59
2.5.2. Hipótesis específicas	60

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio	61
3.1.1. Ubicación Geográfica	61
3.1.2. Disponibilidad y accesibilidad del lugar	63
3.1.3. Actividad turística	63
3.1.4. Datos climatológicos	64
3.1.5. Descripción de la vivienda, Prototipo “Domo experimental”	73
3.2. Población	76
3.2.1. Población	76
3.3. Muestra	76
3.3.1. Análisis y procesamiento de datos de las variables de estudio	77
3.3.2. Resumen de registro de datos según variables experimentales	79
3.4. Método de investigación	80
3.4.1. Diseño de investigación	80



3.4.2. Procedimiento de investigación	81
3.4.3. Diseño experimental	83
3.4.4. Descripción de la operación del sistema de calefacción	126
3.4.5. Resultados experimentales	130
3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos	134
3.5.1. Formulación matemática para determinar la temperatura (T_i) y humedad Relativa (HR_i) en el interior de un domo experimental según la variación dinámica de las condiciones ambientales en la ciudad de Urubamba – Cusco	134
3.5.2. Análisis estadístico del modelo de regresión múltiple de la temperatura (T_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo	142
3.5.3. Prueba de hipótesis de la bondad del modelo de regresión linealizado para la temperatura y humedad relativa interior del domo	155
3.5.4. Prueba de hipótesis de significación de la regresión o prueba f de significación grupal de la temperatura interior	156
3.5.5. Prueba de hipótesis de los coeficientes de regresión individual linealizada de la temperatura interior del domo (T_i)	160
3.5.6. Prueba de hipótesis de coeficientes de regresión linealizado de la humedad relativa interior del domo (HR_i)	164
3.5.7. Prueba de hipótesis “t”-student de significación individual	167
3.5.8. Conclusión de la prueba de hipótesis de los coeficientes de regresión linealizado de la humedad relativa interior del domo (HR_i)	170

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del balance energético del domo experimental	172
4.1.1. Pérdidas térmicas totales de calor	172
4.1.2. Demanda térmica de calor (Q_d)	174
4.1.3. Aportes u ofertas de calor	176
4.1.4. Balance Energético	177



4.2. Análisis de la regresión lineal múltiple de la temperatura (t_i) y humedad relativa (HR _i) en el interior del domo	178
4.2.1. Análisis de la regresión lineal múltiple de la temperatura (t_i) en el interior del domo	178
4.2.2. Análisis de la regresión lineal múltiple de la humedad relativa interior del domo (HR _i)	192
4.3. Análisis del diseño factorial compuesto 2^3 de la temperatura (t_i) y humedad relativa (r _{hi}) en el interior del domo.	205
4.3.1. Análisis del diseño factorial compuesto 2^3 de la temperatura de la interior del domo (Ti)	205
4.3.2. Análisis del diseño factorial Compuesto 2^3 de la humedad relativa interior del domo (HR _i)	212
4.3.3. Resultados del modelo completo y simplificado utilizando el programa de diseño experto	218
4.4. Análisis y discusión del estudio económico y reducción del impacto ambiental.	233
4.4.1. Cálculo del espesor óptimo económico del aislamiento térmico del polietileno reticulado ($E_{PER,OP T:}$)	233
4.4.2. Estudio económico de la rentabilidad del material de cambio de fase PCM23	245
4.4.3. Análisis y discusión del ahorro energético y reducción del impacto ambiental	252
4.5. Resumen de resultados	263
4.5.1. Resumen de resultados del balance energético	263
4.5.2. Resumen de resultados obtenidos del diseño de regresión lineal múltiple	265
4.5.3. Resumen de resultados obtenidos del diseño factorial compuesto 2^3	271
4.5.4. Resumen de resultados y discusión del estudio económico, ahorro energético y reducción del impacto ambiental	277



CONCLUSIONES	279
RECOMENDACIONES	284
BIBLIOGRAFÍA	286
ANEXOS	291

Puno, 16 de enero de 2020

ÁREA: Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente.

TEMA: Innovación Tecnológica.

LÍNEA: Impacto Tecnológico y ambiental.

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
1. Comparación entre los distintos medios de almacenamiento de energía.	7
2. Resumen del reglamento sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajos (Real Decreto 486/1997)	20
3. Intervalos óptimos de temperatura en actividades sedentarios (Easman Kodak Company)	21
4. Intervalo óptimo de temperaturas en actividades sedentario (Grandjean)	21
5. Cantidad máxima de vapor de agua por m ³ de aire, en función de la temperatura	22
6. Consumo de combustibles fósiles	25
7. Almacenamiento y transporte de energía térmica Propiedades físicas de algunos materiales de almacenamiento de calor sensible.	27
8. Atributos, características y novedades tecnológicas	58
9. Valores medios diarios mensuales de radiación solar en el Cusco	65
10. Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m ² /day)	66
11. Monthly Averaged Air Temperature At 10 m Above The Surface Of The Earth (°C)	67
12. Valores promedio de temperatura ambiental del día y noche medidos en los meses de friaje 2015.	68
13. Promedio de Humedad Relativa mensual en %	70
14. Presión atmosférica promedio mensual en KPa.	70
15. Valores promedio medido de humedad relativa ambiental de día y noche de los meses de friaje 2015.	71
16. Propiedades del aire a diferentes presiones, dependiente de la altura sobre el nivel del mar.	71
17. Velocidad de viento promedio mensual en (m/s)	73
18. Promedio de Precipitación mensual (mm/día)	73
	ix



19. Resumen de registro de datos según variables.	80
20. Resumen de Resultados de los parámetros del flujo de aire en su recorrido por la cámara de aire y el interior del domo.	94
21. Ángulo de inclinación según latitud	96
22. Consumo de carga DC	102
23. Consumo de carga AC	103
24. Resumen de resultados de la cantidad de PCM23 requerido para satisfacer la demanda térmica de calefacción del domo.	125
25. Temperatura (Mayo 20 Al 31: 2015)	131
26. Temperatura (Junio 2015)	132
27. Temperatura (Julio 2015)	133
28. Datos ajustados linealizadas de la temperatura interior y sus parámetros estadísticos	144
29. Datos ajustados linealizados de la humedad relativa interior y sus parámetros estadísticos	150
30. Análisis de varianza del modelo completo de la temperatura interior	157
31. Análisis de varianza para el modelo completo de la humedad relativa interior	165
32. Perdidas térmicas totales de calor	172
33. Pérdidas térmicas por transmisión de calor	173
34. Temperatura ambiental media mensual y trimestral durante la noche de los meses de friaje de la ciudad de Urubamba – Cusco.	175
35. Demanda térmica de calefacción mensual y trimestral.	176
36: Aportes de calor según variación de la cantidad de placas del acumulador PCM23 y porcentaje de licuación	177
37. Balance energético: Entre el aporte y demanda térmica de calor y autonomía para 60 placas del acumulador PCM23.	178
38. Análisis de regresión para el modelo completo: y_1 LN vs. x_1 LN, x_2 LN, x_3 LN, x_4 LN, x_5 LN	180



39. Análisis de varianza del ajuste realizado con el modelo completo para la temperatura interior domo.	182
40. Análisis de varianza del modelo simplificado de la temperatura interior del domo	183
41. Análisis de regresión para el modelo simplificado: y_1 LN vs. x_1 LN, x_2 LN, x_4 LN	184
42. Intervalos de confianza de los coeficientes de regresión y residuales - parámetros estadísticos de la temperatura interior (T_i)	189
43. Análisis de regresión del modelo completo para humedad relativa: y_2 LN vs. x_1 LN, x_2 LN, x_3 LN, x_4 LN, x_5 LN	194
44. Resumen del análisis de varianza del ajuste realizado con el modelo completo para la humedad relativa interior del domo	196
45. Análisis de regresión para el modelo simplificado de la humedad relativa interior: y_2 LN vs. x_1 LN, x_2 LN, x_4 LN	197
46. Resumen de los resultados del ANOVA del modelo simplificado para la humedad relativa interior del domo.	198
47. Intervalos de confianza de los coeficientes de regresión, residuales y parámetros estadísticos de la humedad relativa interior (HRi) para el modelo linealizado simplificado	202
48. Análisis de varianza obtenida para la temperatura interior del Domo del modelo completo	206
49. Resúmenes del ANOVA del ajuste para el modelo completo	207
50. ANOVA del diseño factorial compuesto 23 del Modelo Simplificado del T_i	209
51. Análisis de varianza de ajuste realizado con el modelo simplificado	210
52. Análisis de varianza obtenidos para la humedad relativa interior del Domo del modelo completo.	212
53. Análisis de varianza del modelo ajustado significativo para la humedad relativa interior del Domo	214



54. Resumen del ANOVA del modelo ajustado significativo para la humedad relativa interior del Domo.	215
55. Datos en variables codificadas y variable respuesta de la temperatura y1	219
56. Suma de cuadrados del modelo secuencial	220
57. Resumen de parámetros estadísticos del modelo	221
58. Prueba por falta de ajuste	221
59. Análisis de varianza de la temperatura interior del domo para el modelo completo	222
60. Parámetros estadísticos del modelo completo	222
61. Análisis de varianza para la temperatura del modelo simplificado	223
62. Parámetros estadísticos de la temperatura del modelo simplificado	223
63. Valores óptimos en variables codificadas y naturales de la temperatura interior	223
64. Datos en variables codificadas y variable respuesta de la humedad relativa y2	226
65. Suma de cuadrados del modelo secuencial	227
66. Resumen de parámetros estadísticos del modelo	227
67. Prueba por falta de ajuste	228
68. Análisis de varianza de la humedad relativa para el modelo completo	228
69. Análisis de varianza de la humedad relativa del modelo simplificado	229
70. Parámetros estadísticos de la humedad relativa del modelo simplificado	230
71. Valores óptimos en variables codificadas y naturales de la humedad relativa	230
72. Costo de Inversión del aislante térmico del PER (CI)	233
73. Tarifa de precios: PER	235
74. Cálculo del Espesor económico del PER	241
75. Resumen del espesor óptimo de PER	242
76. Costo de los equipos de Generación fotovoltaica	250
77. Costos principales del sistema de generación fotovoltaica	251



78. Costos principales de la antena satelital	251
79. Resumen de la distribución de temperatura y demanda térmica promedio diario mensual y trimestral de la noche para los meses de friaje (mayo, junio y julio) del periodo 2015.	253
80. Demanda térmica de los 3 meses de friaje sin y con PCM, ahorro energético y económico promedio diario y trimestral para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.	254
81. Demanda térmica sin y con PCM, ahorro energético y económico obtenido durante el friaje del 2015.	256
82. Demanda térmica del mes de mayo, sin y con PCM, ahorro energético y económico, promedio diario y mensual para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.	257
83. Demanda térmica del mes de junio, sin y con PCM, ahorro energético y económico, promedio diario y mensual para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.	258
84. Demanda térmica del mes de julio, sin y con PCM, ahorro energético y económico, promedio diario y mensual para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.	258
85. Factores de emisión referencial del mix eléctrico español del periodo 2010	259
86. Ahorro de emisiones de diversos gases contaminantes del domo experimental de los meses de friaje del periodo 2015, para %L de: 100% y 74.44%.	260
87. Emisiones de gases y partículas contaminantes sin el uso de PCM para porcentajes de licuación de 100% y 74.44%.	261
88. Ahorro de emisiones de diversos gases contaminantes del domo experimental de los meses de friaje del periodo 2015 para porcentajes de licuación del 100% y 74.44%.	261
89. Calculo del ahorro de emisiones de CO ₂ con PCM respecto al uso de gas natural para calefacción.	262
90. Balance térmico del sistema de calefacción promedio diario, mensual y trimestral durante la noche de los meses de mayo, junio y julio del periodo 2015.	263



91. Balance térmico para el caso de turismo del sistema de calefacción promedio diario, mensual y trimestral durante la noche de los meses de friaje periodo 2015.	265
92. Términos más significativos de variabilidad de cada variable respuesta obtenida del Diseño de regresión Lineal Múltiple	268
93. Resumen de los resultados obtenidos para los ajustes realizados para cada variable respuesta del modelo de regresión Múltiple linealizado.	269
94. Términos más significativos de variabilidad de cada variable respuesta obtenido del diseño factorial compuesto 2^3 .	272
95. Resumen de Resultados obtenidos para los ajustes realizados para cada variable respuesta del diseño factorial compuesto 2^3 del modelo simplificado.	274
96. Valores relacionados entre la temperatura (T_i) y Humedad Relativa (HR_i)	277



ÍNDICE FIGURAS

	Pág.
1. Clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico.	8
2. Muestra la relación entre la temperatura y calor de fusión para los PCM disponibles	9
3. Aplicaciones más usuales de PCM en edificación.	9
4. Comportamiento de viviendas construidas con envolventes de distintas inercia térmica (inercia 1 < inercia 2)	11
5. Perfil de temperatura en función del calor suministrado	12
6. La comparación entre SHS y LHS, DHF es el calor latente de fusión durante la fusión. T_M es la temperatura de fusión.	17
7. Zenit traslucida PCM45	18
8. Curva de confort (P.O. Fanger)	23
9. Esquema de almacenamiento de energía térmica	26
10. Áreas de interpretación de la prueba de Durbin-Watson	32
11. Mapa de provincia de Urubamba.	62
12. Distribución de planta del domo experimental	75
13. Circuito térmico del domo experimental	84
14. Esquema de proceso de generación fotovoltaica	106
15. Diseño del acumulador solar	107
16. Proceso de circulación con aire en el domo experimental	126
17. Gráfica temperatura mes mayo de diferentes ambientes del domo durante las 24 horas	131
18. Gráfica temperatura mes junio de diferentes ambientes del domo durante las 24 horas	132
19. Gráfica temperatura mes julio de diferentes ambientes del domo durante las 24 horas	133



20. Varianza en función de las fuentes de variabilidad.	181
21. Gráfica de residuos de la temperatura interior del domo	186
22. Varianza en función de las fuentes de variabilidad.	195
23. Valor de la varianza en función de las fuentes de la variabilidad relativa a la temperatura interior del Domo.	208
24. Valor de la varianza en función de las fuentes de la variabilidad con relación a la humedad relativa interior del domo.	213
25. Gráfico de residuos de la humedad relativa	216
26. Criterios para y_1	224
27. Criterios para y_2	231
28. Gráfica de superficie de respuesta de la Hri	232
29. Gráfica de Costos versus espesor del PER	244
30. Periodo de pago de amortización y beneficio económico	249
31. Ahorro de emisiones de CO ₂	260



ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
1. Mapa de potencial energético de radiación solar del Perú	291
2. Plano n° 01 ensamblaje del domo experimental	292
3. Plano n° 02 detalle general de uniones de la estructura	293
4. Plano n° 03 unión base derecha detalle H	294
5. Plano n° 04 unión base hexágono detalle I	295
6. Plano n° 05 unión base izquierda detalle G	296
7. Plano n° 6 base del domo: madera	297
8. Plano n° 07 estructura de la puerta	298
9. Plano n° 08 tubo de contorno	299
10. Plano n° 09 tubo de hexágono	300
11. Plano n° 10 tubo de pentágono	301
12. Plano n° 11 unión de contorno	302
13. Plano n° 12 unión de hexágono	303
14. Plano n° 13 unión de pentágono	304
15. Plano n° 14 cubierta de la puerta	305
16. plano n° 15 materiales	306
17. Grafica temperatura vs tiempo promedio diario	309
18. Grafica de temperaturas vs tiempo promedio trimestral	310
19. Datos meteorológicos de promedios de temperatura	311
20. Dato meteorológico promedio de humedad relativa	312



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

PCMs	: Materiales de cambio de fase
TES	: Acumulares de energía térmica
T _f	: Temperatura de fusión
T _i	: Temperatura interior
HR _i	: Humedad relativa interior
R	: Resistencia térmica
C	: Capacidad térmica
Q _d	: Demanda térmica de calor
QL	: Calor latente de fusión
Q _s	: Calor sensible
Δ T	: Diferencia de temperatura entre exterior e interior (salto térmico)
UG	: Coeficiente global de transferencia de calor
PER	: Polietileno Reticulado (Material aislante)
Nu	: Número adimensional Nuselt
Pr	: Número adimensional prandal
h	: Coeficiente convectivo de calor

RESUMEN

En este trabajo de investigación de tesis se ha realizado la climatización de un prototipo “domo experimental”, en zonas de friaje y heladas para gran altitud con el fin de albergar turistas con confort térmico y/o atención de damnificados por desastre naturales. Se basa en captar la energía solar mediante acumulares térmicos (TES) con materiales de cambio de fase (PCM), usando como vehículo transportador el aire. El domo experimental de 50 m² de base se instaló en la ciudad Urubamba- Cusco, en el cual se ha diseñado todas las componentes del sistema de calefacción, que permitió analizar el comportamiento del aislamiento térmico y los materiales y equipos utilizados. Los resultados del pilotaje se obtuvieron durante tres meses de friaje: mayo, junio y julio del año 2015, cuya investigación realizada es aplicada semi empírico y explicativo de tipo correlacional, para lo cual se realizó el balance de cargas térmicas, determinándose los modelos matemáticos, mediante regresión lineal múltiple, y diseño factorial rotacional 2³, lo que permitió determinar los valores óptimos de temperatura (T_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo, en función de la variación dinámica en el tiempo de los parámetros ambientales y de diseño. Los resultados de las mejoras del prototipo experimental se usaron para realizar el diseño final del “Domo Comercial”. Para el presente proyecto se evaluó su viabilidad técnica económica que permitió determinar su rentabilidad aplicando el método Payback, cuya recuperación de capital del PCM fue de tres años y medio; se evaluó también el ahorro energético y la reducción del impacto ambiental. Finalmente se buscó en el proyecto financiado por el FENCYT mediante la empresa “Domos Perú” que los domos deben tener un rápido armado y desarme en paquetes livianos para su utilización.

Palabras clave: Climatización, diseño del sistema de calefacción, energía térmica, materiales de cambio de fase, modelamiento matemático y optimización.

ABSTRACT

In this thesis research work has been carried out the air conditioning of a prototype "experimental dome", in cold and freezing zones for high altitude in order to house tourists with thermal comfort and / or care of victims of natural disasters. It is based on solar energy by thermal accumulation (TES) with phase change materials (PCM), using air as transport vehicle. The experimental dome of base 50 m² was installed in the city of Urubamba-Cusco, in which all the components of the heating system were designed, which allowed to analyze the thermal insulation behavior and the materials and equipment used. The results of the piloting were obtained during three months of friaje: May, June and July 2015, whose research is applied semi-empirical and explanatory correlational type, for which the balance of thermal loads was performed, determining mathematical models, using multiple linear regression, and rotational factorial design 2³, which allowed determining the optimal values of temperature (Ti) and relative humidity (HRi) inside the dome, as a function of the dynamic variation over time of the environmental and design parameters. The results of the experimental prototype improvements were used to make the final design of the "Do For this project, its economic technical viability was evaluated, which allowed to determine its profitability by applying the Payback method, whose capital recovery was three and a half years, as well as evaluating the energy saving and the reduction of the environmental impact. Finally, the project financed by the FENCYT was sought through the company "domos Peru" that the domes must have a quick assembly and disarmament in light packages for their use.

Keywords: Air conditioning, heating system design, modeling and optimization, phase change materials, thermal energy.

INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, la estación climática fue diferente con respecto a los años anteriores en la ciudad de Urubamba-Cusco, durante la estación de invierno, en las zonas altas de la región de Cusco se han presentado cambios climatológicos muy bruscos, el cual está relacionado con el descenso de las temperaturas hasta condiciones extremas, llegando incluso a registrarse temperaturas por debajo de los 0°C.

Para hacer frente a esta amenaza que se repite todos los años, se propuso una alternativa de solución de larga duración y técnicamente viable para la zona como es el almacenamiento de energía solar térmica (TES) con material de cambio de fase (PCM), que poseen la capacidad de almacenar calor latente proveniente del sol y/o ceder durante las horas de la noche o en las horas que no hay sol.

La tesis ha sido estructurada de cuatro capítulos, en el primer capítulo aborda el tema de la revisión de literatura, está referido al marco teórico, luego se hace un resumen de algunos antecedentes de investigación, en seguida el marco conceptual es un componente importante de este capítulo donde se definen el significado con el que utilizan algunos términos de uso frecuente en la investigación.

El segundo capítulo corresponde a la identificación, planteamiento y formulación del problema, justificación, objetivos y termina con la formulación de las hipótesis.

El tercer capítulo corresponde a la metodología de la investigación. En este capítulo se determina con claridad el tipo y diseño de investigación, se define la población y la muestra de estudio, las técnicas e instrumentos de investigación, el procedimiento de los ensayos realizados, y las técnicas de tratamiento de datos y la relación de equipos y materiales utilizados.

El cuarto y último capítulo contiene el análisis de resultados y discusión, donde se da a conocer los hallazgos de investigación, con el apoyo de gráficos y tablas, que son descritos, analizados y discutidos. Finalmente se dan a conocer las conclusiones que se formulan de acuerdo a los objetivos, hipótesis y recomendaciones a las que se arribaron. En el anexo se consideran los modelos, diseños y desarrollados de los instrumentos de investigación utilizados para el proceso de calefacción.



CAPÍTULO I

REVISIÓN DE LITERATURA

1.1. Marco teórico

1.1.1. El frío

Se define como: “Ausencia de calor” sin embargo la definición del frío, el calor no existe o no está presente cuando ocurre este fenómeno. Hasta que se demuestre lo contrario. La energía transitoria en su forma conocida como calor, es un concepto un tanto abstracto, que, aunque no se ve físicamente, se puede sentir.

El concepto de la energía transitoria en forma de calor cuando es recibida o emitida por el cuerpo humano la cual activa el sistema termorregulador haciendo que una persona sienta “calor” o “frío”, respectivamente.

Los ingenieros mecánicos utilizan estos conceptos y los relacionan al diseño de los sistemas de climatización de edificaciones y medios de transporte con la finalidad de lograr la comodidad térmica en las personas que ocupan esos espacios. Así también, el cuerpo humano, incluyendo el del resto del reino animal, puede discriminar sobre lo caliente o frío. En el primer caso, cuando sentimos que un cuerpo está caliente se debe a que ese cuerpo tiene mayor temperatura que el de la piel, o sea, que recibimos el calor, mientras que cuando lo sentimos frío, la temperatura de nuestro cuerpo es mayor que el otro y le estamos transmitiendo calor.

La pérdida insuficiente o ganancia de calor excesiva de calor tiende a un sobrecalentamiento del cuerpo (hipertermia), y una pérdida excesiva de calor resulta en un enfriamiento excesivo del cuerpo (hipotermia). Así, cuando el cuerpo está recibiendo más calor de lo normal al exponerlo ante un cuerpo que se encuentra a

mayor temperatura, el sistema termo regulador nos hace sentir “calor”, como una señal de esta irregularidad. Del mismo modo, si estamos expuestos a un cuerpo o ambiente que se encuentra a menor temperatura que la del cuerpo, expeditos mayor cantidad de calor de lo normal y el sistema termorregulador nos hace sentir “frío”. Como vemos pues, en ambos casos son sensaciones fisiológicas para indicarnos la anomalía en la transferencia de calor entre el cuerpo y su entorno (Jiménez, 2014).

Este fenómeno se debe a que cuando el cuerpo se expone a temperaturas muy bajas pierde más calor del que es capaz de generar, y los vasos sanguíneos de la piel se contraen para conservar la temperatura corporal. La composición de la sangre también cambia con el frío. Así, el corazón tiene que trabajar con más fuerza para bombear la sangre a través de los vasos contraídos, a la vez que los cambios en la concentración sanguínea aumentan el riesgo de coágulos y de los problemas que provocan (Parra, 2003).

1.1.2. Calefacción

Según Ampuero (2010), define como “la forma de calentar espacios helados habitados por personas. Siendo su objetivo central regular la pérdida de calor del cuerpo humano durante las épocas frías del año, calentando el ambiente con el fin de establecer un equilibrio térmico entre el cuerpo y el ambiente que le rodea para así obtener el máximo bienestar fisiológico y térmico”.

Dentro de un adecuado sistema de calefacción se deben cumplir con ciertas condiciones:

- a) La temperatura ambiente sensitiva dentro del espacio a calefaccionar debe ser uniforme, ya sea en sentido vertical como horizontal, debiendo mantener una temperatura de 20 a 30° C durante su funcionamiento, con una variación más o menos de 1° C.
- b) La temperatura sensitiva de la calefacción debe poder regularse entre determinados límites, dicha regulación debe tener la menos inercia posible, es decir debe conseguir una rápida respuesta.
- c) La calefacción no debe empeorar el aire del espacio a calefaccionar, es decir no debe producir polvo, gases tóxicos, vapores ni ocasionar ruidos molestos.

- d) El sistema de calefacción debe ser económico en su instalación, funcionamiento y mantención.

Consideraciones generales:

- Dado que en el proyecto original tanto el consumo de calefacción como el de servicios están considerados dentro de lo que es la caldera, ambos consumos se trabajarán juntos y en consecuencia las proposiciones incluirán los dos casos.
- Se analizarán tres proposiciones de calefacción y servicios: Instalación solar térmica de paneles para líquido y apoyo auxiliar de caldera tradicional, bomba aerotérmica monovalente (sin apoyo auxiliar) y caldera de condensación.
- El uso de paneles solares térmicos para aire se dejará de lado ya que estos no se comercializan dentro del mercado nacional. Esto se debe principalmente a su bajo costo, por lo que no resulta atractivo para las empresas su comercialización.
- Para las bombas de calor se descartará el uso de bombas geotérmicas por los siguientes motivos.

Calefacción es el método o sistema, mediante el cual se aporta calor a alguien o algo con el fin de mantener o elevar su temperatura. Se puede mencionar que, son las acciones que se pueden llevar a cabo sobre el clima interior, o como se ha visto, los parámetros externos a las personas para alcanzar un determinado nivel de confort, y por otro lado, la calefacción es el conjunto de medios que disponen para alcanzar dicho nivel de confort.

Los radiadores, por lo general se sitúan bajo las ventanas, compensando así la pérdida de calor producida por los cristales, y para mejorar (por convección) la distribución de calor en el ambiente (Martinez, 2012).

1.1.3. Demanda energética en calefacción

Según Loyola (2012), cita a Nch 853 Of 2001, algunos conceptos necesarios para obtener el gasto energético en las viviendas.

- **Conductividad térmica, λ :** Cantidad de calor que, en condiciones estacionarias, pasa en la unidad de tiempo a través de la unidad de área de muestra de material homogéneo de extensión infinita, de caras planas y paralelas y de espesor

unitario, cuando se establece una diferencia de temperatura unitaria entre sus caras. Se expresa en $(W/°Km)$.

- **Resistencia térmica, R:** oposición al paso de calor que presentan los elementos de construcción en condiciones unitarias. Se expresa en $(m^2°K/W)$

Para una capa de caras planas y paralelas, de espesor e , conformadas por un material homogéneo de conductividad térmica λ , la resistencia térmica R , queda dada por:

$$R = \frac{e}{\lambda} \quad \dots\text{Ecuación (1)}$$

Para un elemento compuesto, la resistencia total es la suma de las resistencias de las capas que conforman el elemento más las capas de aire. También es el inverso de la transmitancia térmica del elemento.

$$R_T = \sum R_i = \frac{1}{U} \quad \dots\text{Ecuación (2)}$$

Transferencia térmica, U: Flujo de calor que pasa por unidad de superficie de elemento y por grado de diferencia de temperaturas entre los dos ambientes separados por dicho elemento. Se expresa en $(W/ m^2°K)$.

Las infiltraciones de aire pueden ser calculadas por:

$$Q = \frac{A_L}{1000} \sqrt{C_s \Delta t + C_w V^2} \quad \dots\text{Ecuación (3)}$$

Donde:

Q = Infiltraciones de aire (m^3/s)

A_L = Área total efectiva de fugas de la vivienda

C_s = Coeficiente de encajonamiento $((L/s)^2/(cm^4/°K)$

Δt = Diferencia de temperatura entre exterior e interior ($°K$)

C_w = Coeficiente que depende del viento $((L/s)^2/(cm^4/(m/s)^2)$

V = Velocidad promedio del viento

Luego se puede obtener el número de renovaciones de aire (n) como sigue:

$$n = \frac{Q * 3600}{Volumen}$$

...Ecuación
(4)

n = Renovación de aire por hora

1.1.4. Materiales de Cambio de Fase (PCMs)

Los materiales que almacenan energía en cambio de fase, se caracterizan por un punto de fusión muy alto y sus temperaturas de operación generan transiciones en sus fases, procurando así las características en estos sistemas de almacenamiento energético y su consecuente liberación.

Los almacenadores en cambio de fase actúan como materiales retenedores de calor latente, también se ha demostrado, que sistemas con estructura orgánica, soportan muchos ciclos de fusión y solidificación no se sub enfrían. Los sistemas que almacenan energía con base en materiales de cambio de fase, lo hacen en cambios de sólido a líquido, esto debido a la gran densidad de almacenamiento que se puede dar a temperaturas constantes durante el proceso de fusión de los materiales, en este proceso se almacena la energía, para luego ser liberada en la solidificación (Ochoa, 2016).

Las sustancias almacenadoras de energía en cambio de fase son bastantes numerosas, los rangos de temperatura entre sustancias varían con su naturaleza, presentan elevado calor latente de fusión, cambios de volúmenes bajos entre fases, calores específicos altos, conductividades térmicas buenas, que hacen de estas sustancias potenciales reservorios de energía en fase líquida y buenos sistemas a la hora de transferir la energía a su entorno.

Los átomos en la fase líquida presentan mayor energía que en la fase sólida, por ende, cuando un sólido funde, debe adquirir una gran cantidad de energía, para superar fuerzas de atracción, que son las que mantienen estable la fase sólida. Esta energía, es el calor latente de cambio de fase L y representa una diferencia térmica, o lo que se llama entalpía de fases, líquido – sólido, y para solidificar, se tendrá que hacer cadencia de toda esta energía, para que los átomos recuperen su estabilidad (Alexiades & Solomon, 1993)

Tabla 1

Comparación entre los distintos medios de almacenamiento de energía.

Propiedad	Rocas	Agua	PCMS	PCMS
Densidad (kg. /m ³)	2240	1000	800	1600
Calor específico (kJ/kg.) Calor	1.0	4.2	2.0	2.0
Calor Latente (kJ/kg.)	-	-	190	230
Calor Latente (kJ/m ³)	-	-	252	368
Masa de almacenamiento por Cada 106 J (kg.)	67000	16000	5300	4350
Volumen de almacenamiento por cada 106 J (m ³)	30	16	6.6	2,7

Fuente: Mecía Gómez, Andrés Felipe. *Almacenamiento de Energía Solar Térmica Usando Cloruro de Magnesio Hexahidratado*. Tesis de Maestría. Medellín. Universidad Nacional de Colombia Medellín. Facultad de Minas, 2007.

1.1.5. Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la Climatización

Domínguez y García (2009), describe que las diversas instalaciones de climatización en donde se han incorporado de forma satisfactoria los materiales de cambio de fase (PCM), y se estudian diversos tipos de instalaciones tanto con sistemas de producción de energía térmica, como las que aprovechan el frío gratis del aire de forma directa (free cooling) o indirecta mediante sistemas evaporativos, o los que aprovechan calores residuales o cogeneración. Considerando las múltiples posibilidades que presentan los PCM, se concluye que su empleo se generalizará en el futuro.

Se puede comprender que el empleo de materiales de cambio de fase a temperaturas más altas de las del hielo, tendrá muchas ventajas técnicas y conducirá a reducir los gastos de explotación muy considerablemente y aumentar la eficiencia en las instalaciones de climatización (Domínguez y Colubret, 2005, citado por Domínguez y García, 2009).

1.1.6. Tipos de Materiales de Cambio de Fase

Los materiales de cambio de fase líquido-sólido más comunes en el rango de temperaturas 20 °C y 80 °C son las ceras de parafina, sales hidratadas, mezclas eutécticas y ácidos graso (Ramírez, 2009).

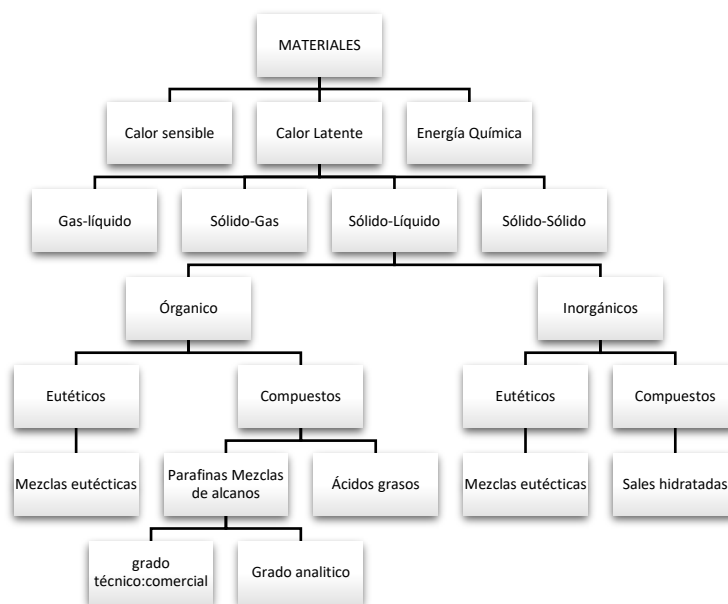


Figura 1. Clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico.

Fuente: Abhat (1983).

- **Ceras de parafina:** están disponibles en el mercado, pero su calor latente (hasta 200 kJ/kg.) es sólo la mitad del de las sales hidratadas.
- **Sales hidratadas:** son más baratas que las ceras de parafina y también están disponibles en el mercado, pero tienen algunas desventajas como las bajas temperaturas de fusión o la corrosión en contacto con metales.

Mezclas eutécticas: son los que intervienen en dos componentes con punto de fusión (solidificación) más bajo que el que poseen los compuestos individualmente. Esto hace que la mezcla alcance el punto de congelación más baja posible y ambos se solidifiquen a esa temperatura eutéctica. Un ejemplo de ello es la mezcla de sal con hielo, que se explica en el Anexo C de Definiciones.

- **Ácidos grasos:** al igual que las ceras de parafina, un calor latente de aproximadamente 200 kJ/kg, pero son más caros. Abhat (1978) y Himran (1994) muestran una evaluación global muy buena de los diversos materiales de cambio de fase.

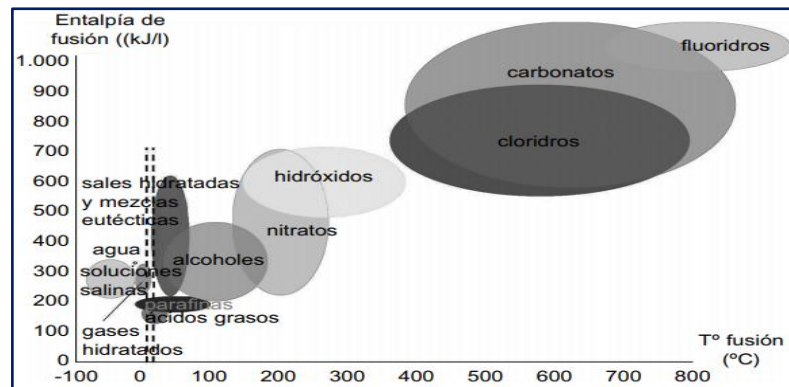


Figura 2. Muestra la relación entre la temperatura y calor de fusión para los PCM disponibles.

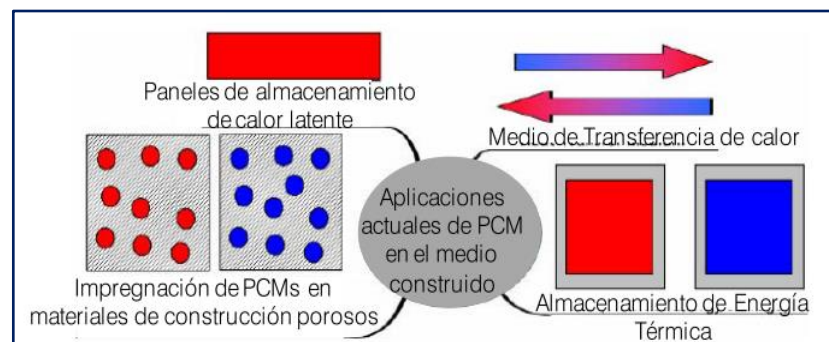


Figura 3. Aplicaciones más usuales de PCM en edificación.

Fuente: Durabuild (2005).

1.1.7. Características de los materiales de Cambio de Fase

Ramírez (2009): Las principales características a cumplir por un PCM para almacenamiento energético son:

Físicas

- La densidad del líquido y del sólido deben ser similares, y preferiblemente elevadas, para poder almacenar mayor cantidad de calor por unidad de volumen.
- Variación de volumen –en el cambio de fase- baja.

Cinética

- Evitar el problema de histéresis, subenfriamiento o retardo al inicio de la solidificación, como ocurre en los PCM inorgánicos, que se produce al no ceder

el calor latente de un PCM pese a que su temperatura sea inferior al punto de congelación.

- Poseer suficiente tasa de cristalización: en los PCM inorgánicos se necesitan agentes nucleadores aditivos para que comience a solidificar la sustancia.

Químicas

- El proceso de cambio de fase debe ser totalmente reversible y sólo dependiente de la temperatura.
- Ser químicamente estables en el tiempo evitando su descomposición y contaminación. No presentar segregación de fases. Ser compatibles con los materiales de encapsulado y otros con los que esté en contacto: estabilidad química, para evitar oxidación, descomposición térmica, hidrólisis, corrosión y otras reacciones.
- No inflamables y resistentes al fuego.

Térmicas

- La temperatura de cambio de fase debe ser adecuada a cada aplicación particular.
- Presentar una temperatura de fusión definida o, al menos, el cambio de fase debe producirse en un valor discreto (sustancia pura) o en un pequeño intervalo de temperaturas, denominado ventana térmica (Espeau *et al.*, 1996).
- Poseer una gran capacidad de almacenamiento de calor sensible (calor específico) en estado sólido y líquido y elevada entalpía de cambio de fase, calor latente.
- Poseer una alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor.

Económicas

- Estar disponible en grandes cantidades a bajo coste, para que sean viables técnica y económicamente.
- Tener un razonable ciclo de vida útil de acuerdo a su costo.

1.1.8. Inercia térmica de la envolvente

Según Bannier *et al.* (2003), conceptualmente se denomina inercia térmica a la dificultad que ofrecen los cuerpos para cambiar el estado en el que se encuentran; es decir, responde a la dificultad que ofrece un cuerpo a cambiar su temperatura y se obtiene cuantificando su masa térmica.

Los valores altos de inercia permiten conseguir uno de los objetivos más deseables de un edificio: la estabilidad térmica. Generalmente los edificios se ven permanentemente afectados por las variaciones climáticas externas y por las condiciones de uso interiores. El objetivo deseable desde el punto de vista del bienestar es que la temperatura fluctúe sólo levemente y siempre dentro de los márgenes del confort térmico, reduciendo con ello el consumo de energía de climatización.

En la figura 4, se presenta una gráfica en la que se observan los resultados térmicos de dos viviendas con diferentes inercias (inercia 1 < inercia 2). En ella se plasma el efecto que tiene la envolvente del edificio sobre la temperatura interna del mismo.

En este ejemplo se puede observar que se logran desfases de onda de 5 y 12 horas, y amortiguaciones de la amplitud de la variación de temperatura del 50 y 80 % respectivamente. Así pues, se definen a continuación los parámetros que permiten evaluar la inercia térmica (desfase y amortiguación térmica) y por lo tanto la eficiencia energética de la solución constructiva (ahorro energético).

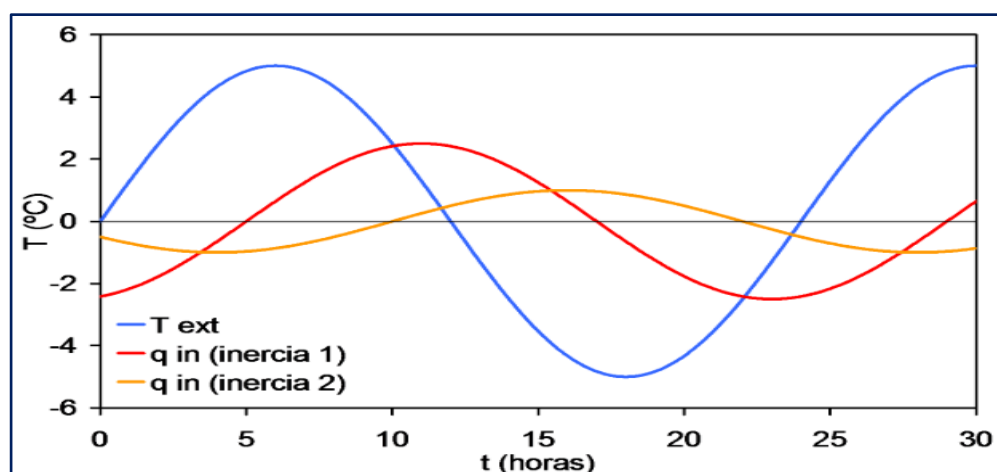


Figura 4. Comportamiento de viviendas construidas con envolventes de distintas inercias térmicas (inercia 1 < inercia 2).

Fuente: Ramírez (2009).

1.1.9. Sistema de almacenamiento con cambio de fase (PCM)

Grande (2016), manifiesta que el sistema de almacenamiento con cambio de fase o almacenamiento en forma de calor latente (Latent heat thermal energy storage, LHS). Se prestará una especial atención a los proyectos que involucren el uso de altas temperaturas y la aplicación de los mismos a centrales de tipo termo solar, usando el calor latente como almacenador de energía.

En primer lugar, es necesario explicar cómo aumenta la temperatura en función de la energía suministrada. Tal y como muestra la figura 5, la energía suministrada a un material, inicialmente sólido, se emplea en aumentar la temperatura del mismo de forma lineal. Una vez alcanzada la temperatura de fusión, la energía que se sigue suministrando ya no se emplea en aumentar la temperatura, sino en el cambio de fase de sólido a líquido, durante el cual la temperatura se mantiene constante.

No es hasta que todo el material se encuentra en estado líquido cuando la temperatura comienza a aumentar de nuevo, al ritmo que se suministra energía al sistema, de nuevo de forma lineal. Llegando finalmente a la temperatura de vaporización en la que sucede un fenómeno isotermo similar al descrito anteriormente en el cual toda la energía acaba empleándose en el cambio de fase y hasta que todo el material esté en estado gaseoso no se produce un nuevo aumento de la temperatura.

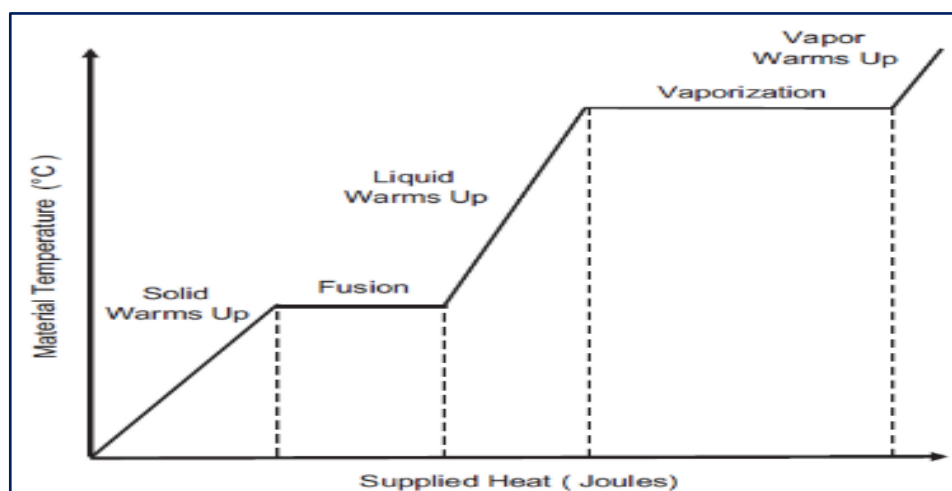


Figura 5. Perfil de temperatura en función del calor suministrado.

Fuente: Cárdenas (2013).

De este modo vemos como es imposible almacenar exclusivamente en forma de calor latente, siempre cierta cantidad de energía va a quedar almacenada en forma de calor sensible. El proceso inverso es exactamente igual, por lo cual podemos obtener energía almacenada a una temperatura constante, al tiempo que se produce un cambio de fase en sentido inverso.

A continuación, se muestran la ecuación (tanto en formato continuo como incremental) que define la cantidad de energía que una determinada cantidad de material es capaz de almacenar:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dt + ma_m \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_f} mC_p dT \quad \dots \text{Ecuación (5)}$$

$$Q = m[C_{sp}(T_m - T_i) + a_m \Delta h_m + C_{ip}(T_f - T_m)] \quad \dots \text{Ecuación (6)}$$

En estas ecuaciones se representa en el primer término la energía que es capaz de almacenar en forma de calor sensible desde su temperatura inicial hasta que comienza el cambio de fase. En segundo lugar, se muestra un término que tiene en cuenta la energía total almacenada en forma de calor latente.

Este término tiene en cuenta la cantidad de material, el calor específico del cambio de fase y la fracción del material que ha experimentado la transformación. El cambio de fase se continúa calentando al material, es necesario utilizar el tercer término de la ecuación.

Los materiales usados para almacenar energía térmica en forma de calor latente son conocidos como Phase Change Materials (PCMs).

1.1.10. Ventajas de los sistemas PCM

- a) Son fuentes de calor a temperatura constante: El almacenamiento de energía térmica en este tipo de materiales permite obtener un foco térmico a igual temperatura durante el proceso de cambio de fase. Esto es muy útil desde el punto de vista de control y mantenimiento de unos niveles concretos de potencia y producción eléctrica en una planta solar de concentración. Proporcionan

estabilidad frente a la aleatoriedad que supone el uso del recurso solar (meteorología).

- b) Gran densidad de almacenamiento. A modo general, se puede afirmar que los sistemas que utilizan almacenamiento en forma de calor latente tienen en el entorno de 50-100 veces mayor capacidad de almacenamiento que si fuera en forma de calor sensible, para una misma cantidad de material.
- c) Recuperación del calor sin necesidad de una gran diferencia de temperatura. Al poder elegir el PCM que mejor se adapte al punto de trabajo del fluido caliente. Esto es una gran ventaja desde el punto de vista energético y exergético.
- d) Uso repetitivo. El número de ciclos de fusión-solidificación que pueden soportar sin mostrar degradación es muy elevado, llegando en términos teóricos a considerar que prácticamente no se degradan.

1.1.11. Energía solar

En la actualidad, la tendencia mundial se enfoca al uso de energías renovables, las mismas que son amigables con el medio ambiente, aprovechando los recursos naturales para generarlas, además de aprovechar la energía del sol que llega a la tierra, en forma de rayos. Se la puede considerar como energía primaria de todas las demás; es decir, la energía hidráulica, viento, carbón, combustibles, etc. son producto de ella.

La energía solar como recurso energético a través de los procesos naturales, se debe considerar su característica de energía renovable e inagotable, pero de disponibilidad cíclica y variable. Es posible utilizarla convirtiéndola en energía térmica y eléctrica para satisfacer las necesidades diarias en forma similar a la de las fuentes de energía más conocidas (Durán y Godfrin, 2004).

1.1.12. La Energía Solar Térmica

Galeano (2014), menciona que la contribución de la energía solar térmica al consumo energético mundial sigue siendo muy escasa todavía, pese a que empiezan a percibirse ciertos síntomas de cambio que permiten ser más optimistas de cara al futuro. Al creciente interés de los ciudadanos por este tipo de soluciones hay que sumar las ayudas e incentivos que se han puesto en marcha en muchos países del

mundo y la reducción de precios de los captadores solares en algunos mercados especialmente activos como China o Japón.

Hoy la mayor parte de los captadores solares instalados en el mundo tienen como finalidad la producción de agua caliente para uso doméstico. A esta aplicación se destinan los esfuerzos de la mayoría de los mercados nacionales importantes, aunque el tipo y el tamaño de las instalaciones, así como el porcentaje total de la demanda que cubre, varía en función de la zona del mundo a la que hagamos referencia.

El aporte de energía solar en sistemas de calefacción es el segundo en importancia; una aplicación que resulta especialmente interesante en países fríos y que se utiliza cada vez con mayor frecuencia tanto para viviendas familiares como para todo tipo de instalaciones colectivas. Se trata de una opción cada vez más valorada en países como China, Australia, Nueva Zelanda o Europa, donde se entiende la edificación desde una perspectiva global en la que la energía solar puede ofrecer soluciones integradas en muy diversos ámbitos, y la calefacción constituye siempre un potencial muy atractivo (Dalglish *et al.*, 2007).

Según Ampuero (2010): Define como energía solar fotovoltaica al proceso de obtención de energía eléctrica por medio de paneles fotovoltaicos. Los módulos o colectores fotovoltaicos están conformados por dispositivos semiconductores, los cuales al recibir radiación solar mediante un proceso químico se excitan y provocan saltos electrónicos; esto se conoce como efecto fotoeléctrico. Al producirse este fenómeno se genera una pequeña diferencia de potencial en sus extremos. El acoplamiento en serie de varios de estos fotodiodos nos permite la obtención de voltajes mayores en configuraciones muy sencillas para el uso de pequeños dispositivos electrónicos. Es decir, cuando estos electrones son capturados, el resultado obtenido es una corriente eléctrica continua que puede ser aprovechada y transformada en corriente alterna, y así ser inyectada a la red eléctrica o sistema interconectado.

1.1.13. Enfoque de almacenamiento de Energía Térmica

Existen tres enfoques principales para el almacenamiento de energía térmica: almacenamiento de calor sensible (SHS), almacenamiento de calor latente (LHS) y almacenamiento de energía termoquímico (TCS). El calor sensible se refiere al calor

que puede ser detectado por un cambio de temperatura en una relación lineal con la temperatura (como se ve en la Fig. 6). El calor almacenado depende de la capacidad de calor específica del material.

SHS es la forma más simple y más desarrollada de almacenamiento de calor, sin embargo, sufre de baja densidad de energía y pérdida de energía térmica a cualquier temperatura (Shchukina *et al.*, 2018).

El almacenamiento de calor latente se refiere a la transferencia de calor asociada con Transiciones de fase, que no se pueden detectar con un termómetro. LHS es más eficiente y tiene una densidad de almacenamiento muy superior a la de SHS. Los materiales que utilizan LHS se conocen como materiales de cambio de fase.

PCMs. Los ejemplos de transiciones de fase incluyen fusión y congelación (sólido-líquido), evaporación y condensación (líquido-gas) o cambios en la estructura cristalina (sólido-sólido). Esencialmente Fig. 6 Comparación entre SHS y LHS, DHF es el calor latente de fusión durante la fusión. T_M es la temperatura de fusión.

La energía asociada con estos cambios corresponde al número de enlaces químicos rotos. Por lo tanto, las transiciones de gas sólido almacenan la mayor cantidad de energía. Sin embargo, el gran cambio de volumen de estas transiciones significa que se requieren contenedores presurizados.

Los PCM sólidos-sólidos y sólidos-líquidos se han investigado desde la crisis del petróleo de la década de 1970 que llevó la energía a la vanguardia de la investigación científica. Sin embargo, una vez que se redujo la crisis, fueron olvidados en gran parte hasta la década de 2000. Con el enfoque actual en las fuentes de energía limpia, los PCM se han estudiado ampliamente a un ritmo creciente.

Como se puede ver en la Fig. 6, un material LHS ideal almacena una gran cantidad de calor isotérmicamente durante la fusión. Una vez que el material se congela, esta energía se libera. Los PCM también almacenan sensiblemente la energía térmica mientras no experimentan una transición de fase. Los PCM son mucho más eficientes que los materiales de SHS, especialmente en el pequeño rango de temperatura asociado con su transición de fase.

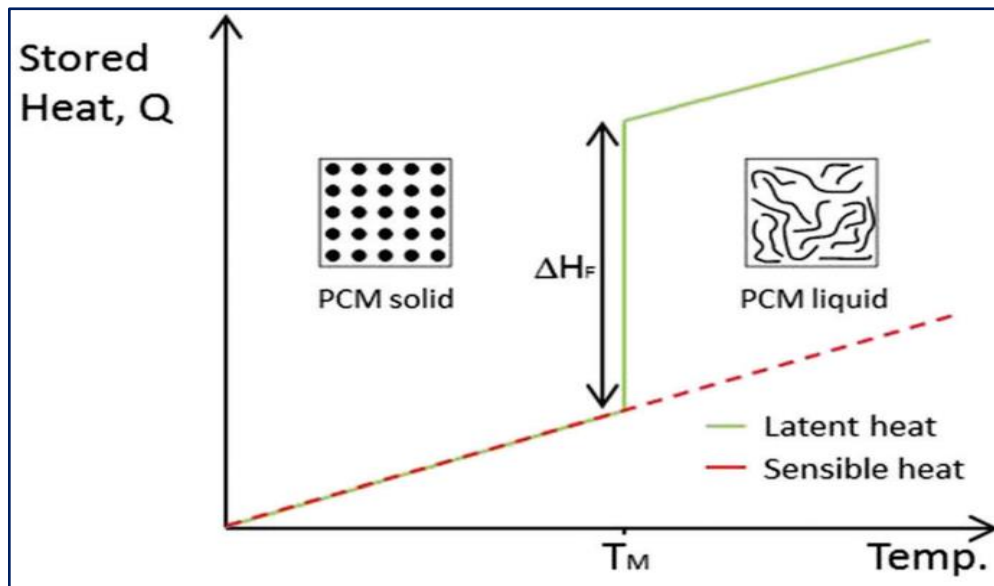


Figura 6. La comparación entre SHS y LHS, DHF es el calor latente de fusión durante la fusión. T_M es la temperatura de fusión.

La energía asociada con estos cambios corresponde al número de enlaces químicos rotos. Donde las transiciones de gas sólido almacenan la mayor cantidad de energía. Sin embargo, el gran cambio de volumen de estas transiciones significa que se requieren contenedores presurizados.

Los PCM sólidos-sólidos y sólidos-líquidos se han investigado desde la crisis del petróleo de la década de 1970 que llevó la energía a la vanguardia de la investigación científica. Sin embargo, una vez que se redujo la crisis, fueron olvidados en gran parte hasta la década de 2000. Con el enfoque actual en las fuentes de energía limpia, los PCM se han estudiado ampliamente a un ritmo creciente.

1.1.14. Características del domo

Una de las ventajas de usar domos es que hay una disminución en los costos ya que los espacios y materiales requeridos son menores; además, es una estructura liviana por lo que no se requiere una cimentación complicada. También se le considera estructuras estables y seguras frente a la acción de vientos, tormentas, nieves o sismos.

En cuanto a la climatización, también presenta ventajas frente a otras estructuras, ya que al usar un domo se consigue un ahorro energético porque debido a su forma

esférica, el volumen de aire de un domo es menor que el de un cuarto, por lo que será más fácil enfriarlo o calentarlo.

Finalmente, otra ventaja gracias a la forma del domo es que se consigue una buena distribución del aire, porque no hay estancamiento del mismo en algún rincón, de igual modo, no hay puntos fríos o calientes logrando así una temperatura uniforme en todo el lugar (Auris, 2017).

El domo servirá como vivienda temporal o de emergencia para un máximo de 3 a 4 personas, las cuales no realizarán intensas actividades físicas como hacer ejercicio sino más bien realizarán actividades de carácter sedentario. El domo para la experimentación es de 50 m² de base, tiene una altura de 4m de radio y 100 m² de cubierta de lona de PVC que cubre el aislamiento térmico en base a polietileno reticulado. (PER). Como puede apreciarse en la figura (7), en el Zenit que es traslúcida y está expuesta a la radiación solar se colocaron los PCM 45.

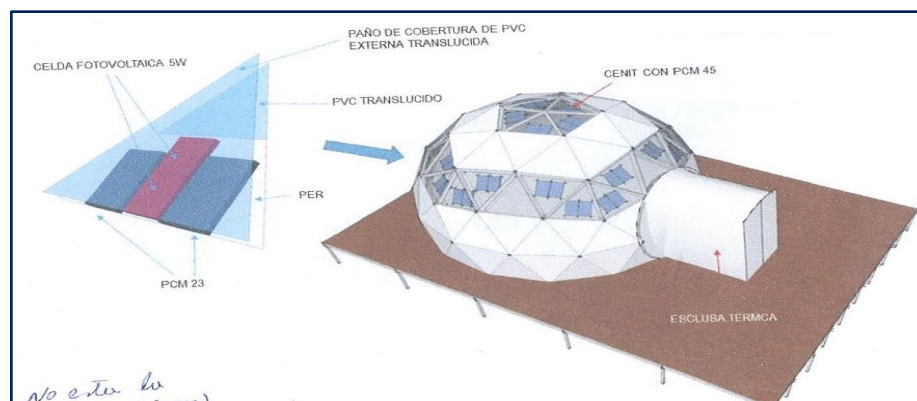


Figura 7. Zenit traslúcida PCM 45.

1.1.15. Confort térmico

Un ambiente térmicamente ideal es aquel en el que los ocupantes no expresan ninguna sensación de calor o frío. La condición es un estado neutro en el cual el cuerpo no necesita tomar ninguna acción en particular para mantener su propio balance térmico.

La temperatura neutra de la piel es alrededor de 33°C y las sensaciones de calor o frío son producidas cuando la temperatura ambiente está arriba o abajo de ésta. Los principales factores que afectan a la sensación de confort son: temperatura del aire, temperatura radiante, velocidad del aire, humedad relativa, nivel de ropa y grado de

actividad. Cualquier cambio en ellos nos provoca las diferentes sensaciones de confort.

En la actualidad, existen dos teorías diferentes relacionadas con la definición de confort térmico. Las dos coexisten, y cada una tiene sus límites y potencialidades. Por un lado, tenemos la teoría del balance térmico y por otro la teoría adaptativa. La teoría del balance térmico está basada en estudios con cámaras climáticas, mientras que la teoría adaptativa hace lo propio con estudios de campo. Actualmente la mayoría de índices de confort que se utilizan son de tipo cuantitativo y sin variabilidad temporal, horaria, diaria y estacional (Godoy, 2012).

A lo largo de la historia la idea del confort ha evolucionado, los primeros significados que se le otorgaron tenían relación con el confortar, consolar o reforzar. En el Siglo XVII, la idea de confort estuvo vinculada con lo privado, con la intimidad, se relacionaba con la domesticidad.

En el siglo siguiente, se le dio más relevancia al ocio, a la comodidad. Mientras que, en el siglo XIX, se tradujo como la calidad y el comportamiento de los elementos en los que intervenía lo mecánico (luz, calor y ventilación). Ya en el Siglo XX, se le asignó el concepto de eficiencia y comodidad en los años siguientes cuando se planteó el confort como algo que podía ser cuantificado, analizado y estudiado.

Hoy en día es concebido por muchos investigadores como una invención verbal, un artificio cultural, y también como una experiencia objetiva que se experimenta personalmente. Existen otros en cambio que expresan que el confort es una sensación óptima compleja, que depende de factores físicos, fisiológicos, sociológicos y psicológicos, en donde el cuerpo humano se siente satisfecho y no necesita luchar con agentes nocivos e incómodos, ya que se encuentra en equilibrio con el entorno.

Han sido muchos los especialistas, además de organismos internacionales que se han dedicado al estudio de este tema. La Organización Mundial de la Salud (OMS), define el confort como "un estado de Bienestar Físico, Mental y Social" (Solana & Montañana, 2011).

Por lo tanto, se puede afirmar que el análisis del confort resulta de suma importancia para generar soluciones concretas para los lugares de trabajo, ya que permite

considerar los parámetros y factores que intervienen en el bienestar mediante el diseño adecuado.

1.1.16. Parámetros del confort

Son aquellas condiciones de tipo ambiental, arquitectónico, personal y sociocultural que pueden afectar a la sensación de confort de un individuo.

Los parámetros ambientales tales como, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire, temperatura radiante, radiación solar, niveles de ruido, pueden ser cuantificados.

Los parámetros arquitectónicos, están relacionados directamente con las características de las edificaciones y la adaptabilidad del espacio, el contacto visual y auditivo que le permiten sus ocupantes.

1.1.17. Temperatura del aire

El reglamento sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo (real Decreto 486/1997) establece en la tabla 2 los siguientes valores:

Tabla 2

Resumen del reglamento sobre disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajos (Real Decreto 486/1997)

Temperatura	De 17 a 27°C para trabajadores sedentarios De 14 a 25°C para trabajos ligeros
Humedad	Del 30 % al 70% Del 50% al 70% si hay riesgo por electricidad estática
Velocidad del aire	0.25 m/s para trabajos en ambientes no calurosos 0.50 m/s para trabajos sedentarios en ambientes calurosos
Renovación mínima del aire limpio	30 m ³ por hora y trabajador en trabajos caluroso ni contaminados. 50 m ³ por hora y trabajador en los casos restantes

Fuente: Real Decreto 486/1997.

Los valores de estos intervalos están por debajo de recomendaciones por la curva de confort de Funger, además, no se diferencia entre la temperatura óptima de invierno y la de verano.

El intervalo de temperatura confortable propuesto por la Eastman Kodak Company (1983) está comprendido entre 19 y 26°C. Asimismo la diferencia de temperatura tolerable entre pies y cabeza sin provocar malestar es de unos 3°C. Mientras que Grandjean (1985) establece unos márgenes entre 20 y 24°C, y una HR entre 30 y 60%.

Tabla 3

*Intervalos óptimos de temperatura en actividades sedentarias
(Eastman Kodak Company)*

Estación	Temp. mínima	Temp. Máxima
Invierno	19°C	20°C
Verano	21°C	26°C

Fuente: Eastman Kodak Company (1983).

Tabla 4

Intervalo óptimo de temperaturas en actividades sedentario (Grandjean)

Estación	Tem. Mínima	Tem. Máxima	HR
Invierno	20°C	21°C	>30% <0.2 m/s
Verano	2°C	24°C	40-60% 0,2m/s

Fuente: Grandjean (1985)

1.1.18. Humedad relativa

La humedad nos indica la cantidad de vapor de agua existente en el aire. Al calcularse, es capaz de absolver mayor cantidad de agua en forma de vapor. La humedad relativa es la relación, expresada en tanto por ciento, entre la presión parcial del vapor de agua en el aire y la presión de saturación del vapor de agua a una temperatura dada.

$$HR = (p/p_{s.ta}) \times 100 \quad \dots \text{Ecuación (7)}$$

Siendo:

P_a : presión parcial de vapor de agua posible a la temperatura t_a

$$p_{5,t_a} = 0.615 \exp[17,27 * t_a / (t_a + 273)] \quad \dots \text{Ecuación (8)}$$

La humedad relativa debe estar, según la mayoría de los autores, entre 40 y el 60% ya que si sobrepasamos el 70% (clima invernadero), mientras que humedades inferiores al 30% pueden provocar problemas de alteraciones en vías mucosas y respiratoria.

La velocidad del aire influye en la sensación subjetiva de confort y desconfort, ya que una mayor velocidad de aire fresco permite incrementar la pérdida de calor por convección y evaporación y si la temperatura del aire está por encima de la temperatura de la piel habrá ganancia de calor por convección.

Tabla 5

Cantidad máxima de vapor de agua por m³ de aire, en función de la temperatura

G H₂O/m³aire	Temperatura °C
4.8	0
6.4	4
8.2	8
10.7	12
13.6	16
17.3	20
21.8	24
27.2	28
33.8	32

Fuente: Humedad y Naturaleza Gharan.

1.1.19. Curvas de confort

Las curvas confort muestran las condiciones de temperatura y humedad más adecuada para el trabajo.

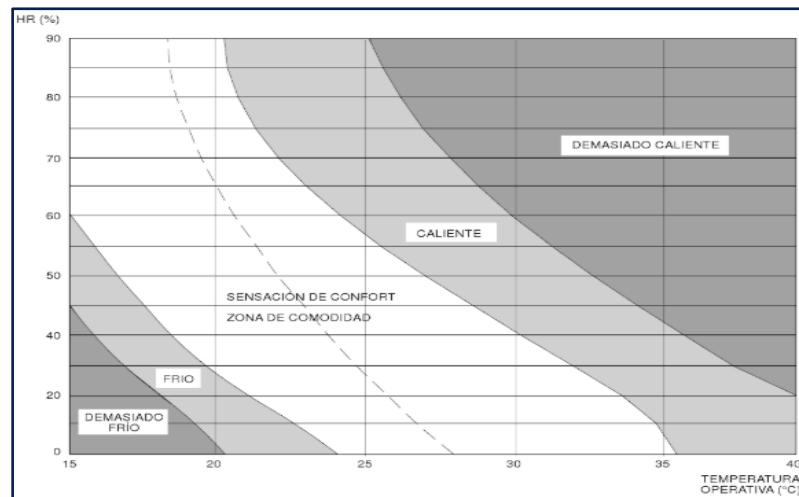


Figura 8. Curva de confort (Castejón, 1983).

1.1.20. Teoría del balance térmico

Muñoz (2012) cita a Povl Ole Fanger (1934-2006), fue el creador de lo que se denomina el modelo de balance térmico, el cual va unido a los indicadores PMV/PPD. En 1973 Fanger publica los primeros trabajos sobre la influencia de las condiciones climáticas en interiores de edificios sobre el ser humano. Se definen por primera vez los parámetros que influyen en el confort y dos métodos para cuantificar este, PMV (Predictive mean vote) voto medio previsto y PPD (predictive percentage dissatisfied) porcentaje previsto de insatisfechos.

Los modelos de balance térmico, también llamados como estáticos o constantes, fueron la base de los trabajos pioneros de (De Dear y Brager, 1998) y han sido la base adoptada en la mayoría de los estándares de confort térmico actuales.

Experimentos de estados estáticos mostraron que, el disconfort por frío está estrechamente relacionado con la temperatura media de la piel, donde el calor está relacionado con la humedad de la piel ocasionada por la secreción del sudor. La insatisfacción puede ser causada como una sensación global o local de demasiado calor o frío. Estas relaciones son las bases para modelos de confort como el de Fanger, el cual incorpora los seis factores del confort mencionados por Macpherson.

1.1.21. Origen del modelo estático

Muñoz (2012), menciona que las teorías de Fanger están basadas en experimentos realizados a 1296 jóvenes en cámaras térmicas, usando modelos estáticos de

transferencia de calor. En estos estudios, la vestimenta y la actividad de los participantes, mientras eran expuestos a diferentes ambientes térmicos, estaba completamente estandarizada. Los participantes debían indicar como ellos se sentían en relación al calor y el frío, usando los siete puntos de la escala de sensación térmica de ASHRAE, de (-3) hasta (+3), utilizando solo los valores enteros, representando los valores negativos sensación de frío, los positivos de calor y donde (0) se considera sensación térmica neutral.

Otra parte del estudio consistía en que los participantes controlaban las condiciones térmicas ambientales, ajustando estas hasta que se sintieran en confort.

El modelo de Fanger combina las teorías de balance térmico con la fisiología y la termorregulación para determinar un rango de temperaturas de confort en las cuales los ocupantes del edificio se sienten en confort.

De acuerdo con estas teorías, el cuerpo humano emplea procesos fisiológicos como sudoración, titiriteo y vasodilatación, con el objetivo de mantener el balance térmico entre el calor producido por el metabolismo y la pérdida de calor a través del cuerpo.

Mantener este balance de calor es la primera condición para conseguir una sensación térmica neutral. Sin embargo, Fanger observó que el sistema termorregulador del hombre es tan eficiente que es capaz de crear equilibrio térmico dentro de amplios límites de variables ambientales, incluso aunque no exista confort.

En los últimos años muchos autores han sumado estudios de campos a los de laboratorio con el objetivo de obtener información más real sobre el confort en espacios de trabajo y los parámetros más relevantes. Estudios de campo también permiten analizar otros factores que no pueden ser simulados en cámaras térmicas, como respuesta de los individuos en sus hábitos diarios, su vestimenta diaria y su comportamiento sin la existencia de ningún tipo de restricción (De Dear *et al.*, 1998, citado en Muñoz, 2012).

1.1.22. Consumo eléctrico

Para calcular las emisiones asociadas, debe aplicarse un factor de emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico –también conocido como mix eléctrico (g de CO₂/kWh) que representa las emisiones asociadas a la generación eléctrica

conectada a la red nacional necesaria para cubrir el consumo. Por lo tanto, el mix que recomendamos utilizar es el valor del mix peninsular que refleje las emisiones de CO₂ generadas en la península para producir la electricidad de la red, y que tiene en cuenta que existen unas pérdidas de electricidad que se asocian al transporte y a la distribución. El mix eléctrico del año 2010 es de 181 g CO₂/kWh.

1.1.23. Consumo de combustible fósiles

Factores de emisión

- Las unidades varían según el tipo de combustible:

Tabla 6

Consumo de combustibles fósiles

COMBUSTIBLE	FACTORES DE CONVERSIÓN
Gas natural (m ³)	10,65 kWh/Nm ³ de gas natural
Gas butano (kg)	12,44 kWh/kg de gas butano
Gas propano (kg)	12,83 kWh/kg de gas propano
Gasoil (litros)	11,78 kWh/kg de gasoil
Fuel (kg)	11,16 kWh/kg de fuel
GLP genérico (kg)	12,64 kWh/kg de GLP genérico
Carbón nacional (kg)	5,70 kWh/kg de carbón nacional
Carbón de importación (kg)	7,09 kWh/kg de carbón de importación
Coque de petróleo (kg)	9,03 kWh/kg de coque de petróleo

Fuente: Muñoz (2012).

1.1.24. Almacenamiento y transporte de energía térmica

El almacenamiento de energía se hace necesario siempre que haya una discrepancia entre la energía disponible y la demanda (Ashrae, 2011). El almacenamiento es especialmente importante en aplicaciones de energía solar debido a la naturaleza estacional, diurna e intermitente de la energía solar. La naturaleza proporciona el almacenamiento de la energía solar de varias formas, como la materia vegetal, también conocida como biomasa, energía térmica oceánica e hidro potencial a gran altura por evaporación de cuerpos de agua y condensación posterior (Jensen, 1980).

De hecho, incluso los combustibles fósiles son una forma almacenada de energía solar porque se producen a partir de biomasa. El almacenamiento de energía solar natural proporciona un amortiguador a largo plazo entre la oferta y la demanda. Dado

que la disponibilidad de energía solar varía según la hora del día y también según la época del año (estacional), y puede tener intermitencia incluso durante un día debido a las nubes, los sistemas de almacenamiento de energía pueden ser a corto o largo plazo según el objetivo:

1. Amortiguamiento con el objetivo de superar la nubosidad por períodos cortos de unos pocos minutos a un par de horas.
2. Desplazamiento del período de entrega, como la recolección durante el día para la entrega durante el período de máxima carga de las horas de la tarde.
3. Extensión del período de entrega almacenando suficiente durante el día para tener almacenaje disponible durante horas antes de la salida del sol y después de la puesta de sol o incluso por más horas de sol de un día a varios días.
4. Almacenamiento estacional, que almacenaría calor durante el verano para usar durante el invierno.

La energía puede ser almacenada como calor, energía electroquímica en baterías, maquinaria. Energía cal en volantes, o energía potencial como hidro o aire comprimido bombeado (Glendenning, 1981).

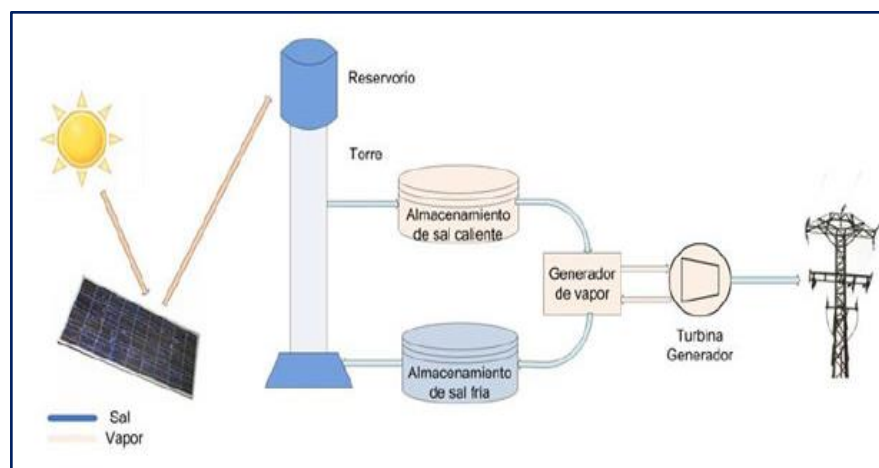


Figura 9. Esquema de almacenamiento de energía térmica

1.1.25. Almacenamiento de calor Sensible

El calor sensible, Q , se almacena en un material de masa m y calor específico C_p por raíz ingresar la temperatura del material de almacenamiento de T_1 a T_2 y se expresa por Ecuación 1: (Goswami, 2014).

$$Q = \int_{T_1}^{T_2} mc_p dT = \int_{T_1}^{T_2} \rho V c_p dT, \quad \dots \text{Ecuación (9)}$$

Dónde: ρ y V son la densidad y el volumen del material de almacenamiento, respectivamente. Para cambios de temperatura moderados, como los sistemas de calentamiento solar y de agua, la densidad y el calor específico pueden considerarse constantes (Winter, 1975). Por lo tanto, $Q = \rho V c_p \Delta T$. Materiales de almacenamiento de calor sensible más comunes .Son agua, aceites orgánicos, rocas, cerámicas y sales fundidas (Yang & Garimella, 2010). Algunos de estos materiales, junto con sus propiedades físicas. El agua tiene el valor de calor específico más alto de $4190 \text{ J / kg} \cdot ^\circ \text{C}$.

El medio más común para almacenar calor sensible para uso con bajos y Los sistemas solares de temperatura media son el agua. El agua es barata y abundante y tiene una serie de propiedades particularmente deseables. El agua es el medio de almacenamiento estándar para sistemas de calefacción y refrigeración solar. Tems para edificios hoy. Para estos sistemas, la energía útil se puede almacenar por debajo del punto de ebullición del agua.

Tabla 7

Almacenamiento y transporte de energía térmica

Propiedades físicas de algunos materiales de almacenamiento de calor sensible.

Medio de almacenamiento	Temperatura Almacenamiento	Densidad (ρ), kg/m ³	Calor específico (c) J/kg K	Energía Densidad (ρC) kWh/m ³ K	Térmico conductividad (W/m K)
Agua	0-100	1000	4190	1.16	0.63 at 38°C
Agua (10 bar)	0.180	881	4190	1.03	.
50-etilenglicol-50-agua	0-100	1075	3480	0.98	.
Dowther A (Dow Chem.Co)	12-260	867	2200	0.53	0.12
Therminol 66 (Monsanto Co.)	-9-343	750	2100	0.44	0.106 at 343 °C
Draw salt (50NaNO ₃ -50KNO ₃) ^a	220-540	1733	1550	0.75	0.57
Molten salt (53KNO ₃ /40NaNO ₃ /7NaNO ₃) ^a	142-540	1680	1560	0.72	0.61
Líquido de sodio	100-760	750	1260	0.26	67.5
Hierro fundido	m.p.1150-1300°C	7200	540	1.08	42.0
Taconita	.	3200	800	0.71	-
Aluminio	m.p.660	2700	920	0.69	200
Fuego de fuego	.	2100-2600	1000	0.65	1.0-1.5

Rock	.	1600	880	0.39	-
------	---	------	-----	------	---

Fuente: Goswami (2014)

1.1.26. Almacenamiento térmico de calor latente

Según Goswami (2014), la energía térmica se puede almacenar como calor latente en un material que sufre Transformación de fase a una temperatura que es útil para la aplicación. Si un material con temperatura de cambio de fase T_m se calienta de T_1 a T_2 de tal manera que $T_1 < T_m < T_2$, la energía térmica Q almacenada en una masa m del material viene dada por la Ecuación 11:

$$Q = \int_{T_i}^{T_m} mc_p dT + m\lambda + \int_{T_m}^{T_2} mc_p dT \quad \dots\text{Ecuación (10)}$$

Donde λ es el calor de la transformación de fase.

Cuatro tipos de transformaciones de fase útiles para el almacenamiento de calor latente son los siguientes mínimos: sólido \rightleftharpoons líquido, líquido \rightleftharpoons vapor, sólido \rightleftharpoons vapor y sólido \rightleftharpoons sólido. Dado que la transformación de fase es un proceso isotérmico, la energía térmica se almacena y se recibe a una temperatura fija conocida como la temperatura de transición.

Algunos materiales comunes de cambio de fase (PCM) utilizados para el almacenamiento térmico son las ceras de parafina, las no parafinas, las sales inorgánicas (anhidras e hidratadas) y los eutécticos de compuestos orgánicos o inorgánicos. Para el almacenamiento a alta temperatura, incluso los metales se pueden utilizar como PCM. La Tabla 8 enumera algunos PCM con sus propiedades físicas.

Los PCM más comunes utilizados para el almacenamiento de energía solar se someten a un sólido \rightleftharpoons líquido transformación. Para tales materiales, la energía térmica almacenada se puede escribir de la Ecuación 11 como, aproximadamente (Ecuación 12)

$$Q = m [\bar{c}_{p_s}(T_m - T_i) + \lambda + \bar{c}_{p_l}(T_2 - T_m)] \quad \dots\text{Ecuación (11)}$$

Donde c_{ps} y c_{pl} son los calores específicos promedio en las fases sólida y líquida, respectivamente.

1.1.27. Regresión lineal múltiple

El análisis de regresión múltiple consiste en generar modelos de regresión con más de una variable independiente (Xs). El modelo de regresión lineal múltiple se representa por:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon$$

Donde:

n = número de datos

p = número de parámetros (βs)

k = número de variables (Xs)

La relación entre el número de parámetros y el número de variables es $p = k + 1$.

β_i ($i=1 \dots k$) representa el cambio esperado de la respuesta y cuando x_i cambia una unidad, manteniendo constantes las demás Xs . A las betas se les llama coeficientes de correlación parcial.

β_0 representa la intersección del hiperplano de regresión. Si el rango de los datos (Xs) incluye $x_1 = x_2 = \dots = x_k = 0$, β_0 representa la media de y cuando $x_1 = x_2 = \dots = x_k = 0$.

El modelo en forma matricial es:

$$\vec{y} = \vec{X} \vec{\beta} + \vec{\varepsilon}$$

Donde:

$$\vec{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{bmatrix} \quad \vec{X} = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \vec{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \dots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \vec{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \dots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

La solución matricial es $\vec{\hat{\beta}} = (\vec{X}' \vec{X})^{-1} \vec{X}' \vec{y}$

Para tener el modelo: $\vec{\hat{y}} = \vec{X} \vec{\hat{\beta}}$

Para estimar la varianza σ^2 es necesario obtener:

$$SSE = \vec{y}' \vec{y} - \vec{\hat{\beta}}' \vec{X}' \vec{y} \quad MSE = \frac{SSE}{n-p}$$

$$\hat{\sigma}^2 = MSE$$

Donde:

p = número de parámetros

k = número de variables Xs

$$p = k + 1$$

Pruebas de hipótesis para evaluar la significación de los parámetros del modelo.

a) Prueba del significado de la regresión

Esta prueba es una extensión de la presentada para el caso de regresión simple.

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

$$H_a : \beta_j \neq 0 \text{ para al menos una } j.$$

El estadístico de prueba es:

$$EP : F = \frac{SSR / k}{SSE / (n - k - 1)} = \frac{MSR}{MSE}$$

p = número de parámetros

k = número de variables Xs

$$p = k + 1 \quad n - k - 1 = n - p \quad k = p - 1$$

Rechazar H_0 si $F > F_{\alpha, k, n-k-1}$

b) Pruebas sobre coeficientes individuales

$$H_0 : \beta_j = 0 \quad H_a : \beta_j \neq 0$$

$$EP : t = \frac{\hat{\beta}_j}{se(\hat{\beta}_j)} = \frac{\hat{\beta}_j}{\sqrt{\hat{\sigma}^2 c_{jj}}}$$

c_{jj} son los elementos de la diagonal de la matriz $(\vec{X}' \vec{X})^{-1}$. Rechazar

H_0 si $|t| > t_{\alpha/2, n-k-1}$. Siendo $R^2 = SSR / S_{yy}$. Si los dos valores R^2_{adj} y R^2 son muy diferentes, significa que el modelo está sobre ajustado. R^2_{adj} Penaliza al agregar variables que no son importantes en el modelo.

1.1.28. Multicolinealidad

Significa que algunas variables (X_s) pueden estar correlacionadas entre sí.

Indicaciones de Multicolinealidad (Mendehhall y Sincich, 1996)

- Correlaciones significativas entre pares de X_s .
- Todas o casi todas las pruebas de t para coeficientes individuales no son significativas, mientras que el anova sí lo es.
- Que los signos de algunos parámetros del modelo sean contrarios a lo esperado.
- VIF_i (Variance Inflation Factor) > 10 .

$$VIF_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad i = 1 \dots k$$

R_i^2 Del modelo sin incluir x_i .

Soluciones a la Multicolinealidad

- Eliminar una o más variables del modelo (se puede usar el procedimiento stepwise).
- Si se decide dejar todas las variables, evitar establecer relaciones de causa efecto entre y y las X_s . En dado caso usar diseño de experimentos (DOE).

En el ejemplo anterior $VIF = 5.7$ para las dos variables de temperatura, lo cual indica que no existe Multicolinealidad (VIF se obtuvo seleccionando la opción adecuada en Minitab®).

Las medidas de diagnóstico y problemas son los siguientes:

1. Distancia D de Cook. Detecta observaciones influyentes.

En la práctica, considerar D significativa si es mayor a 1. En este caso se deberá estudiar la observación para ver si es real. Si no lo es, borrarla. Si es real ver causas en el proceso.

2. PRESS (predicted SSE). Evalúa la capacidad de predicción del modelo.

Se compara *PRESS* contra *SSE*, y de manera empírica, si la diferencia es menor a 2 o 2.5, se considera que el modelo es bueno para predecir.

3. Prueba de Durbin-Watson. Detecta auto correlación entre los errores (falta de independencia de manera analítica). Esta prueba supone que los errores siguen una distribución normal:

H_0 : No existe correlación positiva, $\rho = 0$

H_a : Existe correlación positiva, $\rho > 0$

También se puede probar:

H_0 : No existe correlación negativa, $\rho = 0$

H_a : Existe correlación negativa, $\rho < 0$

El estadístico de prueba es:

$$EP : d = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

Donde e_i son los residuos.

El siguiente paso es obtener dL y dU en las tablas de Durbin-Watson y llegar a una decisión con base en la figura 11.25.

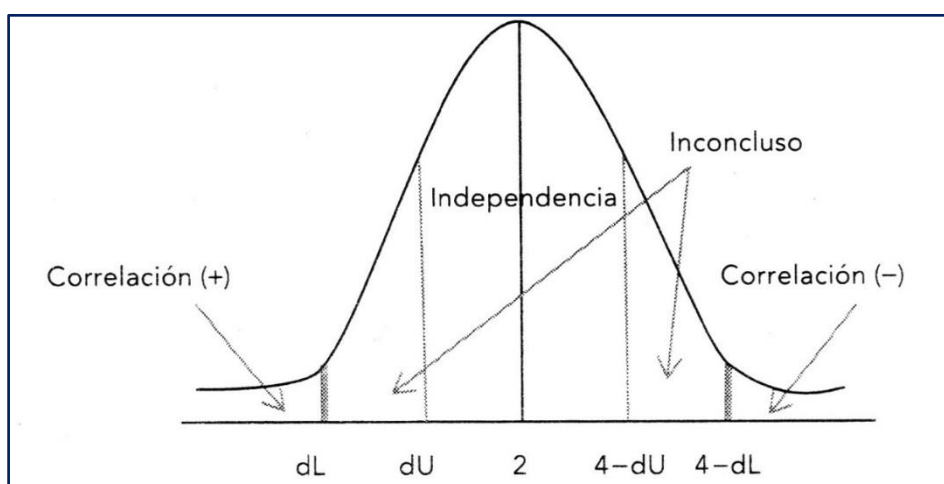


Figura 10. Áreas de interpretación de la prueba de Durbin-Watson

La autocorrelación es en general *provocada* cuando no se incluyen una o más variables importantes en el modelo. Por ejemplo, al relacionar las ventas anuales de refresco contra los gastos en publicidad (Montgomery & Peck, 1992), la variable crecimiento poblacional (en el tiempo) debería estar incluida.

Los *efectos* de la auto correlación son: estimadores ineficientes del modelo, se subestima el error, y los resultados de pruebas de hipótesis e intervalos de confianza pueden ser erróneos. Para usar las tablas de Durbin-Watson (*DW*) es necesario tener n mayor o igual a 15, definir $p - 1$ (p = número de parámetros, β s) y el nivel de α (5% o 1%).

1.1.29. Análisis de los residuos

Una vez construido el modelo de regresión, tendremos que contrastar entre otras las hipótesis de linealidad, normalidad, homoscedasticidad, no autocorrelación e independencia, materia que se ampliará en sucesivos capítulos de la segunda parte de esta obra. Los residuos van a presentar una primera información sobre estas hipótesis.

Si el histograma de frecuencias de los residuos no se ajusta al de una normal, pueden existir valores atípicos. Eliminando los pares (X_i Y_i) que producen los valores atípicos, se puede conseguir normalidad en los residuos.

Si graficamos los valores de \hat{Y}_t contra los valores de $\hat{\varepsilon}_t$, (o sea, si hacemos la gráfica cuyos puntos son los pares $(\hat{Y}_t, \hat{\varepsilon}_t)$ y detectamos una tendencia creciente o decreciente en el grafo, puede existir auto correlación o correlación serial.

Si graficamos los valores de \hat{Y}_t contra los valores de $\hat{\varepsilon}_t$, o sea, si hacemos la gráfica cuyos puntos son los pares $(\hat{Y}_t, \hat{\varepsilon}_t)$ y detectamos una tendencia de cualquier tipo en el grafo, puede existir auto correlación, ya que habrá correlación entre los residuos. También puede haber en este caso heteroscedasticidad, o también falta de linealidad.

Si graficamos los valores de \hat{Y}_t contra los valores de $\hat{\varepsilon}_t^2$, o sea, si se hace la gráfica cuyos puntos son los pares $(\hat{Y}_t, \hat{\varepsilon}_t^2)$ y detectamos una tendencia de cualquier tipo en el grafo, puede existir heteroscedasticidad.

Si graficamos los valores de X_t contra los valores de $\hat{\varepsilon}_t$, o sea, si se hace la gráfica cuyos puntos son los pares $(\hat{Y}_t, \hat{\varepsilon}_t)$ y detectamos una tendencia creciente o decreciente en el grafo, puede existir auto correlación, ya que los residuos no estarán incorrelados con las variables explicativas. También puede haber heteroscedasticidad. o falta de linealidad.

Si graficamos los valores de X_t contra los valores de $\hat{\varepsilon}_t^2$, o sea, si se hace la gráfica cuyos puntos son los pares $(\hat{Y}_t, \hat{\varepsilon}_t^2)$ y detectamos cualquier tendencia en el grafo, puede existir heteroscedasticidad o falta de linealidad (habrá relación entre la varianza del término del error y las variables explicativas).

Estos análisis pueden realizarse también utilizando residuos estandarizados o residuos estudentizados, que suelen ser más efectivos para detectar deficiencias en el modelo.

Los residuos estudentizados, cuya distribución es una t de Student con $T-k-2$ grados de libertad, se usan también para detectar valores atípicos en los residuos (análisis de la normalidad de los residuos o de la mala especificación del modelo).

Un contraste muy importante para detectar la autocorrelación es el contraste de Durbin-Watson, según el cual el estadístico:

$$d = \frac{\sum_{t=2}^T (\hat{\varepsilon}_t - \hat{\varepsilon}_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^T \hat{\varepsilon}_t^2}$$

Nos permite adoptar la regla no demasiado rigurosa de que si d vale 0 hay autocorrelación perfecta positiva; si d se aproxima a 2 no hay autocorrelación, y si d se aproxima a 4 hay autocorrelación perfecta negativa. No obstante, d se encuentra tabulado, y según la franja en la que caiga su valor, se acepta o rechaza la hipótesis de autocorrelación.

Si la matriz $X'X$ tiene determinante cero, no podrá calcularse su inversa (ni podrán hacerse las estimaciones de los parámetros), en cuyo caso hay multicolinealidad. Este problema suele resolverse sustituyendo las variables del modelo por un conjunto grande de sus componentes principales para hacer de nuevo la regresión, pero esta

vez con las componentes principales como variables independientes del modelo. La multicolinealidad también puede abordarse mediante la matriz de correlaciones de las variables independientes, ya que las variables con correlación alta pueden ser candidatas a provocar multicolinealidad, problema que puede intentar solucionarse eliminando una de las variables fuertemente correlacionadas, siempre que dicha variable no sea relevante.

1.1.30. Heteroscedasticidad estimación MCG

1.1.30.1. El problema de la heteroscedasticidad y su detección

En el modelo lineal $Y = X B + u$, suponíamos una serie de hipótesis entre las que se encontraban que la variable u (término de error) es una variable aleatoria con esperanza nula ($E(u) = 0$) y matriz de covarianzas constante y diagonal ($\text{Var}(u) = \sigma^2 I_k$ matriz escalar). Es decir, que para todo t , la variable u_t tiene media cero y varianza σ^2 no dependiente de t , y además $\text{Cov}(u_i, u_j) = 0$ para todo i y para todo j distintos entre sí, pudiendo escribir $\text{Var}(u) = \sigma^2 I_k$.

El hecho de que la varianza de u , sea constante para toda t (que no dependa de t), se denomina hipótesis de homoscedasticidad. Si se relaja esta hipótesis y la varianza de u_t no es constante estamos ante la presencia de heteroscedasticidad. La importancia del incumplimiento de la hipótesis de homoscedasticidad radica, entre otras cosas, en que los estimadores obtenidos por MCO no son de varianza mínima, aunque sigan siendo insesgados. Además, para cada variable del modelo se estimará una varianza del error.

Para analizar la heteroscedasticidad de un modelo suele comenzar por el análisis gráfico de los residuos, siendo esenciales las gráficas de los residuos (a poder ser estudentizados) respecto de la variable endógena predicha y respecto de las exógenas, que deben de presentar una estructura aleatoria libre de tendencia. El gráfico de los residuos contra cada variable exógena permite detectar como variable más culpable de heteroscedasticidad aquella cuyo gráfico se separa más de la aleatoriedad. También es un instrumento gráfico útil la gráfica de valores observados contra valores predichos, cuyos puntos han de ser lo más ajustados posible a la diagonal del primer cuadrante.

Aparte del análisis gráfico es necesario realizar contrastes formales de heteroscedasticidad, entre los que destacan Goldfeld-Quandt, Glesjer, Breush-Pagan, White, GARCH, ARCH y RESET de Ramsey.

1.1.30.2. Soluciones para la heteroscedasticidad: Ajuste de White

El método de White permite estimar un modelo en presencia de heteroscedasticidad desconocida, es decir, sin necesidad de especificar ningún tipo de comportamiento conocido para la varianza de las perturbaciones. Este método proporciona estimaciones consistentes para los parámetros y para la matriz de varianzas covarianzas.

1.1.31. Multicolinealidad

1.1.31.1. El problema de la multicolinealidad y su detección

En el modelo lineal $Y = X B + u$, suponíamos una serie de hipótesis entre las que se encontraban que las variables X_1, X_2, \dots, X_k son linealmente independientes, es decir, no existe relación lineal exacta entre ellas. Esta hipótesis se denomina hipótesis de independencia, y cuando no se cumple, decimos que el modelo presenta multicolinealidad.

En caso de multicolinealidad, al tener fuerte asociación lineal entre las variables explicativas $X'X$ tendría determinante cercano a 0 y no sería calculable $(X'X)^{-1}$ con lo que no se podría hallar el vector de estimaciones de los parámetros $(X'X)^{-1} X'Y$.

Como síntomas más comunes de multicolinealidad tenemos los siguientes:

- Valores altos en módulo en la matriz de correlaciones de las variables explicativas.
- Poca significatividad de las variables X y a la vez R^2 alto.
- Gran significatividad conjunta del modelo (gran rechazo de $R^2 = 0$).
- Influencia en las estimaciones de la eliminación de una observación en el conjunto de datos.

- **Factores de inflación** de la varianza $VIF = 1/(1 - R_j^2)$ elevados (>10), donde R_j^2 es el R^2 de la regresión auxiliar de la variable explicativa j en función de las demás variables explicativas.
- Valores propios λ_i de $X'X$ cercanos a cero o **índice de condición** $(\lambda_{\max}/\lambda_{\min})^{1/2}$ mayor que 30.
- El **contraste de Farrar-Glauber** basado en el estadístico $G = -[T - 1 - (2k + 5)/6] \ln |R_{.xx}|$ que bajo la hipótesis nula de no multicolinealidad es una Chi-cuadrado con $k(k-1)/2$ grados de libertad. T es el tamaño muestral, $k-1$ el número de variables explicativas y $R_{.xx}$ su matriz de correlaciones.

1.1.31.2. Soluciones para la multicolinealidad

Entre las soluciones más comunes para la multicolinealidad tenemos:

- Ampliar la muestra o transformar las variables (por ejemplo, a ratios o diferencias).
- Suprimir algunas variables con justificación estadística y económica.
- Sustitución de las variables explicativas por sus componentes principales más significativas (puntuaciones).
- Utilizar el modelo en diferencias vigilando la autocorrelación.
- Usar la regresión en cadena, que ofrece como estimadores de los parámetros $(X'X + cI)^{-1} X'Y$ siendo c una constante adecuada. La matriz de varianzas covarianzas adopta la forma $\sigma^2 (X'X + cI)^{-1} X'Y (X'X + cI)^{-1}$. En la práctica suele tomarse c como un valor entre 0,01 y 0,1 que hace que el ajuste sea bueno en cuanto a R^2 y significatividad individual y conjunta.

1.1.32. Normalidad De Las Perturbaciones

1.1.32.1. El problema de la falta de normalidad en los residuos

Una de las hipótesis importantes a cumplir en el modelo de regresión múltiple es la normalidad de los residuos. Aunque dicha hipótesis no es necesaria para

la obtención de los estimadores de los parámetros del modelo de regresión por el método de los mínimos cuadrados ordinarios, si es estrictamente necesaria para la realización de la inferencia en el modelo.

Para probar la normalidad de los residuos puede utilizarse cualquier contraste de ajuste a una distribución normal, por ejemplo, el contraste de la Chi-cuadrado o el contraste de Kolmogorov-Smimov. No obstante, existen también contrastes específicos para comprobar el ajuste de un conjunto de datos a una distribución normal, como por ejemplo Contraste de normalidad de Shapiro y Wilks y los contrastes de normalidad de asimetría, curtosis y Jarque-Bera.

1.1.32.2. Soluciones para la falta de normalidad en los residuos

Habitualmente la falta de normalidad en los residuos suele provenir de la presencia de datos atípicos que generan una distribución más apuntada o no simétrica. Estos problemas en los residuos suelen aparecer cuando se omiten variables relevantes en el modelo o cuando existe falta de linealidad en la especificación del mismo. Si se arreglan previamente los problemas citados, suelen solucionarse los problemas de normalidad residual. Cuando los residuos no son normales por la presencia de más de una moda, los datos suelen provenir varias poblaciones, lo que puede arreglarse con la introducción de variables ficticias en el modelo para las diferentes poblaciones. En otras ocasiones, la solución para la falta de normalidad es la transformación adecuada de las variables para conseguirla, por ejemplo, la transformación de Box Cox y sus derivados.

1.2. Antecedentes

En la revisión bibliográfica de patentes y divulgación no se encontró la aplicación del almacenamiento de calor o frío, mediante materiales de cambio de fase (PCM) aplicado en domos, para su climatización mediante la radiación solar. Aunque en el campo de los PCM se inicia a finales de los años 70, ha habido un incremento significativo de trabajos científicos tecnológicos a nivel mundial.

Domínguez *et al.* (2009), experto en el tema y asesor participante de este proyecto en uno de los numerosos trabajos publicados hace una buena revisión del estado del arte de la

aplicación de los PCM en el almacenamiento de calor y frío. Por su parte hay también avances a la fecha en materia de detalle constructivos de los domos, en la que destaca la firma Origamitek empresa colombiana, pero sin la utilización de los acumuladores PCM.

Ochoa *et al.* (2018), en su trabajo “Metodología para el diseño de un módulo de acumulación térmica usando materiales de cambio de fase (PCM) para un secador solar de túnel”, presenta la metodología detallada para el diseño de un sistema de acumulación de energía térmica para un secador de túnel tipo Hohenheim para productos agrícolas utilizando parafina, concluye que el valor de la temperatura superficial tiene una influencia importante en los cálculos de cambio de fase y la masa total de PCM requerida en el sistema.

Domínguez *et al.* (2013), En su trabajo de investigación “Importancia de la capacidad térmica en la resistencia de paso del calor en los cerramientos”, describe una nueva magnitud denominada resistencia térmica aparente, que tiene gran ventaja en los estudios térmicos de los cerramientos, que es el cociente entre los altos medios de temperatura y el flujo medio de calor que sale o entra en el edificio. Concluye que puede ahorrar gran cantidad de energía en la edificación, sin pérdida de confort, buscando nuevos cerramientos térmicos, en los que además de su elevada resistencia térmica se neutralicen se variaciones periódicas de frecuencia de 24 horas.

Reglamento Nacional de Edificaciones (2014), se define en el ítem 6, tabla número 1 las zonas bioclimáticas, correspondiendo la zona 5 a la zona altoandina, para lo cual se indican la metodología (paso 1 y 2), en el anexo 04 en la tabla número 2 los valores límites máximos de transmitancia térmica (U) en W/m^2K , siendo sus valores para: el muro de 1.00, techo 0.83 y piso 3.26, así mismo se indica la fórmula para el cálculo de condensaciones superficiales, en la tabla número 17 los valores de la temperatura del ambiente interior por tipo de uso en edificaciones, para el caso de viviendas es de $18^{\circ}C$ y en la tabla número 18 los valores de temperatura exterior (T_e), temperatura exterior máxima ($T_{e_{max}}$) y humedad relativa (HR) por zona bioclimática correspondiendo a la zona 5 de: $5^{\circ}C$, $18^{\circ}C$ y 50% respectivamente. Se indica también en el paso 2 la resistencia térmica superficial interior (R_i), siendo de $0.11 m^2K/W$ para muros en cualquier zona bioclimática y $0.09 m^2K/W$ para techos o pisos para las zonas bioclimáticas 4, 5 y 6.

IDEA (2007), en la guía técnica para el “diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos” muestra en una tabla los valores típicos de resistencia

térmica para cámaras de aire sin ventilar, para diferentes espesores, es así que para espesor vertical de 100 mm se tiene una resistencia térmica para la cámara de aire de $0.17 \text{ m}^2\text{K/W}$ y para el caso de cámaras de aire ligeramente ventiladas, considera que se toma la mitad de la resistencia térmica de las cámaras no ventiladas, que para el caso del ejemplo indicado sería $0.085 \text{ m}^2\text{K/W}$ (que corresponde a un coeficiente convectivo de aproximadamente $12 \text{ W/ m}^2\text{K}$). También se indica al final las ecuaciones analíticas y experimentales del valor de los coeficientes convectivos tomando como referencia ASHRE para régimen laminar y turbulento.

Miranda y Medina (1998), en su texto titulado “Investigando en ingeniería”, describe el ajuste por mínimos cuadrados vía matricial para la obtención de los coeficientes de regresión lineal múltiple, determinándose la desviación estándar normalizado ($S_{yx}/\Delta y$) como una buena medida de dispersión que debe estar cerca al ajuste estricto de 0.1, que indica un bajo nivel de dispersión que garantiza la validación del modelo.

Esteban *et al.* (2020), Considera que la envolvente en una edificación juega un papel clave en cuanto a la sostenibilidad, es más que una cubierta estética, su funcionalidad es la de ser un filtro entre el ambiente exterior e interior en un sistema complejo que tiene que resolver temas como el intercambio de energía, seguridad, humedades y condensaciones, manejo de residuos, mantenimiento, durabilidad, estanqueidad, construcción y estética. La protección térmica es la capacidad que tiene la envolvente de controlar el intercambio de energía, la envolvente intenta evitar cambios de temperatura notorios que afecten a los usuarios, a los equipos en las instalaciones o la edificación misma, haciendo que el diseño de los sistemas de refrigeración y calefacción sean más pequeños y eficientes.

Ochoa (2016), en su trabajo de investigación cuyo título “Evaluación de Parafina Comercial como material de Cambio de Fase para Almacenamiento de Energía” tiene por objetivo de contribuir a generar conocimiento técnico y científico en el área de los materiales de cambio de fase (PCMs). La parte metodológica consiste en la determinación y consecución de gráficos paramétricos. Se realizó tomando como base los datos experimentales de los cálculos de los calores aportados al agua por parte de la parafina, los calores específicos (C_p) en fase líquida y fase sólida a presiones de 74,64 kPa y 96,63 kPa. Concluye que el cálculo energético de almacenamiento está en función del C_p , en fase líquida. Los resultados en los cálculos del C_p , permiten inferir que la parafina de peso molecular intermedio $C_{35} H_{70} + 2$ (Pentatricontano), presenta en promedio

1,57kJ/kg°C en cambio de fase a 74,64 kPa de presión y 18 °C de temperatura ambiente. Los cálculos permiten determinar que la parafina $C_{35}H_{70} + 2$ (Pentatricontano) es un buen almacenador energético en cambio de fase, porque relativamente se encuentra entre rangos de 1,57kJ/kg°C y 1,79kJ/kg°C, para la fase líquida a 74,64kPa y 96,63kPa respectivamente; comparativamente con el del agua sustancia utilizada de referencia es potencialmente bueno como para pensar que la parafina (Pentatricontano), es un material de buenas características de almacenamiento energético en cambio de fase.

Domínguez y Santamaría (2001), en su trabajo de investigación titulado “Importancia de la Inercia Térmica de los Cerramientos” cuyo objetivo fue determinar los flujos de calor que lo pueden atravesar bajo condiciones periódicas de variación de temperatura en la cara exterior, y el desfase de las ondas de temperatura y de flujo de calor. En los países más desarrollados están apareciendo otros condicionantes, tales como: económicos, medioambientales, sociológicos y en definitiva normativos.

Domínguez y García (2009), en su investigación titulado “Aprovechamiento de los Materiales de Cambio de Fase (PCM) en la Climatización” el objetivo fue mejorar su eficiencia en las instalaciones de climatización con el empleo de los PCM, que tengan la temperatura de cambio de fase adecuada al nivel de acumulación deseada. Se debe tener en cuenta que, por cada grado Celsius que se baje la temperatura de condensación, se disminuye aproximadamente un 3 % la producción de frío, es decir, trabajando en horas nocturnas se tiene dos importantes beneficios, uno de eficiencia energética y otro de costo de la electricidad. Concluye que se puede mejorar mucho su eficiencia en las instalaciones de climatización con el empleo de los PCM, que tengan la temperatura de cambio de fase adecuada al nivel de acumulación deseada, se ve muy grandes posibilidades a los PCM en la construcción, climatización y en el transporte, eliminando las máquinas de producción de frío en grandes partes del mundo y los PCM tienen especial aplicación en casetas de telefonía, bodegas de crianza, naves industriales, polideportivos y edificios de oficinas.

Domínguez y García *et al.* (2009), En su trabajo de investigación, “Factores importantes en el comportamiento térmico de cerramientos, ventajas de la incorporación de los materiales de cambio de fase” cuyo objetivo es analizar los principales factores que afectan a los cerramientos o muros de las construcciones, en el comportamiento real, o sea en régimen variable, que son las resistencias y las capacidades térmicas de los diversos

materiales que los constituyen y las frecuencias de las ondas térmicas. En conclusión: Las entradas de calor en las construcciones, se pueden reducir grandemente concibiendo a los cerramientos con otro criterio al actualmente considerado, que es partir del régimen estacionario. Es decir, que en lugar de buscar que la resistencia térmica R sea grande, se debe buscar que lo sea el producto de ésta por la capacidad. El panel “súper aislante” (aislamiento con vacío) en el que el micro grano es el propio micro encapsulado con el PCM, puede ser una solución muy interesante, sobre todo en la industrialización y rehabilitación de la vivienda.

Ruiz (2016), en su investigación “Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura”, tiene como objetivo definir el estado actual de la tecnología de almacenamiento térmico mediante materiales con cambio de fase, principalmente enfocado al uso en centrales termo solares de concentración, es decir, al uso para un rango de temperaturas medio alto. Concluye sea demostrado que la tecnología de sistemas de almacenamiento de energía térmica en forma de calor latente tiene grandes beneficios y mejores propiedades que la actual tecnología comercializada. Establece que, aun existiendo ya numerosos estudios sobre los materiales de cambio de fase, serán necesarios futuros estudios y proyectos para poder optimizar este tipo de tecnologías hasta conseguir que sean económicamente viables en un futuro cercano.

Oliver *et al.* (2012), en su trabajo de investigación “Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica”. En este trabajo de investigación tiene por objetivo es estudiar a los diferentes materiales de cambio de fase, clasificándolos en diferentes grupos y analizando sus características físicas, químicas, propiedades mecánicas, térmicas, así como su compatibilidad con otros materiales, disponibilidad, precios, durabilidad. Se concluye que en el campo de la edificación se han desarrollado sistemas para climatización por suelo radiante y enfriamiento pasivo en oficinas y otros edificios utilizando sistemas de almacenamiento de energía con PCM, en la actualidad se están llevando nuevos experimentos con PCM con características mejoradas o con propiedades físicas adecuadas a aplicaciones específicas.

Dominguez y Cubillo (2012), en su trabajo de investigación “Vivienda unifamiliar de bajo consumo energético con acumulación de calor en cambio de fase”. El objetivo es

describir y analizar una vivienda unifamiliar recientemente construida en Madrid, en donde se ha tenido presente la reducción del consumo energético, introduciendo junto a la energía solar, la bomba de calor, suelo radiante, recuperadores de calor, sistemas de refrigeración por agua, la inercia térmica, tanto en la construcción como en un acumulador de calor con materiales de cambio de fase (PCM). Se trata de un tanque vertical cilíndrico de 1.200 litros de capacidad en el que se han introducido 330 placas eutécticas de 1,5 litros de capacidad cada una, rellenas con material de cambio de fase a 32° (en total, unos 375 kg) y separadas 1 cm entre ellas para facilitar el intercambio de energía con el fluido portante, en este caso agua corriente; la capacidad térmica aproximada es de 20 kWh, por lo que podría cubrir las necesidades térmicas a plena carga durante 5 horas.

Mazo (2016), en su trabajo de tesis de grado “Investigación sobre la aplicación del almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase en elementos de construcción termoactivos” ha mostrado cómo el sistema con PCM es capaz de almacenar y liberar, a lo largo del ciclo diario de funcionamiento, más del doble de energía térmica que un sistema análogo convencional.

Bravo (2018), concluye en su artículo de revisión “Una revisión sobre materiales para Almacenamiento de energía solar térmica” que existe un creciente interés en la comunidad científica por la práctica energética a partir de 2010, destacándose el uso de sistemas que emplean materiales de almacenamiento de energía térmica por calor sensible y por calor latente, materiales de cambio de fase compuestos y, por último, los materiales termoquímicos de almacenamiento térmico.

Dolado (2015), en su trabajo de grado doctoral “Almacenamiento térmico de energía mediante cambio de fase. Diseño y modelización de equipos de almacenamiento para intercambio de calor con aire”, ha estudiado la viabilidad de la posible aplicación de este tipo de equipos con PCM en la refrigeración gratuita de oficinas, mantenimiento de temperatura en salas y sistemas de refrigeración solar mediante ciclo de absorción.

Auris (2017), presenta el trabajo de tesis de grado de aplicación regional titulado “Diseño de un sistema de climatización para un domo de 50 m² de uso familiar en la ciudad de Pisco”, donde propone el uso de un sistema de climatización que proporcione condiciones de confort en época de verano e invierno para un domo geodésico de uso familiar, diseñado de acuerdo con la ubicación geográfica, el cual necesita un sistema de climatización para confort térmico.



Dominguez *et al.* (2000), en el artículo “Incorporación de acumuladores de cambio de fase en la construcción”, se describe una caseta experimental, en la cual se ha incorporado acumuladores térmicos de cambio de fase, en sistemas de captación de calor en muros tipo Trombe translúcido y aumento de la inercia térmica, colocados en los cerramientos.

Moscoso (2016), en el artículo “Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura”, se propone el uso de materiales PCM como reguladores de temperatura a escala de mobiliario, en lugar de edificio completo, permitiendo realizar regulaciones de confort puntuales, que ofrezcan mejoras en la gestión de energía para climatización sin la necesidad de realizar reformas significativas.

CAPÍTULO II

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

2.1. Identificación del problema

Los conocidos problemas de agotamiento de las reservas de los combustibles fósiles, cuyo consumo se traduce inevitablemente en emisiones de dióxido de carbono (CO₂) a la atmósfera, siendo el principal causante del cambio climático, debido al calentamiento global de la atmósfera, cuyas consecuencias son el incremento del efecto invernadero y la lluvia ácida.

El tema del cambio climático, la última crisis energética y el incremento tan importante de los precios del petróleo han llevado a la necesidad de aumentar la eficiencia energética en todos los campos y sobre todo en los mayores consumidores de energía indirectamente más contaminantes. Es sin duda el campo de la calefacción y de la climatización junto al frío uno de los de mayor consumo, por lo que se considera conveniente mejorar la eficiencia energética de las instalaciones. En general su aprovechamiento presenta problemas inherentes por su posible intermitencia o falta de poderlas emplear cuando se las necesitan, no coincidiendo las demandas con las horas del día más favorables y porque las temperaturas deseadas no se consiguen algunas veces. Es aquí donde la solución a este problema se encuentra en los sistemas de acumulación de energía mediante materiales sostenibles. El frío de las grandes altitudes es una condición climatológica adversa que afecta la salud humana, con consecuencias graves sobre todo en niños, ancianos, madres gestantes, incluyendo animales. La pérdida insuficiente o ganancia de calor excesiva tiende a un sobre calentamiento del cuerpo (hipertermia) y una pérdida excesiva de calor, resulta en un enfriamiento excesivo del cuerpo (hipotemía).

En los últimos años, durante la estación de invierno en las zonas altoandinas se ha presentado cambios climatológicos muy bruscos, el cual está relacionado con el descenso de las temperaturas hasta condiciones extremas por debajo de 0°C.

El problema energético debido al aumento de la población, así como el nivel y calidad de vida de las sociedades ha incrementado el consumo, costo y agotamiento de los recursos provenientes de los combustibles fósiles principalmente y trayendo consecuencias negativas debido a la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, cuya consecuencia es el incremento del efecto invernadero y la lluvia ácida. Por lo que la necesidad de abaratar costos y el ahorro energético y mejora de la eficiencia energética en todos los campos se torna importante, sobre todo en los de mayor uso de energía que es el sector servicios y residencial, y que uno de los principales gastos es la climatización para lograr el confort térmico. Por lo que se plantea diferentes alternativas de solución sin afectar el confort de las personas, planteándose el uso de biocombustibles, casas bioclimáticas, mejora de la eficiencia energética, reducción de emisiones de CO₂ y uso de energías renovables. En los últimos años entre las mejoras de la EE que se puede realizar a corto plazo se consideran el Aislamiento térmico, el aprovechamiento de la inercia térmica y el uso de materiales de cambio de fase tanto en la construcción como en la climatización, como calor sensible o latente, siendo este último más ventajoso.

El altiplano es diverso en condiciones sociales y ecológicas. Los cambios en las tendencias climáticas junto con las proyecciones de cambio climático subrayan la necesidad de enfoques que puedan desarrollar capacidades y conocimientos para la adaptación. Las familias más vulnerables también expresan las mayores preocupaciones con el clima y otros peligros, debido a las dificultades para enfrentar las consecuencias de los peligros del friaje.

Las construcciones a nivel rural se caracterizan por utilizar materiales de disponibilidad local, tales como piedra y adobe para los muros y calamina para el techo, los cuales tienen limitada capacidad de aislamiento térmico, sobre todo la calamina, con la consecuente ... de habitaciones frías, sobre todo durante las noches, no compatibles con el confort de vida de las personas. La calefacción es una condición necesaria para tener una habitación termo neutra que posibilite una vida confortable. El ahorro energético de viviendas necesita energía solar, pero la promoción de la energía solar debe integrarse con las construcciones.

La adaptación a gran altitud en humanos es un ejemplo de modificación evolutiva. Tres poblaciones humanas han adquirido por milenios la capacidad de sobrevivir en altitudes extremadamente altas: los Andinos en el Altiplano de los Andes en América, los tibetanos sobre la meseta del Tíbet en Asia y los Etiopes sobre la meseta del Semian en África (Petousi y Robbins, 2014). La International Society for Mountain Medicine, reconoce tres regiones altitudinales que refleja la disminuida cantidad de oxígeno en la atmósfera: altitud grande (1500 - 3500m), altitud muy grande (3500 - 5500m) y altitud extrema (>5500m) (Paralikar y Paralikar, 2010). La gran altitud representa un espacio geográfico adverso que se caracteriza por la menor presión atmosférica, hipoxia y sobre todo las temperaturas bajas (He *et al.*, 2016).

Los efectos del aire frío sobre las enfermedades cardiovasculares y cerebrovasculares se investigaron en un estudio experimental que examinó la presión arterial y los indicadores bioquímicos. Zhangye, una ciudad en la provincia de Gansu, China, fue seleccionada como el sitio experimental. Se realizaron exámenes de salud y análisis de sangre y, finalmente, se reclutaron 30 pacientes con enfermedades cardiovasculares y 40 sujetos sanos.

El experimento se realizó durante un evento de frío del 27 al 28 de abril de 2013. Esto demostró que el aire frío puede causar daño a las células del corazón de los pacientes, y el daño no se puede reparar rápidamente. Algunas de las respuestas relacionadas con los marcadores bioquímicos indicaron que la exposición al frío aumentó la tensión cardiovascular y la posible lesión del miocardio (Zhang *et al.*, 2014).

Entre las mejoras de eficiencia energéticas que se pueden hacer a corto plazo, se consideran como más interesantes: el aislamiento térmico, el aprovechamiento de la inercia térmica, el uso de los materiales de cambio de fase, tanto en la construcción, como en la climatización y el aprovechamiento del frío gratis que puede aportar sin límites el aire ambiente, (tanto sensible, como latente) (Domínguez *et al.*, 2009).

El sol es una fuente gratuita de energía para ser aprovechado en las construcciones, la misma que está disponible para las horas del día, faltando para las horas de la noche, sobre todo en ámbitos de gran altitud donde el frío es el factor ambiental más adverso. La diferencia temporal de la fuente de energía y las necesidades energéticas hacen necesario el desarrollo de sistemas de almacenamiento, a través de acumuladores de energía térmica (Bajnóczy *et al.*, 2007).

El material de cambio de fase (PCM, phase change material), es un acumulador de energía solar a una temperatura de fusión de uso para aplicaciones de enfriamiento y calentamiento (Patela *et al.*, 2018). Existen diferentes tipos de PCM, tanto orgánicos como inorgánicos, con diferentes puntos de fusión (Domínguez y García, 2009).

El PCM orgánico se caracteriza por qué ha dado buenos resultados en Noruega. Los resultados muestran que la presencia de PCM con diferentes puntos de fusión puede reducir significativamente el tiempo de almacenamiento de calor. Un aumento en el contenido de PCM en el tanque conduce a un aumento evidente en la liberación de calor (Zhao *et al.*, 2018).

El proyecto plantea implementar un sistema de calefacción de altura de un prototipo domo experimental utilizando TES con PCM y un aislamiento térmico adecuado para los meses de friaje mayo, junio y julio.

2.2. Enunciados del problema

Como se ha establecido en el objetivo principal del proyecto, se trata en primer lugar de climatizar el domo con acumuladores de energía solar térmica mediante materiales de cambio de fase conocidos internacionalmente por sus siglas en inglés como: TES-PCM (Thermal Energy Storage with Phase Change Material) que adquieren relevada importancia, utilizando para calefacción durante la noche: PCM23 (material de cambio de fase a 23°C), iluminación y ventilación natural durante el día.

Luego con fines turísticos fue proporcionar confort incorporando otras tecnologías como son: colectores solares para agua caliente sanitaria (ACS) con PCM45 (material de cambio de fase a 45°C para uso de ducha y cocinas). Paneles fotovoltaicos (FV) para uso de iluminación y funcionamiento de artefactos electrodomésticos. También en la línea de confort se consideró los servicios de: comunicación para uso de Internet, agua y desagüe, entre otros.

El tamaño del domo experimental definido es de 50 m² en su base. Es considerado como una casa tipo Unifamiliar que alberga de 3 a 4 personas, que fueron instalados con fines turísticos en la ciudad de Urubamba – Cusco, pudiendo ser replicado con carácter predictivo en otras zonas altoandinas, como es el altiplano peruano y boliviano, requiriendo solo el sistema de calefacción, así como atender emergencias por desastres entre otros usos.

En general tenemos *variables aleatorias* como es el *clima* y la *radiación solar*, que por la vía de los pronósticos de tiempo conocemos pero que en definitiva obviamente no se puede controlar y que influyen en la climatización del domo.

Sin embargo sus parámetros características ambientales locales como: la temperatura ambiental (T_{amb}), la humedad relativa (HR_{amb}) y la presión atmosférica local (P_{Atm}), se puede medir en el tiempo y cómo afecta en la climatización del domo en términos de lograr en el interior del domo un rango de temperaturas (T_i) y humedades relativas (HR_i) que idealmente tendrían que estar entre 18°C y 23°C y 50 a 70% respectivamente, en la que ambas, como se sabe, pueden estar en varias combinaciones para proporcionar igual confort. Este concepto de confort es relativo, ya que las personas de un lugar tienen un concepto habituado a ciertas condiciones ambientales, pero otra de otro clima puede apreciarla y estar adecuada en forma distinta, es así como en la zona altoandina podría estar entre 15 y 23°C para la temperatura y 40 a 55% para la humedad relativa. En cualquier caso, se plantearon dichos rangos como una aproximación general aceptada mundialmente.

En una edificación con PCM, tanto el aislamiento como la climatización pasiva, mejorarían en forma simultánea, estabilizando la temperatura interior y reduciendo la variabilidad provocada por el clima exterior. La mejora térmica se produciría cuando, al integrar el PCM en un cerramiento, este trabajaría completando ciclos de almacenamiento y cesión de energía de acuerdo con la temperatura del recinto donde se encuentre instalado, asegurando una gran estabilidad térmica en volúmenes reducidos. La climatización pasiva se produciría por el aprovechamiento de la energía renovable (solar) que almacena y cede calor para calentar el aire que se renueva en el domo, para utilizarlo durante la noche. Por lo que se evaluaría las prestaciones térmicas de la envolvente del domo con PCM23, calculando la transferencia de calor a través de los cerramientos y lograr obtener un coeficiente global de transferencia (U) bajo (menor a $0.5 \text{ W/m}^2\text{-día}$), con lo que se reduciría las pérdidas de las cargas térmicas analizadas en el circuito térmico del domo, para las condiciones de altura de la ciudad de Urubamba – Cusco.

Para tal efecto considerando los parámetros de diseño del domo, para desarrollar modelos de los mismos y desde el punto de vista de las variables a considerar que podemos controlar, el domo debe contar con un aislamiento térmico adecuado (polietileno reticulado: PER), que debe ser determinado en términos de un espesor óptimo económico

($E_{\text{ópt}}$), contar con un área de captación traslúcida (AT) de la radiación solar para los efectos de cargar térmicamente los PCM23 a fin de entregar su calor en la noche o más precisamente a partir del momento que la temperatura ambiente llegue a los 23°C y empiece a entregar calor. Esto significa que debe determinarse la cantidad de PCM23 (N) considerando que cada placa carga 43 Kcal/Kg de acumulador y cada placa pesa 3 Kg netos. Obviamente la carga debe ser tal que dure toda la noche o más específicamente desde que empiece a descargar hasta el día siguiente y se vuelva a cargar con la radiación solar cuando sale el sol en la mañana.

Respecto al área de captación solar traslúcida (AT) que está a $2/3$ de la altura de la base (ver Fig. 7), ésta debe determinarse a fin de evitar los excesos o falta de calor, por las coberturas exterior e interior de PVC de 0,5 mm de espesor. Esta área debe determinarse, pero siempre garantizando que realmente se cargue en un 100% los PCMs, lo cual en términos prácticos ello se identifica cuando el acumulador (PCM) se licúa y adquiere una tonalidad rosada la placa, por lo que será conveniente determinar el porcentaje de licuación (%L) del PCM23 a instalarse en las 4 zonas del domo (E, O, N, S).

Inicialmente se usará un área de captación de 21 m^2 , con una doble capa de PVC traslúcido de 0.5 mm de espesor con aire encerrado en su interior, sin considerar si es el óptimo para el control de los rayos ultravioleta (UV). Se estima un área traslúcida de 10 m^2 , considerando algo mayor al área total que ocupan las 60 placas de PCM23 (8.07 m^2).

Otro aspecto considerado en la instalación del domo para el proceso de calefacción aire fue el diseño de la cámara de aire a fin de lograr la circulación natural del aire que se produce por la diferencia de densidad de éste y que por tanto homogeniza la temperatura interior del domo, cuestión que también se logra con la recirculación del aire.

Por lo que en este caso fue necesario determinar el ancho de la cámara de aire © que por razones de espacio solo se podrá variar en 2 valores (10 cm y 5 cm). Se consideró como reserva en el supuesto que esta circulación natural no ocurra recurrir a ventiladores extractoras que están considerados para la función de extraer el exceso de calor al exterior.

Por otro lado, se debe considerar aperturas de un pequeño diámetro al exterior de la cámara de aire en la base y en la parte superior distribuidos equitativamente en el contorno del domo, para el ingreso de aire fresco y con ello permitir la renovación del aire y controlar el CO_2 para resguardar la salud de las personas.

Contribuye a la climatización la masa inercial (M) que tiene el domo representada por las instalaciones interiores, muebles y las personas que lo ocupan, cuestión que también podría determinarse.

Adicionalmente se consideró la incorporación de otras tecnologías que proporcionan seguridad y confort que era necesaria para poder habitar en el domo como son: los paneles FV para iluminación y funcionamiento de los aparatos electrodomésticos (TV, bomba, PCs, etc.), colector solar para ACS (ducha y cocina), comunicación (Internet y monitoreo de datos), servicios de agua y desagüe, y reserva energética cuando no se dispone de radiación solar.

Para lograr tener ACS, se propuso instalar en el cenit (fig. ...), que tiene un área traslúcida que calienta unas placas solares (colector solar) por lo cual circularía el agua que es bombeada de la base y pasa al tanque que contiene el PCM45 que acumularía el calor para la ducha. Esta área (A_c) y la cantidad de PCM45 serán determinados para que se duche 3 ó 4 personas ocupantes del domo cuyo aporte de calor también será considerado en el balance energético.

Para tener iluminación y funcionamiento de los aparatos electrodomésticos se consideró diseñar e instalar el generador FV compuesto por paneles FV, regulador, acumulador (baterías) e inversor; el mismo que podrá ser considerado como aporte de calor por iluminación en el Balance Energético.

Mención especial, es considerar que van a existir días nublados, lluviosos y 1 a 2 días seguidos sin sol, según algunos conocedores de las zonas en cuestión. En estos casos, se podría recurrir a algunas medidas como son: plantear en el diseño considerar con una autonomía de 1 a 2 días y algunas medidas de reserva que permita garantizar la necesidad de energía requerida por el domo. Así mismo podría ser necesario considerar que en el Proyecto pudiera participar otras tecnologías como la bomba de calor y los evaporadores.

Para aumentar la eficiencia energética un factor muy importante será considerar el costo que representa la inversión inicial para la ejecución de la instalación, el retorno de la inversión, los factores futuribles como el costo de la energía, los tiempos de funcionamiento y las posibles ampliaciones o reducciones a realizar. Es así que en el presente proyecto se propuso realizar un estudio económico que contempla el retorno de la inversión, el ahorro energético y la reducción de la contaminación.

El retorno de la inversión se analizará mediante el indicador econométrico Payback, que nos permita determinar el periodo de amortización, sabiendo que el proyecto pueda ser garantizable su uso para unos 30 años aproximados de funcionamiento, requiriendo un mínimo mantenimiento. El ahorro energético se analizará comparando la energía consumida con la tecnología actual utilizada en los sistemas de calefacción, como son los equipos de aire acondicionado y la nueva tecnología introducida para calefacción con los PCMs que se contempla en el presente proyecto. Considerando la tarifa actual existente esta reducción energética repercute en el ahorro energético y su correspondiente reducción de la contaminación ambiental de gases de efecto invernadero (GEI) CO₂.

La estimación realizada para el cálculo de la demanda de calefacción y refrigeración requerido por el domo permitirá definir que la calefacción con PCM23 se aplicaría para la noche y para el día sería una refrigeración natural con regulación manual de aire. Así mismo la estimación de la carga térmica y pérdida de calefacción con PCM durante la noche permitirá determinar el número de PCM requerido, sin considerar en un inicio su porcentaje de licuación (%L). Sin embargo, será necesario determinar el %L para realizar el balance energético para un análisis cuantitativo más detallado de todas las pérdidas y aportes de calor que nos permitirá determinar: la potencia térmica del sistema, su autonomía, performance y sobre todo evaluar las cargas térmicas para posibles mejoras del sistema de calefacción.

El resultado que se busca también con el pilotaje del domo experimental es establecer una tecnología conceptual básica e ingeniería de detalle para analizar su viabilidad técnica económica del diseño propuesto para aplicaciones de procesos de calefacción con aire de TES con PCM mediante modelo matemáticos validado experimentalmente que permita analizar el comportamiento térmico del sistema (las temperaturas y humedades relativas de operación, el grado de fusión y solidificación, la carga y descarga de los PCMs, propiedades de los parámetros termofísicos de los materiales, entre otros) y proponiendo alternativas de diseños aplicados a las condiciones de altura.

En la ingeniería, la tecnología conceptual del pilotaje está diseñado de tal manera que proporcione los datos empíricos necesarios para desarrollar un modelo matemático que permita calcular en términos de óptimo económico el diseño del domo para el tipo de clima considerado en el proyecto y el tamaño del domo de 50 m². El escalamiento de los tamaños de domos de 30 y 75 m² será estimado referencialmente.

Como referente y con los datos disponibles de clima y radiación solar para la zona altoandina como es la ciudad de Urubamba – Cusco, se realizará para el diseño un cálculo semiempírico, porque tiene datos térmicos tomados en los 03 meses de friaje (mayo, junio y julio), como son el cálculo de la acumulación de calor con los PCMs durante el día y las pérdidas de calor en las horas que no hay radiación, en la noche principalmente.

También fue importante considerar como solución constructiva aprovechar la inercia térmica de los envolventes del domo utilizando PCM, que proporciona una gran cantidad de energía térmica que permita estabilizar la temperatura interior, reduciendo la variabilidad provocada por el clima exterior, reduciendo la demanda energética y proporcionando ahorro en el consumo energético de climatización. Complementariamente debido a la analogía eléctrica de la onda térmica como corriente alterna, actualmente se considera para su análisis calcular la impedancia térmica, el desfase térmico, el amortiguamiento y estabilidad térmica.

El cruce de variables aleatorias como clima y radiación solar con las 5 variables que podemos controlar, conducen a un escenario complejo, sin embargo, se hace menos complejo si consideramos la situación con radiación solar (día) y sin ella (noche). En el primer caso lo principal es lidiar con las variables aleatorias en que se pueden presentar el caso de una temperatura exterior superior a la interna del domo o bien que sea inferior.

En la segunda situación sin radiación solar (noche) la situación se reduce a manejar las aperturas, ya sea cerrándolos por el frío y tomando medidas para aportar calor del domo si esta falta con PCM si es necesario. La solución para enfrentar estos escenarios lo trataremos en el punto concerniente al diseño experimental y plan de corridas a ejecutar, que se verá en la metodología.

2.2.1. Problema general

¿En qué medida la optimización y análisis de desempeño de los parámetros del proceso de calefacción de un prototipo “domo experimental” utilizando TES con PCM y otras tecnologías (solar FV y Foto térmico) permite la mejora de la eficiencia energética en climatización para habitabilidad como una alternativa de desarrollo Tecnológico sostenible del módulo piloto instalado en la ciudad de Urubamba-Cusco para uso a escala comercial?

2.2.2. Problemas específicos

- a. ¿En qué magnitud los parámetros de diseño y ambientales de la alternativa Tecnológica implementada para el proceso de calefacción y otros beneficios de Confort del prototipo “domo experimental”, utilizando TES con PCMs y otras Tecnologías (solar FV y Foto térmico) permite la determinación de su Balance Energético en climatización para habitabilidad del domo instalado en la ciudad de Urubamba-Cusco?
- b. ¿Cómo influyen la variación dinámica en el tiempo (t) de los parámetros ambientales (T_{amb} , HR_{amt} , $Patmf$) y temperatura del PCM (T_{PCM}) en el estado de confort y bienestar determinado por la temperatura (T_i) y Humedad Relativa (HR_i) en el interior del domo experimental que permita optimizar y analizar su comportamiento dinámico y mejora del sistema de climatización utilizando TES con PCMs?
- c. ¿En qué medida la inercia Térmica: del PCM y envolventes del domo determinado por los parámetros de diseño: cantidad de PCMs (N), espesor del aislamiento del PER (E) y el ancho de la cámara de aire (C) influyen en el estado de Confort y bienestar determinado por la temperatura (T_i) y la humedad relativa (HR_i) en el interior del domo que permita obtener su modelamiento matemático y valores óptimos en climatización para habitabilidad que propicie la mejora de la eficiencia Energética?
- d. ¿Según los estudios económicos y de impacto ambiental, en qué proporción el ahorro de la carga térmica en climatización del “domo experimental “(E) representado por el consumo energético de la alternativa tecnológica innovada con PCMs (E_1) en relación a la tecnología actual (E_2), generará una rentabilidad económica viable (REV) y una reducción del impacto ambiental (RIA) como propuesta de desarrollo sostenible para uso escala comercial?

2.3. Justificación

El presente trabajo se justifica porque el aumento de la eficiencia energética, es sin duda, el camino más importante que se puede realizar actualmente para mejorar la economía el medio ambiente y permitir un crecimiento sostenible de la humanidad, sin caer en depresiones y medidas drásticas sociológicas, como las sufridas en el último siglo debido a la crisis energética.

Entre las mejores de eficiencia energéticas que se pueden hacer en el corto plazo, se consideran como más importantes: el aislamiento térmico, el aprovechamiento del calor o frío de la radiación solar y del frío gratis que pueden aportar sin límites al aire ambiente, tanto en forma sensible o latente.

La acumulación de calor, en general tiene gran importancia, pues permite arrancar las instalaciones por la noche, cuando las temperaturas de condensación son más bajas, siendo posibles de paso, beneficiarse de las tarifas eléctricas más económicas.

En general el aislamiento térmico, el aprovechamiento del calor o del frío del aire ambiente tanto en forma sensible o latente es importante porque permite la mejora de salud humana (niños, madres gestantes, entre otros), evitando las muertes por friaje.

2.3.1. Sustento de Mercado del producto (bien o servicio)

Las construcciones geodésicas, vale decir, cubos, pirámides, domos, etc., están teniendo cada vez mayor aceptación a nivel mundial, en especial de domo que se la configuración que menor cantidad de material uso por m^2 habitables y que si se trata de captar la energía solar es la que por su configuración tiene mayor superficie con posibilidad de hacerlo lo más tiempo. Sus múltiples usos los siguientes: viviendas permanentes, temporales y de emergencia, campamentos petroleros y minería, hoteleras, centros de salud, colegios, campamentos para retiros religiosos entre otros.

En general el domo de oferta internacional se ofrece con los siguientes beneficios: fácil transporte, rápido ensamble, larga duración, gran estabilidad estructural, 100% impermeables y aptos para todo clima, modulables, opciones de autosuficiencia con equipo solar, resistencia al viento. Actualmente Domo Perú es la empresa líder en Perú en cuanto a construcción de estructuras geodésicas. Sin embargo, las ofertas actuales de domos no consideran un aislamiento térmico considerable, siendo así que la mayor parte de la carta comercial son empresas dedicadas a la realidad de eventos (congresos, fiestas, exhibiciones, etc.) a un valor del orden de venta de \$ 150 USD por m^2 . La empresa más competitiva del exterior ofrece domos con mucha mejor aislación a un precio de \$ 316.00 USD CIF (puerto Callao). Domos Perú utiliza en la actualidad materiales más económicas que no generan un aislamiento térmico importante.

Domos Perú para poder competir internacionalmente se plantea igualar los beneficios de generar autosuficiencia energética total mediante el uso de los PCM, que a su vez permite incorporar los beneficios de ACS, Iluminación, agua y desagüe, sistema de comunicación (antena parabólica), entre otros. Y consideramos que este valor agregado debería aumentar el mercado en los usos ya enumerados. Cabe mencionar que el uso de PCMs tiene aplicaciones en otros sectores y constituyen un mercado muchísimo más amplio del que nos ocupamos en este proyecto.

Las estructuras geodésicas y en especial los domos, son cada vez más aceptados mundialmente por sus atractivos diseños, precios, portabilidad, rápido armado y desarme y, buen comportamiento antisísmico y frente al viento, en usos múltiples tales como: vivienda permanente, temporal o emergencia, consultorios, centros de salud, campamentos petroleros y mineros, turismo, construcción, industria, el agro entre otros.

Luego de estudiar el clima y geografía del Perú la propuesta fue instalar en la ciudad de Urubamba – Cusco un prototipo domo experimental para el almacenamiento de calor mediante los materiales de cambio de fase que tiene la característica de almacenar calor, en este caso mediante energía solar de la temperatura del ambiente, para climatizar el domo y ACS para ducha y cocina. El prototipo experimental permitió estudiar en detalle su funcionamiento, lo cual es motivo de desarrollo presente trabajo de investigación.

2.3.2. Innovación Tecnológica y/o productiva

El objetivo general fue dotar a los domos de un sistema de climatización y auto sustentación energética mediante TES con PCMs. (almacenamiento de energía térmica con materiales de cambio de fase).

Que almacenan; y liberan calor obtenido de la radiación solar, por una parte; por otra, incorpora otras tecnologías como la fotovoltaica y fototérmica y otros elementos que proporcionan seguridad y confort. Los PCMs que se emplearon, son materiales que a la temperatura cambio de fase – (sólido- líquido), almacenan liberan gran cantidad de energía térmica como calor latente, hasta 100 veces más que cuando se emplea un sistema para almacenar calor sensible.

El interés de este tipo de materiales radica en que, durante el cambio de fase, la temperatura se mantiene constante mientras el material va absorbiendo y liberando la energía. La temperatura de cambio de fase es característica de cada PCM y es la misma cuando almacena y libera energía. Se trata de materiales inteligentes y pasivos, los cuales actúan de manera reversible en base a las condiciones térmicas del entorno en base a las condiciones térmicas del entorno.

Los PCMs es uno de los principales sistemas de almacenamiento de energía térmica, ya que permite adaptar los periodos de suministros de energía a los periodos de demanda energética, por lo que constituyen un gran potencial para la mejora de la eficiencia energética. el PCMs solido (orgánico o inorgánico) viene en un recipiente plástico flexible cuyas dimensiones normalmente son: 480x 280x 35 mm, pesan 3 Kg (sin incluir el contenedor) y almacenan 0.2 KWH cada uno, hay otros tipos también de PCMs (PCM₄₅ para ACS).

El estudio de la realidad climática y geográfica del Perú arrojó que tendríamos 3 zonas características que hay que estudiar 1) Sierra, (frio seco) 2) Costa (cálido seco y húmedo) y 3) Selva (Cálido y húmedo). Para el presente proyecto para calefacción por aire se consideró la zona frio (helada) en la que se tiene temperaturas extremas de -5°C a -10°C y 26° a 32°C con una alta radiación solar durante el día (5.2 Kwh/m²/día). Para este caso se emplearon para calefacción los PCMs 23 y para ACS los PCMs 45, que significan lo siguiente:

Los PCMs 23 por la acción de radiación solar se funden a 23°C y cuando baja la temperatura ambiente exterior se mantiene a 23°C el PCM, en la cual se empieza a solidificar y entrega el calor a esta temperatura en el interior del domo.

Por su parte el PCMs 45 almacenará el calor a través del agua que viene de colector solar a la temperatura de 45°C, a esta temperatura entregará calor a un circuito de agua en donde está inserto el PCMs 45 que proporcionará ACS para ducha (siendo este último opcional su utilización). Cabe señalar que por estas placas podría circular aguas alienta si las condiciones los meditan. El domo está dotado de una cubierta o lamina de alta resistencia térmica y tiene zonas traslucidas para captar la radiación solar en donde están emplazada los PCMs y las placas fotovoltaicas en el exterior.

El pilotaje realizado en la zona fría permitió estudiar al detalle el funcionamiento del domo experimental de acuerdo al objetivo estudiado siendo el domo 50 m² en su base y el tiempo de pilotaje fue tres meses en la época de friaje (heladas): Mayo, junio y julio.

Tabla 8

Atributos, características y novedades tecnológicas

Características de la nueva alternativa tecnológica	Características de la tecnología actual
Climatización en zonas frías de los domos calefactado mediante acumuladores de energía solar térmica con materiales de cambios de fase (TES con PCMs)	Climatización de ambientes mediante el equipamiento de calefacción y enfriamiento con energía eléctrica o petróleo (aire acondicionado).
Calentamiento de agua caliente sanitaria (ACS) mediante con TES con PCM.	Carece de un sistema de almacenamiento de energía para calentamiento de agua sanitaria (ACS).
El costo de los sistemas de calefacción con TES con PCMs es bajo, ahorro de energía y reducción de la contaminación.	Mayores costos de sistemas de calefacción, así como mayor consumo de energía, contaminación y mantenimiento.

2.4. Objetivos

2.4.1. Objetivo general

Optimizar y analizar los parámetros de diseños y ambientales del proceso de calefacción de un prototipo “domo experimental” que permita la mejora de eficiencia energética en climatización para habitabilidad, utilizando TES con PCMs y otras tecnologías (solar FV y Foto térmico) como una alternativa de desarrollo Tecnológico sostenible del módulo piloto instalado en la ciudad de Urubamba-Cusco para uso a escala comercial.

2.4.2. Objetivos específicos

- a. Determinar la magnitud de los parámetros de diseño y ambientales de la alternativa Tecnológica implementada para el proceso de calefacción y otros beneficios de Confort del prototipo “domo experimental”, utilizando TES con PCMs y otras Tecnologías (solar FV y Foto térmico), que permite la determinación del Balance Energético en climatización para habitabilidad del Módulo Piloto instalado en la ciudad de Urubamba-Cusco.
- b. Determinar la influencia de la variación dinámica en el tiempo (t) de los parámetros ambientales (T_{amb} , HR_{atmf} , $Patmf$) y Temperatura del PCM (T_{PCM}) en el estado de Confort y bienestar determinado por la temperatura (T_i) y Humedad Relativa (HR_i) en el interior del domo experimental que permita optimizar y analizar su comportamiento dinámico y mejora del sistema de climatización utilizando TES con PCMs.
- c. Analizar el efecto de la inercia Térmica: del PCM y envolventes del domo determinado por los parámetros de diseño: cantidad de PCMs (N), espesor del aislamiento del PER (E) y el ancho de la cámara de aire (C) en el estado de Confort y bienestar determinado por la temperatura (T_i) y la humedad relativa (HR_i) en el interior del domo que permita obtener su modelamiento matemático y valores óptimos en climatización para habitabilidad que propicie la mejora de la eficiencia energética.
- d. Determinar según los estudios económicos de impacto ambiental, en qué proporción el ahorro de la carga térmica en climatización del “domo experimental” (E) representado por el consumo energético de la alternativa tecnológica innovada con PCMs (E1) en relación a la tecnología (E2), que permita generar una rentabilidad económica viable (REV) y una reducción del impacto ambiental (RIA) como propuesta de desarrollo sostenible para uso escala comercial.

2.5. Hipótesis

2.5.1. Hipótesis general

Mediante la optimización y el análisis de desempeño de los parámetros de: diseño, técnicos operativos y ambientales se podrá mejorar el sistema de climatización, auto sustentación energética mediante TES con PCMs, y con la incorporación de otras

tecnologías como la FV se podrá lograr seguridad y confort, como una alternativa técnica económica viable de desarrollo sostenible para uso a escala comercial.

2.5.2. Hipótesis específicas

- a. Mediante la simulación de la variación de los parámetros de diseño (T_i , T_e , H_{rsol} , otros) de la alternativa tecnológica para la climatización y otros beneficios de confort del prototipo “domo experimental”, utilizando acumuladores de calor de energía solar térmico con PCMs se determinará el balance energético del domo (BEDE) instalado en la ciudad de Urubamba-Cusco.
- b. Según la variación dinámica y optimización de los parámetros ambientales (T_{amb} , H_{Ramb} , P_{atm}) se podrá determinar las temperaturas (T) y humedades relativas (HR) en el interior del domo experimental que permita analizar su comportamiento dinámico y optimización del sistema de calefacción, utilizando acumuladores de energía solar térmica (TES) con PCMs.
- c. Mediante la variación de los parámetros técnicos-operativos como: la cantidad de materiales de cambio de fase (N), el ancho de la cámara de aislamiento (C) y el espesor del aislamiento del PER (E) se podrá determinar el modelamiento matemático y los valores óptimos de los parámetros de climatización para habitabilidad que son la temperatura (T) y la humedad relativa (HR), en el interior del domo, que propicia conseguir la mejora de la eficiencia energética y el estado de confort y bienestar.
- d. Mediante los estudios económicos y de impacto ambiental se podrá determinar el ahorro de la carga térmica en climatización del domo experimental (E), representado por el consumo energético de la alternativa tecnológica innovada con PCMs (E_1) en relación a la tecnología actual (E_2) que permita generar una rentabilidad económica viable (REV) y una reducción del impacto ambiental (RIA) como propuesta de desarrollo sostenible para uso a escala comercial.

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de estudio

3.1.1. Ubicación Geográfica

REGIÓN	: CUSCO
PROVINCIA	: URUBAMBA
UBIGEO	: 081301

Altitud: Está ubicado a una altitud de 2869 msnm en la cuenca del valle sagrado a 57km al noreste de la ciudad del Cusco, por la ruta vía Cusco, Chinchero, Urubamba, a la margen derecha del río Vilcanota.

Coordenadas

Urubamba esta entre las coordenadas 13° 18'37", longitud sur y 72° 07'12" Longitud Oeste, es una de las trece provincias del departamento del Cusco.

Superficie

Ocupa una superficie de 128.28km²

Limites

- Por el Norte con la provincia de la Convención
- Por el Sur con el Distrito de Maras
- Por el Este de con el Distrito de Yucay
- Por el Oeste con el Distrito de Ollantaytambo

Clima

Tiene un clima inmejorable durante todo el año y presenta un hermoso paisaje y con una vista panorámica del valle sagrado de los incas y rodeado por los imponentes nevados de Chicón y Pumahuanca, es un lugar fantástico de aventuras y practica del turismo, caminatas, canotaje, ciclismo de alta montaña, parapente, así como para interesantes paseos a caballo y tracking.

En la actualidad la ciudad de Urubamba goza de una gran actividad turística dada su estratégica ubicación den la región del Cusco, ya que es “la puesta de ingreso al icono de la Peruanidad como la ciudadela Inka de Machupicchu considerado como una de las siete maravillas del mundo, donde las inversionistas locales nacionales y extranjeros vienen invirtiendo considerables proyectos en diferentes rubros, trayendo desarrollo económico y social que genera la prosperidad a nivel poblacional.

Población

El número de habitantes del Distrito de Urubamba alcanza a un total de 21, 879 habitantes, estimando al 30 de junio del 2017, según fuente INEI.

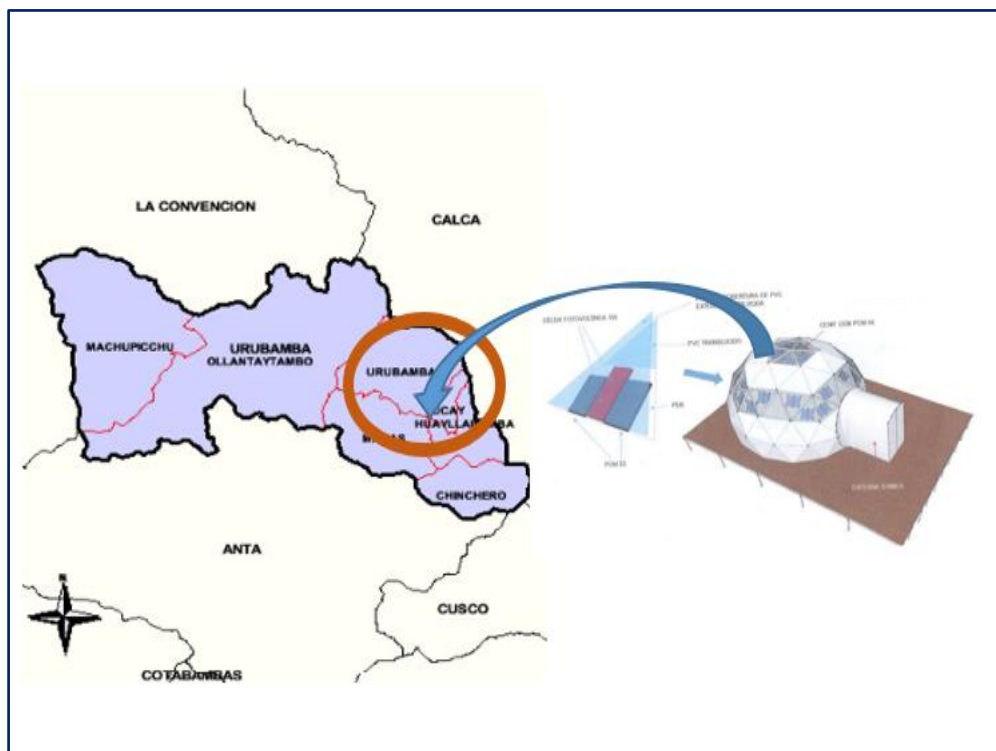


Figura 11. Mapa de provincia de Urubamba.

Fuente: INEI 2017.

3.1.2. Disponibilidad y accesibilidad del lugar

La ciudad de Urubamba por su ubicación geográfica es de fácil acceso, su vía de comunicación es por la carretera asfaltada que va del Cusco a Urubamba, localizado a 57 Km al noroeste de la ciudad del Cusco, regados por el río Vilcanota (Valle Sagrado interandino de los Incas), donde se produce una variedad muy especial de maíz (maíz grande de Urubamba), rodeado de bellos paisajes. El clima es agradable durante todo el año variando entre templado y cálido, según referencias la temperatura varía entre los 4 y 21°C, con temperatura promedio de 18°C, alcanzando una temperatura máxima del orden de 28°C y mínima de 0°C en el caso más extremo, las estaciones se dividen en invierno y verano, siendo las lluvias de mayor intensidad en esta última que llueve en algunas tardes y/o noches con escasa precipitación fluvial, es una zona semiárida con humedad relativa promedio del orden de 70%. En la parte alta (Chincheros y Maras) produce papa, habas, maíz, oca, olluco y en Urubamba produce arvejas, habas y todo tipo de hortalizas (zapallo, calabazas, etc.). La cuenca del Vilcanota dispone de 2 ríos, el Vilcanota (Wilcamayo) que va al Cusco y el río Zuruma que va a Puno (Santa Rosa, Melgar) se dispone el Vilcanota 3 ríos Urubamba, Pumahuanca y Chicón, siendo estas 2 últimas de la parte oriental que confluyen al río Machupicchu que está al juntarse con el río Apurímac nace el río Ucayali que a su vez al juntarse con el Marañón va al río Amazonas.

Todos estos factores propician que todo el valle que rodea el Urubamba sea muy fértil y un centro turístico cada vez más codiciados.

3.1.3. Actividad turística

Presenta un hermoso paisaje y con una vista panorámica del valle sagrado de los incas y rodeado por los imponentes nevados de Chicón y Pumahuanca es un lugar fantástico de aberturas y práctica del turismo, caminatas, canotaje, ciclismo de alta montaña parapente, así como para interesantes paseos y tracking.

En la actualidad la ciudad de Urubamba goza de una gran actividad turística dada tu estratégica ubicación en la región de cusco, ya que es la puerta de ingreso al icono de la peruanidad que es la ciudadela inca de Machupicchu, considerado como una de las siete maravillas del mundo, donde los inversionistas locales, nacionales y extranjeros

vienen invirtiendo considerables proyectos en diferentes rubros, trayendo desarrollo económico y social que genera prosperidad a nivel poblacional, regional y nacional.

3.1.4. Datos climatológicos

3.1.4.1. Datos de radiación solar medidos y contrastados con registro satelital (Rad. Solar)

El departamento del Cusco tiene 13 provincias ubicados en diferentes pisos ecológicos. En la Tabla 02 se presentan los valores medios diarios mensuales de radiación solar en la región del Cusco, estableciéndose 4 zonas donde están ubicadas las estaciones meteorológicas, correspondiendo la zona 2, el área de estudio donde está ubicado el prototipo experimental.

Zona 1: Estación Kayra (provincia Cusco, distrito San Jerónimo: latitud 13°54'S, Longitud 71°54'O, altitud 3219 m.s.n.m.) comprende las provincias de Cusco, Anta y Canchis, con una media diaria anual de 5.2 KWH/m²-día.

Zona 2: Estación Urubamba (provincia Urubamba: Latitud 13°17'S, Longitud 72°07'O, altitud: 2900 m.s.n.m.) comprende las provincias de: Urubamba, Calca y Quispi Canchis, con valores medios diario anuales de **5.3 KWH/m²-día.**

Zona 3: Estación Puno (provincia Puno; Latitud 15°50'S, Longitud 70°02'O, altitud 3825 m.s.n.m.) comprende las provincias de: Chumbivilcas, Canas y Espinar, cuyas características climáticas y ecológicas son análogos a la zona altiplánica del departamento de Puno, con valores medios diarios anuales de 6.0 KWH/m²-día.

Zona 4: Estación Quillabamba (Provincia La Convención, distrito Quillabamba: Latitud: 12°52'S, Longitud 72°43'O, altitud 1000 m.s.n.m.) comprende las provincias de Quillabamba y las zonas de ceja de montaña de las provincias de Calca, Paucartambo, con valores medios diarios anuales de 4.7 KWH/m²-día.

En la Tabla (9), se presenta los valores medios diarios mensuales para las cuatro zonas indicadas.

Tabla 9

Valores medios diarios mensuales de radiación solar en el Cusco

Mes	Zona 1 (MJ/m ²)		Zona 2 (MJ/m ²)		Zona 3 (MJ/m ²)		Zona 4 (MJ/m ²)	
	Hd	Hd*	Hd	Hd*	Hd	Hd*	Hd	Hd*
Enero	18.3	17.7	18.4	18.7	21.9	21.8	15.8	15.8
Febrero	17.9	18.7	18.2	20.2	21.5	22.2	13.3	15.6
Marzo	19.1	18.6	19.3	19.2	20.5	21.3	14.4	16.7
Abril	17.5	18.8	17.8	17.6	20.8	21.6	15.1	17.1
Mayo	18.6	17.9	18.9	17.8	19.8	20.5	15.9	17.4
Junio	15.5	16.3	15.8	16.0	18.7	18.6	15.4	15.9
Julio	17.1	17.4	17.5	17.2	18.9	18.8	17.3	16.7
Agosto	20.8	18.3	21.3	18.1	20.8	20.4	17.7	16.3
Septiembre	19.0	19.3	19.6	17.5	22.8	23.0	19.4	16.9
Octubre	19.4	20.7	19.9	22.0	23.7	23.6	20.5	18.0
Noviembre	20.8	21.4	21.2	21.2	24.7	23.8	18.4	17.5
Diciembre	21.8	20.5	22.1	20.5	23.0	22.4	16.6	15.7
Promedio	18.8	18.8	19.1	18.8	21.4	21.5	16.6	16.6
io	17	00	67	33	25	00	50	33

Fuente: CECADE 2012. Hd: valor medido, Hd*: valor calculado por correlación.

Según CECADE 2012, registra datos de valores medios mensuales de radiación solar de 2 años de la estación de Urubamba – Cusco (zona 2) para una latitud de -13°17'5", Longitud -72°07'0" y una altitud promedio de 2900 m.s.n.m. La radiación promedio diario mensuales de 19.167 MJ/m²-día, que corresponde al valor de: 5.32 Kwh/m²-día.

La radiación promedio de los meses de friaje más bajo (abril, mayo, junio y julio) es:

$$\text{Rad. Promedio diario mensual} = \frac{17.8+18.9+15.8+17.5}{4} = 17.5 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

$$\text{Rad. Promedio diario mensual} = 17.5 \times \frac{1000}{3600} = 4.86 \frac{\text{Kwh}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

La radiación más baja, que corresponde al mes de junio es de:

$$\text{Rad. mínima (junio)} = 15.8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^2\text{-día}} = 15.8 \times \frac{1000}{3600} = 4.4 \frac{\text{KwH}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

Según datos obtenidos de NASA – EE-UU (Surface Meteorology and Solar Energy – Tables) para una latitud de -13.305° y longitud -72.116° y elevación 3185 m de la ciudad de Urubamba registra una radiación diaria media mensual (en una superficie horizontal), para un promedio anual de 22 años de: $5.54 \text{ KwH/m}^2\text{-día}$.

Resultando para los meses de friaje (mayo, junio, julio y agosto) de:

$$\text{Rad. Prom. Friaje} = \frac{5.29 + 5.07 + 5.18 + 5.37}{4} = 5.23 \text{ KwH/m}^2\text{-día}$$

Tabla10

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m2/day)

Lat-13.305 Lon -72.116	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	5.51	5.52	5.34	5.20	5.29	5.07	5.18	5.37	5.72	6.00	6.36	5.94	5.54

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

Realizado una evaluación del lugar, mediante la medición *in situ* y verificado según el mapa de radiación solar en el Perú se tiene un valor promedio de: $5.22 \text{ KwH/m}^2\text{-día}$.

Para tener valores confiables de información, este valor fue verificado, según datos meteorológicos de Senhami y contrastados con datos satelitales de la NASA – EE.UU. del archivo meteorológico NOAA READY disponible en la página web. De los datos obtenidos se considera para el caso del diseño, el valor medio diario mensual para los meses de friaje de:

$$\text{Rad. Prom. diario mensual} = 5.22 \frac{\text{KwH}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

3.1.4.2. Parámetros del ambiente exterior

Los parámetros del ambiente exterior, depende de la localización geográfica del domo objeto de estudio, instalado en la ciudad de Urubamba – Cusco a 2875 m.s.n.m., cuyos datos necesarios para definir el ambiente externo del domo, pertenecen a los meses más fríos del año: mayo, junio y julio. Los parámetros del ambiente exterior donde está instalado el domo, varían a lo largo del año, no siendo iguales para el invierno y el verano, así como para el día y la noche. Por lo que se detallan las condiciones ambientales exteriores para los meses de friaje considerados en el estudio.

3.1.4.2.1. Temperatura ambiental exterior (Tex)

Según datos obtenidos de Nasa – EE.UU., para una latitud de -13.305° y longitud de -72.116° de la ciudad de Urubamba, se tiene una temperatura exterior promedio anual registrados de 22 años de: $T_{\text{ex, anual}} = 9.57^\circ\text{C}$

Resultando de los datos obtenidos una temperatura exterior promedio diario mensual para los meses más bajos: mayo, junio, julio y agosto de:

$$T_{\text{Ex, Friaje}} = \frac{8.5 + 7.32 + 6.9 + 8.13}{4} = 7.7125^\circ\text{C} \cong 8^\circ\text{C}$$

Tabla11

Monthly Averaged Air Temperature At 10 m Above The Surface Of The Earth (°C)

Lat- 13.305 Lon - 72.116	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	10.9	10.7	10.7	9.97	8.50	7.32	6.90	8.13	9.30	10.4	10.8	11.0	9.57
Minimum	8.69	8.47	8.47	7.52	5.11	3.12	2.08	3.30	5.17	6.94	8.02	8.69	6.28
Maximum	13.4	13.3	13.4	12.9	12.4	12.1	12.4	13.6	13.9	14.5	14.2	13.6	13.3

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

Así mismo, según mediciones realizados *in situ*, mediante un sensor (CH8) ubicado en la parte exterior del domo en el año 2015 para los meses de friaje de mayo, junio y julio, resultó un promedio para el día y la noche de: 20.324 y 6.71°C respectivamente, como se indica a continuación.

Tabla 12

Valores promedio de temperatura ambiental del día y noche medidos en los meses de friaje 2015.

	Mayo	Junio	Julio	Promedio
Para el día	20.435°C	20.706°C	19.832°C	20.324°C
Para la noche	7.45°C	6.889°C	5.795°C	6.71°C

Resultando un promedio trimestral para el día y la noche de 20.324°C y 6.71°C respectivamente, como se indica a continuación:

Es probable que existan días de solo lluvias, días nublados pero que en los meses

de Pilotaje fueron bajos. Sin embargo, según fuente de U.S. Standard Atmosphere Supplements de EE.UU. sobre propiedades del aire en función a la altura sobre el nivel del mar se estima que existan días con temperatura baja del orden de

$T_{ex} = [-3 \text{ a } -2^{\circ}\text{C}] \Rightarrow T_{ex} \cong -3^{\circ}\text{C}$ (considerado por el diseño)

Por lo tanto:

Analizando las temperaturas ambientales anteriores para los meses de friaje de 7.71°C en el 1er. caso (obtenido como promedio de NASA – EE.UU.) y 6.71°C en el 2do. caso (obtenido como promedio para las mediciones realizadas *in situ* para la noche). Se considera para el cálculo de la demanda térmica el 2do. caso por tener la temperatura más baja como promedio trimestral medido para los meses más críticos de friaje durante la noche (de 6 pm. a 6 am.).

$$T_{amb} = T_{ex} = 6.71^{\circ}\text{C}$$

De la misma forma para el diseño para el cálculo del coeficiente global $(UA)_g$, se considera la temperatura exterior del diseño más bajo de:

$$T_{ex,diseño} = T_{ex,mín} = -3^{\circ}\text{C}$$

Con este valor aseguramos que nuestro sistema de calefacción responderá a las condiciones meteorológicas más desfavorables, teniendo una carga térmica máxima del domo y garantizándose de esta forma un diseño más adecuado.

Con estos valores se determina para el diseño el coeficiente global máximo:

$$(UA)_{g,\max} = \frac{Q_{d,\max}}{(T_i - T_{ex,\min})} = \frac{20.11 \text{ Kwh}}{(15 - (-3))^\circ\text{C}} = 1.1172 \frac{\text{Kwh}}{^\circ\text{C}}$$

Siendo la demanda térmica promedio trimestral de:

$$Q_d = (UA)_{g,\max} (T_i - T_{amb}) = 1.1172 \frac{\text{Kwh}}{^\circ\text{C}} (15 - 6.71)^\circ\text{C}$$

$$Q_d = 9.26 \text{ Kwh}$$

3.1.4.2.2. Humedad relativa ambiental o humedad relativa exterior (HRe)

La humedad relativa ambiental varía en función inversa a la temperatura ambiental exterior (si la temperatura exterior aumenta, la humedad relativa exterior disminuye), variando durante el año, teniendo diferencias entre el invierno y verano, así como entre el día y la noche.

Según datos obtenidos de NASA – EE.UU. para la latitud de -13.305° y longitud de -72.116° registrada de la ciudad de Urubamba, se tiene una Humedad Relativa exterior promedio anual registrado de 22 años de: $HR_{e \text{ anual}} = 74.4\%$.

Resultando de los datos obtenidos una humedad relativa exterior promedio diario mensual para los meses de friaje de mayo, junio y julio de:

$$HR_e = \frac{76.3 + 67.8 + 58.8}{3} = 67.6\% \text{ (Aproximado al mes de junio)}$$

Tabla13

Promedio de Humedad Relativa mensual en %

Lat- 13.305 Lon - 72.116	Jan	Feb	Mar	Apr	Ma y	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Averag e
22-year Averag e	85.5	85.5	84.9	83.1	76.3	67.8	58.8	57.4	64.3	69.9	76.7	83.1	74.4

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

Así mismo, según mediciones realizadas *in situ*, mediante el sensor (CH8) ubicado en la parte exterior del domo (año 2015) para los meses de friaje, resultó un promedio trimestral para el día y la noche de: 41.261% y 55.44% respectivamente como se indica a continuación:

3.1.4.2.3. Presión atmosférica local y variación con la altura

Según datos obtenidos de NASA - EE.UU., para la ciudad de Urubamba – Cusco, en la cual está ubicado el domo experimental, se tiene del registro meteorológico de 22 años, a la presión atmosférica local promedio anual de 69.8 KPa (0.698 bar). Resultando de los datos obtenidos la presión atmosférica local para los meses de Friaie de mayo, junio y julio un valor promedio de 69.9 KPa (0.699 bar).

Tabla 14

Presión atmosférica promedio mensual en KPa.

Lat-13.305 Lon -72.116	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Anual Avera ge
22-year Average	69.7	69.8	69.8	69.8	69.9	69.9	69.9	69.9	69.9	69.8	69.7	69.8	69.7

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

Así mismo según mediciones realizadas *in situ*, mediante un sensor de presión barométrica, ubicado en una pequeña cabina exterior del domo se registró para los meses de friaje: mayo, junio y julio del 2015, un promedio trimestral para

el día y la noche casi constante de 0.7203 bar y 0.722 bar respectivamente, como se indica a continuación.

Tabla 15

Valores promedio medido de humedad relativa ambiental de día y noche de los meses de friaje 2015.

Presión Atmosf.	Presión Atmosférica de los meses de friaje			Promedio de presión atmosférica local
	Mayo	Junio	Julio	
Valores Promedio				
Para el día	0.72 bar	0.72054 bar	0.72028 bar	0.7203 bar
Para la noche	0.7215 bar	0.7222 bar	0.7218 bar	0.7218 bar

Las propiedades del aire para diferentes presiones, dependiendo de la altura sobre el nivel del mar, se indican en el cuadro adjunto. Para el caso de la ciudad de Urubamba, que se encuentra a una altitud de 2875 m.s.n.m., se obtuvieron las propiedades del aire por interpolación.

Tabla 16

Propiedades del aire a diferentes presiones, dependiente de la altura sobre el nivel del mar.

Altura H (m)	Presión P(KPa)	Presión P(Atm)	Densidad ρ (Kg/m ³)	Viscosidad μ (Kg/m-seg)	Conductividad Térmica K (W/m °K)	Calor específico Cp(KJ/Kg °K)	Variación de conductividad h (h ² /h ⁴)
nivel del mar	101.33	1	1.225	1.78×10^{-5}	0.0253	1006.1	1.000
1000	89.88	0.89	1.112	1.76×10^{-5}	0.0249	1005.9	0.941
2000	79.5	0.78	1.007	1.73×10^{-5}	0.0243	1005.8	0.879
2875	71.29	0.70	0.921	1.695×10^{-5}	0.02386	1005.71	0.826

300	70.1	0.69	0.909	1.69×10^{-5}	0.0238	1005.7	0.822
0	2						
400	61.6	0.61	0.819	1.66×10^{-5}	0.0233	1005.6	0.768
0	6						
500	54.0	0.53	0.736	1.62×10^{-5}	0.0228	1005.5	0.716
0	5						

Correlación de Grimison

$$\overline{Nu_D} = 1.13 \cdot C_1 \cdot C_2 \cdot Re_D^m \cdot Pr^{1/3}$$

$$2.000 < Re_D < 40.000 \quad Pr \geq 0.7$$

M
0.562

“m” depende de la configuración y distancia entre cilindros.

$$\frac{h_2}{h_1} = \frac{k_2 \cdot Re_{D_2}^2 \cdot Pr_2^{1/3}}{k_1 \cdot Re_{D_1}^2 \cdot Pr_1^{1/3}}$$

Donde 1 se refiere a presión a nivel del mar

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{k_2}{k_1} \right) \cdot \left(\frac{\rho_2 \cdot \mu_1}{\rho_1 \cdot \mu_2} \right)^{0.562} \cdot \left(\frac{Cp_2 \cdot \mu_2 \cdot k_1}{Cp_1 \cdot \mu_1 \cdot k_2} \right)^{1/3}$$

Para 2875 m.s.n.m.

$$\frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{0.0238}{0.0253} \right) \cdot \left(\frac{0.909 \times 1.78 \times 10^{-5}}{1.225 \times 1.69 \times 10^{-5}} \right)^{0.562} \cdot \left(\frac{1005.7 \times 1.69 \times 10^{-5} \times 0.0253}{1006.1 \times 1.78 \times 10^{-5} \times 0.0238} \right)^{1/3}$$

$$\frac{h_2}{h_1} = 0.94071146 \times 0.87065106 \times 1.00294978399$$

$$\frac{h_2}{h_1} = 0.826$$

3.1.4.2.4. Velocidad de Viento

Según datos obtenidos de NASA EE.UU., para la ciudad de Urubamba Cusco, donde está ubicado el domo experimental, se tiene del registro meteorológico de 10 años la velocidad del viento promedio anual de 2.57 m/s. De lo cual resultando de los datos obtenidos de velocidad de viento para los meses de friaje mayo, junio y julio un valor promedio de 2.83 m/s. Se debe indicar que no hay ráfagas de viento y si existe son rara vez.

Tabla 17

Velocidad de viento promedio mensual en (m/s)

Lat-13.305 Lon -72.116	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	2.35	2.33	2.28	2.36	2.54	2.81	3.13	2.84	2.72	2.54	2.54	2.45	2.57

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

3.1.4.2.5. Precipitación

De los datos obtenidos de NASA – EE.UU., para la ciudad de Urubamba – Cusco se dispone del registro meteorológico de 22 años el promedio de la precipitación anual de 2.71 mm de agua, de los cuales para los meses de friaje (mayo, junio y julio) tiene un valor promedio diario mensual de 0.82 mm/día. La menor cantidad de lluvia ocurre en junio, julio y agosto con un promedio de 0.69 mm/día. La mayor parte de la precipitación ocurre de diciembre a marzo, siendo mayor en enero con un promedio de 5.55 mm/día.

Tabla 18

Promedio de Precipitación mensual (mm/día)

Lat-13.305 Lon -72.116	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual Average
22-year Average	5.55	5.54	4.44	2.46	1.12	0.67	0.66	0.74	1.24	2.46	3.55	4.3	2.71

Fuente: NASA Surface meteorology and Solar Energy.

3.1.5. Descripción de la vivienda, Prototipo “Domo experimental”

El objetivo es dotar al domo experimental, que representa a una casa tipo unifamiliar de un sistema de calefacción y de auto sustentación energética mediante acumuladores solares con materiales de cambio de fase (PCM) que almacenan calor obtenidos de la radiación solar por una parte y por otra, incorporar otras tecnologías como la fotovoltaica y otros elementos que proporcionan seguridad y confort, contando para ello con energía para iluminación y telecomunicación en tiempo real.

El domo experimental está conformado por una envoltura que esta sobre el soporte de una estructura metálica semiesférico uniformemente distribuido que representa las paredes y el techo. La envoltura o cerramiento consta de una película externa de aire (ambiente exterior), una cobertura externa de PVC, un material aislante de polietileno reticulado (PER), un cámara de aire por donde circula el aire caliente y una cobertura interior de PVC. El piso tiene un pequeño sobre cimiento de 25 cm, cuyo acabado es de parket, dispone de un área traslúcida que representa a una ventana a $2/3$ de altura del domo, en la cual están colocados los acumulares solares PCM23 en todo el contorno que permite absorber la radiación solar durante el día (cargándose el acumulador) y durante la noche se descarga calentando el aire que circula por diferencia de densidades, al interior del domo.

Este proceso de calefacción permite en el día (6 am a 6 pm) cargarse el acumulador solar PCM23 (material de cambio de fase a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ como calor latente) en el cual el material acumulador cambia de fase de estado sólido a líquido (licuación) y en la noche se descarga (cuando no hay sol) en el cual el material acumulador invierte la fase en sentido inverso de líquido a sólido (solidificación), repitiéndose el ciclo diariamente debido a las pérdidas de calor. Se dispone de dos puertas (interna y externa) y en la noche se cierra el área traslúcida.

El domo cuenta con otros beneficios de confort como son: generación fotovoltaica (FV) de energía eléctrica para iluminación y funcionamiento de artefactos electrodomésticos y dispositivos electrónicos, para uso de internet, radio, TV y telecomunicación mediante una antena parabólica en tiempo real, se dispone también de agua caliente sanitaria (ACS) para uso de ducha y cocina, así como de los servicios básicos de agua y desagüe.

El área base del domo es de 50 m^2 , cuya distribución de planta conforma una cocina, sal comedor dormitorio para dos camas, servicios higiénicos y un pequeño deposito.

3.1.5.1. Descripción de los ambientes del domo

La vivienda consta de 50 m² distribuidos en una única planta en la que se sitúan una sala comedor, un dormitorio con dos camas, una cocina un baño y un depósito.

Para el diseño de la vivienda se han tomado diversos factores para mejorar su eficiencia, la orientación y la forma de diseño ya que estos juegan un papel esencial en las pérdidas del calor del domo, se puede indicar que la estructura compacta y de forma redondeada como es el domo tiene menores pérdidas que las estructuras que tienen numerosos entradas y salientes.

A sí mismo el aislamiento térmico utilizado como es el material polietileno reticulado (PER) influye decisivamente en las pérdidas del calor del domo. En las zonas frías como es Urubamba interesa que haiga mayor superficie acristalada (Ventana o área traslucida) en las orientaciones con mayor radiación solar siendo esta la orientación norte para el caso del domo instalado en Urubamba. A continuación, se indica la distribución de planta del domo experimental.

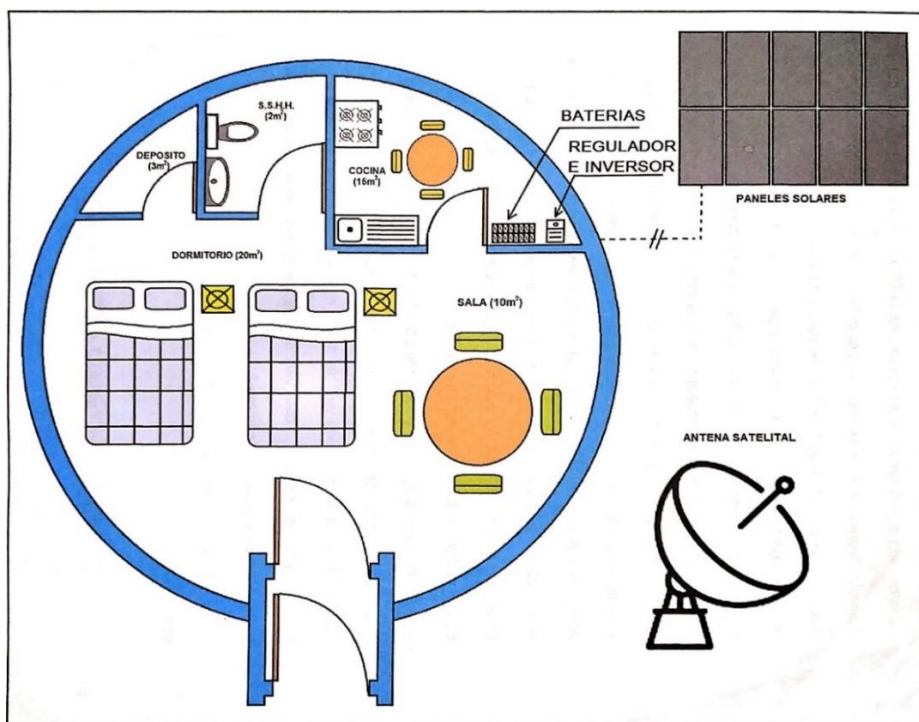


Figura 12. Distribución de planta del domo experimental

3.2. Población

3.2.1. Población

La población según el diseño experimental está fijada para satisfacer la demanda térmica según el costo económico para 2 sectores. Para el caso del turismo además de la calefacción tiene otros beneficios de confort como agua caliente sanitaria (ACS) para ducha y cocina, iluminación, comunicación en tiempo real, servicios de agua y desagüe y usos de artefactos electrodomésticos. Y para el sector rural para el caso de emergencia o desastres puede usarse en un inicio solo para calefacción, luego calefacción e iluminación y seguir adicionando según la demanda energética requerida y los costos que estas representan. Es necesario indicar que para el caso de emergencias una institución (Gobierno Regional, Municipal) puede tener como reserva ya que su instalación es de un rápido armado y desarmado (3 a 4 horas en promedio),

3.3. Muestra

Es la misma población representativa fijada para los dos sectores que van a hacer uso del domo comercial según los beneficios, usos y costos que estas representan, correspondientes a un diseño propiamente cuasiexperimental, para un prototipo “Domo Experimental”, previamente diseñado e implementado, como una unidad experimental (UE).

- **Diseño Experimental**

Se considero como consecuencia de lo que vamos a medir, según las predicciones de las hipótesis planteadas para su contrastación. Según la estructura lógica del experimento se planteó primero la manera en la cual los tratamientos son asignados a la unidad experimental, que es el prototipo domo experimental. Se realizó tres tratamientos a la UE (cuyos factores son la cantidad de placas del acumulador PCM23 (N), el espesor del polietileno PER (E) y el ancho de la cámara de aire (C) que prácticamente este último fue constante por las condiciones del diseño), cuyo efecto sobre el estado de confort (variable respuesta) se determinó.

Otro aspecto tomado en cuenta fue el diseño espacial y temporal del experimento, indicando donde y como ubico las placas de PCM, el cerramiento PER, la cámara de aire

y cuando debe medirse. Previamente se realizó el diseño de las componentes del proceso de calefacción calculándose el balance energético (BE).

Se determinó como variables respuestas primero el comportamiento de los parámetros de temperatura (T) y humedad relativa (HR) dentro y fuera del domo durante las 24 horas del día medidos con los ocho sensores; luego se determinó el comportamiento de la temperatura (T_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo (como parámetros de confort), para ver el efecto de los parámetros ambientales (temperatura, humedad y presión atmosférica) y el efecto del acumulador (T_{PCM}) durante las 24 horas del día, utilizando el diseño de regresión lineal múltiple, finalmente se determinó el estado de confort en el interior del domo (T_i , HR_i), según la variación de los parámetros de diseño de los materiales sostenibles (N_{PCM} , E_{PER} , C_{CA}) utilizando el diseño factorial compuesto 2^3 .

Con los resultados obtenidos fue posible determinar el ahorro energético y la reducción del impacto ambiental, así como el periodo de la recuperación de la inversión, que es aproximadamente de tres años y medio determinado por el método del indicador econométrico Payback.

Es necesario indicar que para la estimación del modelo del diseño de experimentos se consideró cuatro fases típicas:

1. Identificación, que permitió determinar la ecuación del modelo, variables dependientes e independientes y el tipo de diseño adecuado.
2. Estimación, del modelo matemático y estadístico más adecuado y el uso de herramientas informáticas utilizadas: Matlab, Minitab y Diseño Experto.
3. Diagnóstico, se realizó los contrastes para la prueba de hipótesis y diagnosticar la significancia grupal (F – Fisher) e individual (t-Student) de sus parámetros del modelo, sus parámetros estadísticos y los supuestos del residuo (normalidad, varianza constante y aleatoriedad).
4. Predicción, con el modelo del diseño adecuado obtenido del proceso de calefacción, se predijo sus valores óptimos para la temperatura y humedad relativa en el interior del domo como parámetros de confort.

3.3.1. Análisis y procesamiento de datos de las variables de estudio

El conjunto de datos de las observaciones de los parámetros ambientales (Tamb, HRamb, PAtmf, Temperatura del acumulador PCM 23 (Tpcm), Registrados (cada minutos) por 8 sensores marca Oregon (Ubicados en los ambientes exterior e interior del domo), durante los 3 meses de friaje (mayo, junio y julio), los cuales conforman el universo de datos de la población que está determinado por:

$$N^{\circ} \text{ de datos} \\ = (8) \text{ Sensores} \left(\frac{2 \text{ Variables}}{\text{Sensor}} \times \frac{60 \text{ datos}}{\text{men} * \text{Variable}} \times \frac{60 \text{ min}}{\text{hr}} \times \frac{24 \text{ hr}}{\text{dia}} \right)$$

$$N^{\circ} \text{ de datos} = 1,382,400 \text{ datos por dia}$$

Estos datos obtenidos son grandes y fueron almacenados en una Bitácora de una PC, cuyo monitoreo de estos datos se transmitían en tiempo real. Se tuvo como reserva 3 sensores marca Tinitac si es que fallara alguno de los 8 sensores, lo que permitió garantizar los datos obtenidos.

Los datos con la cual se trabajó, fue considerar primero para obtener por cada parámetro un dato, por cada hora del día, luego se obtuvo el promedio mensual con la cual se determinó sus comportamientos dinámicos de los parámetros medidos con los 8 sensores durante los 24 hora del día para las temperaturas y humedades relativas y un dato por cada hora para la presión atmosférica, teniendo un total de datos medidos de temperatura Humedad Relativa y presión Atmosférico determinado por:

$$N^{\circ} \text{ total de datos mensual} = 8 * 24 \text{ datos de temp} + 8 * 24 \text{ datos de HR} + 24 \text{ datos Atm} \\ N^{\circ} \text{ total de datos mensual} = \mathbf{408 \text{ datos.}}$$

Con estos datos obtenidos se construyó las gráficas de las 8 temperaturas, 8 humedad relativa y la presión Atmosférica medidos durante las 24 horas promedio de cada mes de friaje (mayo, junio y Julio).

El segundo registro de datos para el **diseño de regresión lineal múltiple**, se realizó para el promedio trimestral de las 7 variables (Tex, HRex, t, TPCM, PAtmf, Ti, HRi) durante las 24 horas, teniendo una muestra representativa de datos determinados por:

N° total de datos trimestral para regresión múltiple =

$$\frac{24 \text{ datos}}{\text{Trimestre.Variable}} \times 7 \text{ variables}$$

N° total de datos trimestral para regresión múltiple = **168 datos**

Con estos datos se obtuvo el modelo matemático y su comportamiento dinámico en el tiempo de la temperatura interior (T_i) y humedad Relativa (HR_i) en el interior del domo durante las 24 horas (promedio trimestral)

El tercer registro de la muestra de datos para el diseño factorial compuesta 2^3 , donde se tiene 3 variable independientes (N° de PCM: N, Espesor del PER: E y ancho de la cámara de aire: C) y 2 variable dependientes (Temperatura: T_i y humedad Relativo: HR_i , en el interior del domo) teniendo una muestra representativa (mínima) determinado por:

N° total datos para diseño factorial compuesto = $2^3 + 2 \times 3 + 6 = 20$ datos * 5 variables

N° total datos para diseño factorial compuesto = **100 datos.**

Con estos datos se obtuvo el modelo matemático y sus valores óptimos de la temperatura (T_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo.

3.3.2. Resumen de registro de datos según variables experimentales

- a) El primer registro de datos de las variables para hallar el comportamiento dinámico de ocho parámetros de: Temperatura (192 datos), Humedad Relativa (192 datos) y Presión Atmf (24 datos) asciendo un total de 408 datos.
- b) El segundo registro de datos para hallar el diseño de regresión lineal múltiple para la muestra representativa de los datos de las variables es de (168 datos) para 7 variables (5 Variable independientes y 2 Variables dependientes)
- c) El tercer registro para el diseño factorial compuesto 2^3 , fue de 100 datos para 5 variables (3 Variables independientes y 2 Variables dependientes)

Tabla 19

Resumen de registro de datos según variables.

Muestras	Variables	Mediciones	Total
1er. Registro (432 datos)	Variable Dependiente		
	- Temperatura (Tc)	8	192
	- Humedad Relativa (HR)	8	192
	- Presión Atmosférica (P _{atm})	1	24
	Variables independientes		
- Tiempo (t)	1	24	
		Sub Total	432
2do. Registro (168 datos)	Variable Dependiente		
	- Temperatura interior (Ti)	24	
	- Humedad Relativa interior (HRi)	24	48
	Variables independientes		
	- Temperatura ambiente (Tex)	24	
	- Humedad Relativa ambiente (HRe)	24	
- Tiempo (t)	24		
- Temperatura del PCM (T _{PCM})	24		
- Presión Atmosférica (P _{atm})	24	120	
		Sub Total	168
3er. Registro (100 datos)	Variable Dependiente		
	- Temperatura (Ti)	20	
	- Humedad Relativa (HRi)	20	40
	Variables independientes		
	- Cantidad de PCM23 (N)	20	
- Espesor del aislamiento térmico (E)	20		
- Ancho de la cámara de aire (C)	20	60	
		Sub Total	100
		TOTAL	700 datos

3.4. Método de investigación

3.4.1. Diseño de investigación

La investigación que se utilizó es aplicada, descriptivo, explicativo, correlacional y de corte transversal. El diseño es de carácter experimental mediante el ensayo para el monitoreo de datos para la adquisición de información automática que se realizó en los meses de friaje (mayo, junio y julio).

Según las hipótesis planteadas se utilizó para el balance energético el método hipotético deductivo experimental (MHDE) comparativo, ensayándose para un espesor de 5 cm de aislamiento del PER con 50 PCM23 comparando con un espesor

de aislamiento de 10 cm de espesor del PER y 60 acumuladores PCM23. Para la segunda hipótesis planteada se utilizó el método MHDE, cuyos datos obtenidos permitieron determinar el comportamiento de los parámetros de confort (T_i , H_{ri}), según la variación de la temperatura ambiental, humedad relativa ambiental, presión atmosférica local, temperatura del acumulador solar PCM23 y el tiempo según las horas del día), para lo cual se utilizó el método de regresión lineal múltiple. Para la tercera hipótesis se utilizó el método MHD semi empírico que permitió determinar los parámetros de confort (T_i , H_{ri}) según la variación de los parámetros de diseño, cantidad de acumulador solar PCM23, espesor del aislamiento térmico PER y espesor de la cámara de aire utilizando diseño factorial compuesto 2^3 . En la hipótesis cuatro según el estudio económico realizado se utilizó el método hipotético deductivo observacional (MHDO), el cual permitió comparar el método tradicional mediante el uso de la energía eléctrica con la alternativa tecnológica implementada, lo que permitió validar la reducción de energía y su consecuente reducción económica y de impacto ambiental.

3.4.2. Procedimiento de investigación

El Procedimiento o lógica ejecucional del desarrollo del Proyecto siguiendo una secuencia lógica del procedimiento, comprenden los siguientes aspectos generales:

- Primero fue importante realizar la **medición** de la radiación solar *in situ*, además de los registros meteorológicos encontrados, que permita su aprovechamiento energético para el sistema de calefacción del domo experimental instalado en la ciudad de Urubamba – Cusco.
- El domo experimental a pilotear es de 50 m^2 en su base, diseñándose su estructura, aislamiento térmico y componentes como se muestra en los anexos (1) al (15) y las fotografías correspondientes de la instalación del domo y sus componentes.
- A este domo se le incorporó las placas acumuladoras de energía PCM23, ubicándolos en el área traslúcida, cargándose térmicamente durante el día mediante la radiación solar y descargándose durante la noche de los PCMs al aire que circula por la cámara y el interior del domo en forma natural por diferencia de densidad.

- Otras tecnologías adicionales fueron diseñadas e implementadas para su complementación del sistema de calefacción que permita mejorar su confort y bienestar térmico como son: el panel FV para iluminación y uso de artefactos electrodomésticos, el colector solar para tener agua caliente sanitaria (ACS) para uso de ducha y cocina, servicios de: agua y desagüe y comunicación para uso de internet a través de una antena parabólica. Estas tecnologías permitieron la mejora de la eficiencia energética y el estado de confort que se requiere sobre todo para la ciudad de Urubamba – Cusco con fines turísticos.
- Se realizó la instalación y montaje del domo experimental y sus componentes que previamente fueron diseñados: La estructura del domo, los componentes del aislamiento térmico de la cobertura del domo, los acumuladores de energía PCM23 y las otras tecnologías adicionales (Generador FV, Colector solar para ACS, servicios de Agua y desagüe y comunicación para uso de internet).
- Luego se procedió a calcular la demanda de calefacción y refrigeración requerida por el domo y según ello se estimó la carga térmica de calefacción para la noche, complementándose con el cálculo del Balance Térmico del domo para un estudio más detallado que permitió realizar las correcciones encontradas para mejorar su eficiencia energética, considerando un diseño adecuado del domo experimental (aislamiento térmico, aprovechamiento de la inercia térmica, el uso de PCMs y la incorporación de otras tecnologías) para mejorar su bienestar y estado de confort. Adicionalmente se realizaron cálculos adicionales como el cálculo del porcentaje de licuación y variantes en su diseño que permitió la mejora de su eficiencia energética.
- Seguidamente se procedió a realizar las pruebas como se indica en el protocolo de ensayo premonitoreo y monitoreo propiamente dicho para la adquisición de información según el programa experimental planteado.
- Del análisis de resultados obtenidos se validaron las hipótesis planteadas que permitieron obtener su modelamiento matemático y optimización correspondiente que nos permite describir su comportamiento dinámico del sistema de calefacción del domo experimental ubicado en la ciudad de Urubamba – Cusco con fines turísticos.

- Finalmente se realizó el estudio económico y de impacto ambiental que permitió evaluar su rentabilidad y reducción de los gases por efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes. Previamente se calculó el consumo energético con la nueva tecnología innovada en relación a la tecnología actual determinándose un ahorro energético que permitió la mejora de la eficiencia energética, repercutiendo directamente en el ahorro económico y la reducción de los gases de efecto invernadero (GEI). Así mismo, se realizó el cálculo de inversión unitaria de almacenar 1 Kcal con PCM determinándose su periodo de pago de amortización y su rentabilidad correspondiente.
- Es necesario indicar que según el estudio realizado para que el presente proyecto de investigación utilizando el “Prototipo: Domo Experimental” sea considerado como I+D+i (Investigación + Desarrollo + Innovación) debe adecuarse y complementarse con ciertas mejoras para su venta y ser considerado como un “Prototipo: Domo Comercial” con la cual pueda replicarse en otros lugares con carácter predictivo para calefacción por aire de climas fríos como es la zona alto andina del Altiplano.

3.4.3. Diseño experimental

3.4.3.1. Descripción del equipamiento

I. Prototipo domo experimental

a) Dimensiones del domo experimental

- Área base del domo: $A = 50 \text{ m}^2$
- Diámetro del domo: $D = 8 \text{ m}$
- Altura del domo: $H = R = 4 \text{ m}$
- Estructura metálica del domo: Tubo de acero de $\frac{1}{2}$ ” y $\frac{3}{4}$ ”
- Piso del domo: Parket
- Puertas: contra aplacadas de madera

b) Cobertura del domo

- 1) Película de aire externo: $h = 17 \frac{w}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$
- 2) Cobertura exterior de PVC: $e = 0.5 \text{ mm}$
- 3) Aislamiento térmico del PER: $e = 5 \text{ cm} / 10 \text{ cm}$

- 4) Cámara de aire: $e = 10 \text{ cm}$
- 5) Cobertura interior de PVC: $e = 0.5 \text{ mm}$
- 6) Película de aire interno: $h_i = 9.1 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}$

c) **Circuito térmico del domo**

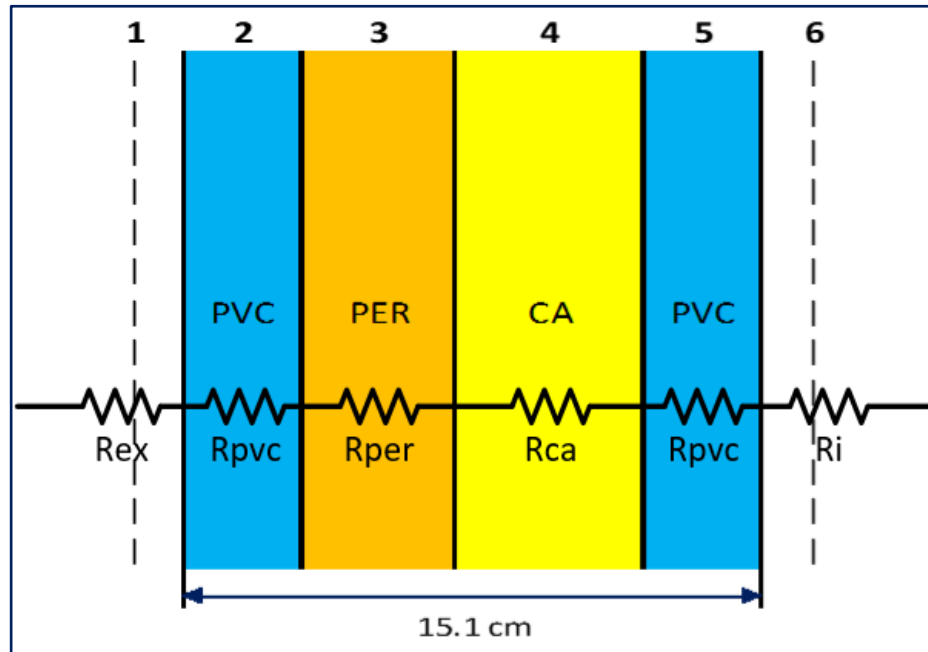
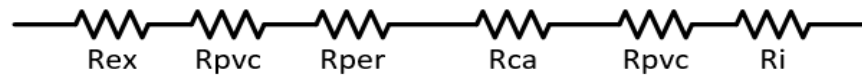


Figura 13. Circuito térmico del domo experimental.

Fuente: Sanguinetti (2017).

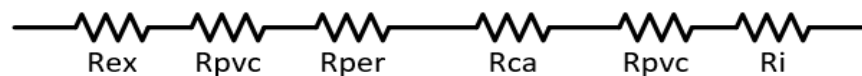
- 1) $R_{ex} = \frac{1}{h_{ex}} = \frac{1}{17} = 0.06 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$
- 2) $R_{PVC} = \frac{e}{k} = \frac{0.0005 \text{ mm}}{0.12 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 0.0042 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$
- 3) $R_{PER} = \frac{e}{k} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.035 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 1.4290 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$
- 3') $R_{PER} = \frac{e}{k} = \frac{0.1 \text{ m}}{0.035 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 2.8571 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$
- 4) $R_{CA} = \frac{1}{h_{ca}} = \frac{1}{12.6 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 0.0794 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$
- 5) $R_{PVC} = \frac{e}{k} = \frac{0.0005 \text{ mm}}{0.12 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 0.0042 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$
- 6) $R_{CA} = \frac{1}{h_i} = \frac{1}{9.1 \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C}} = 0.11 \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w}$

- d) **Resistencia total cuando el espesor del polietileno reticulado es de 5 cm**



$$R_{Total} = 1.6851 \frac{m^2 * ^\circ C}{w}$$

- e) **Resistencia total cuando el espesor del polietileno reticulado es de 10 cm**



$$R_{Total} = 3.1136 \frac{m^2 * ^\circ C}{w}$$

- f) **Coefficiente térmico global**

Cuando el espesor del PER es de 5 cm.

$$U_G = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{1.6851} = 0.5935 \frac{w}{m^2 * ^\circ C}$$

- g) **Coefficiente térmico global**

Cuando el espesor de PER es de 10 cm.

$$U_G = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{3.1136} = 0.3212 \frac{w}{m^2 * ^\circ C}$$

II. Generador Fotovoltaico

- a) **Panel Solar Monocristalino**

Clase A 85W/12V

Dimensiones	1190 mm x 550 mm x 30 mm
Peso	8 kg
Tolerancia	+/- 3%

Características

Potencia máxima	85 W +/- 3%
Voltaje en circuito abierto (VDC)	22.4 V
Corriente en corto circuito (ISC)	5.13 A
Potencia máxima de voltaje (Vmp)	17.8 V
Potencia máxima de corriente (Imp)	4.78 A

Límites

Temperatura de operación	-40 °C a +85 °C
Temperatura de almacenamiento	-40 °C a +85 °C
Voltaje máximo del sistema	1000 VDC

Coefficiente de temperatura de celdas

Temperatura normal de operación	45 °C +/- 2°C
Celda nocturna	
Coefficiente de temperatura (VOC)	-0.4049 % /°C
Coefficiente de temperatura (ISC)	0.0825 % /°C
Coefficiente de temperatura (Pmpp)	-0.4336 % /°C

b) REGULADOR

Tipo	C x 40 – 1.2
Marca	ROHS CC /Phocos
Max carga / corriente de carga	40 A
Voltaje	12/24 V
Corriente	40 A

c) Batería del sistema fotovoltaico

Tipo	KBL 121000
Marca	Kaise
Voltaje nominal	12 V
Capacidad nominal	100 Ah (10 hr) / 65 Ah
Dimensiones	22.5(L) x 13 (A) x 20.5 (h) cm

d) Inversor

Modelo	Phoenix (12V -1200VA)
--------	-----------------------

Marca	Victrom Energy / Blue Power
Voltaje entrada	12/24 V DC (continua)
Voltaje salida	110/220 V AC
Phoenix inverter	24 V, 350V-A

III. Acumulador solar térmico

Placas de PCM

Tipo	PCM23 (Material de cambio de fase a 23°C)
Dimensiones	48x28x3.5 cm
Peso Neto	3 kg / PCM
Calor latente	43 Kcal/Kg 180 KJ/Kg
Calor específico (solido)	2.1 KJ/Kg°C
Calor específico (liquido)	2.5 KJ/Kg°C
Temperatura de Fusión	23°C
Área	0.32352 m ²

IV. Aislante térmico de Polietileno Reticulado PER

PER

Espesor (E)	5/10 cm
Coefficiente conductivo (k)	0.035 W/m ² °C
Rango de densidad	15-30 kg / m ³

V. Cámara de aire

Ancho (C)	10 cm
Resistencia de aire estatico (Rc)	0.16 m ² °C/W

Resistencia de aire ligeramente ventilado (Rc/2)	0.08 m ² °C/W
Coefficiente Convectivo (h _{ca})	12.6 W/m ² °C

VI. Aparatos

TV

Modelo	DC – 625 – 1226
Entrada	100 – 240 V (alterna)
Frecuencia	50 / 60 Hz 1.2 A max
Salida	12 V --- 2.6 A
Potencia	31.2 W

LAPTOP

Marca	Toshiba
Entrada	100 – 240 V (alterna)
Frecuencia	50 / 60 Hz 1.5 A max
Salida	19 V --- 4.47 A
Potencia	90.06 W

3.4.3.2. Descripción de la estructura del domo

Se diseñó la estructura del domo para 4 metros de radio con un área base de 50 metros cuadrados cuya estructura geodésica está conformado por tubos cubiertas por el aislante térmico cuyo diseño de la estructura en detalle se especifica en los quince planos desarrollados (ver anexos 02 al 16).

3.4.3.3. Diseño del ducto y propiedades según recorrido del flujo en la cámara de aire

A continuación, se detalla el dimensionamiento según recorrido del flujo de aire al interior del domo. El aire al ser calentado por los acumuladores PCM23, su densidad disminuye (debido al aumento de la temperatura) y el aire sube e ingresa al domo, en el cual su temperatura disminuye y como consecuencia su

densidad vuelve a aumentar hasta llegar en el interior a la base, por donde vuelve a ingresar aire frío para nuevamente ser calentado por los acumuladores que se encuentran a los 2/3 de la altura, volviéndose a repetir este proceso.

1. Cálculo del volumen neto del domo (V_N)

2.

2.1. Volumen de la esfera (V_E)

$$V_E = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi (4)^3 = \underline{268.083 \text{ m}^3}$$

2.2. Volumen del domo (V_D)

$$V_D = \frac{V_E}{2} = \underline{134.0416 \text{ m}^3}$$

2.3. Volumen neto (V_N)

$$V_N \cong 0.9 V_D = 0.9 \times 134.046 \text{ m}^3 = \underline{120.6 \text{ m}^3}$$

Redondeando, el volumen neto, se puede aproximar a:

$$V_N = 120 \text{ m}^3$$

3. Renovación del aire fresco (N_{renov})

Se estima renovaciones de aire fresco por hora mínimo entre 6 y 8 como norma general para que un ambiente sea lo más confortable posible. Estos valores sugeridos de la experiencia no es una norma, por lo que para las condiciones de lugar puede considerarse algo menor para el caso particular se consideró para el día 5 renov/hr y para la noche debido al frío 1 renov/hr. Pero para las condiciones del diseño se considera el mayor, el mismo que puede ser estimado como promedio del día igual a:

$$N_{\text{renov}} = \frac{V_N}{t} = \frac{120 \text{ m}^3}{24 \text{ hr}} = \underline{5 \text{ renov/hr}}$$

4. Cálculo del caudal de aire (Q)

$$Q = N_{\text{renov}} \times V_N = 5 \text{ renov/hr} \times 120 \text{ m}^3 = 600 \text{ m}^3/\text{hr}$$

$$Q = 0.1667 \text{ m}^3/\text{hr}$$

5. Cálculo del área de ingreso en la base interior del domo (A_1)

Se tiene una apertura libre de 2 cm en el contorno de la base interior del domo donde ingresa el aire al ducto de la cámara en la base, cuya área está determinada por:

$$A_1 = A_{\text{Base,Interior}} = 2\pi R \times h = 2\pi(4\text{m})(0.02\text{m})$$

$$A_1 = 0.5 \text{ m}^2$$

6. Cálculo de la velocidad de ingreso del aire (v_1)

$$v_1 = \frac{Q}{A_1} = \frac{0.1667 \text{ m}^3/\text{hr}}{0.5 \text{ m}^2} = 0.33 \text{ m/s}$$

$$v_1 = 0.33 \text{ m/s}$$

7. Cálculo del área superior (A_2)

$$A_2 = \frac{Q}{v_2}$$

Donde:

$Q = 0.1667 \text{ m}^3/\text{seg}$(Caudal de aire)

$v_2 = 2v_1 = 2(0.33 \text{ m/s}) = 0.6 \text{ m/s}$ (velocidad estimada, es el doble de la velocidad de ingreso)

Reemplazando valores, se tiene:

$$A_2 = \frac{0.1667 \text{ m}^3/\text{s}}{0.66 \text{ m/s}} = 0.252 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 0.25 \text{ m}^2$$

8. Cálculo del diámetro superior de ingreso del aire de recirculación al domo (D_2)

Como $A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4}$

\Rightarrow

$$D_2 = \sqrt{\frac{4A_2}{\pi}}$$

$$D_2 = \sqrt{\frac{4(0.25 \text{ m}^2)}{\pi}} = 0.5642 \text{ m}$$

$$D_2 \cong 0.6 \text{ m} \cong 60 \text{ cm}$$

9. Cálculo de la densidad y velocidad del aire en los diferentes puntos de su recorrido del flujo másico del aire

Para calcular la densidad y velocidad del aire se indican los diferentes puntos de su recorrido del flujo másico de aire, según el área que atraviesa, recorriendo desde su ingreso del contorno de la base interior del domo a la cámara (1), seguido en la base interior de la cámara (2), luego en la base media del domo (3), seguido a la altura del acumulador PCM23 que está a 2/3 de la altura del domo (4), al ingreso por el área superior del zenit (5), en el punto medio del interior del domo (6) y finalmente en el punto medio de la base interior (peso) del domo (7), para luego ingresar nuevamente por la base del domo al punto (1), repitiéndose sucesivamente este recorrido. A continuación, se detalla en el diagrama los puntos de su recorrido, en los cuales fueron calculados para el caso más crítico durante la noche como promedio para los meses de friaje (mayo, junio y julio).

9.1. Cálculo de la densidad (ρ_1) y velocidad del aire (v_1) de ingreso del domo a la cámara de aire: punto (1)

La densidad del aire (ρ) depende principalmente de la temperatura, ya que la presión (P_{atm}) es aproximadamente constante, así como la constante particular del aire (R); cuya fórmula matemática está dado por la ecuación:

$$\rho_1 = \frac{P_1}{RT_1} \quad [\text{Kg/m}^3]$$

Donde:

$$P_1 = 72,000 \text{ Pa} = 0.72 \text{ bar} \quad (\text{Presión aproximadamente constante})$$

$$R = 287.1 \text{ J/Kg} \cdot \text{K} \dots\dots\dots (\text{Constante particular del aire})$$

$$T_1 = 7.5^\circ\text{C} = 280.5^\circ\text{K} \dots\dots (\text{Temperatura de ingreso del aire interior en la base del domo})$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$\rho_1 = \frac{72,000}{287.2 \times 280.5} = \underline{0.8944 \text{ Kg/m}^3}$$

La velocidad del aire (v_1), se calcula con la fórmula de la ecuación de continuidad:

$$v_1 = \frac{\dot{m}}{\rho_1 A_1}$$

Donde:

$\dot{m} = 0.149 \text{ Kg/s}$ (Flujo de masa permanece aproximadamente constante)

$A_1 = 0.5 \text{ m}^2$ (área de ingreso para una abertura de 20 cm del contorno interior del domo a la cámara de aire)

$\rho_1 = 0.8944 \text{ Kg/m}^3$ (densidad del aire al ingreso a la cámara de aire)

Reemplazando valores se tiene:

$$v_1 = \frac{0.149 \text{ Kg/s}}{0.8944 \text{ Kg/s} \times 0.5 \text{ m}^2} = \underline{0.33 \text{ m/s}}$$

9.2. Cálculo de la densidad (ρ) y velocidad (v_2) en base interior de la cámara de aire: punto (2)

$$\rho_2 = \frac{P_2}{RT_2} = \frac{72,000}{287.1 \times 280.5} = \underline{0.8941 \text{ Kg/s}}$$

Siendo:

$$T_2 = 7.5^\circ\text{C} = 280.5^\circ\text{K}$$

$$v_2 = \frac{\dot{m}}{\rho_2 A_2} = \frac{0.149}{0.8941 \times 3.841} = \underline{0.0434 \text{ m/s}}$$

Siendo:

$$A_2 = \pi(r_2^2 - r_1^2) = \pi(4.15^2 - 4^2) = 3.841 \text{ m}^2$$

9.3. Cálculo de la densidad (ρ_3) y velocidad del aire (v_3) a la mitad del domo en la cámara de aire: punto (3)

$$\rho_3 = \frac{P_3}{RT_3} = \frac{72,000}{287.1 \times 286} = \underline{0.877 \text{ Kg/s}}$$

Siendo:

$$T_3 = 13^\circ\text{C} = 286^\circ\text{K}$$

$$v_3 = \frac{\dot{m}}{\rho_3 A_3} = \frac{0.149}{0.877 \times 3.3355232} = \underline{0.051 \text{ m/s}}$$

Siendo:

$$A_3 = \pi(R^2 - r^2) = \pi(3.6141^2 - 3.4641^2) = 3.3355232 \text{ m}^2$$

$$r = \sqrt{4^2 - 2^2} = 2\sqrt{3} = 3.4641 \text{ m}$$

$$R = r + 0.15 = 3.6141 \text{ m}$$

9.4. Cálculo de la densidad (ρ_4) y velocidad del aire (v_4) a la altura del domo: punto (4)

El acumulador está ubicado a 2/3 de su altura que es $y = \frac{2}{3}(4) = \frac{8}{3} = 2.6$

$$\rho_4 = \frac{P_4}{RT_4} = \frac{72,000}{287.1 \times 286.5} = \underline{0.8753 \text{ Kg/s}}$$

Donde:

$$A_4 = \pi[R^2 - r^2] = \pi[(3.128)^2 - (2.978)^2] = 2.8774 \text{ m}^2$$

$$r = \sqrt{(4)^2 - (2.67)^2} = 2.978 \text{ m}$$

$$R = r + 0.15 = 3.128 \text{ m}$$

9.5. Cálculo de la densidad (ρ_5) y velocidad (v_5) del aire de ingreso de la cámara de aire al domo: punto (5)

El ingreso del aire al domo es por la parte superior por una abertura circular de 60 cm de diámetro (D_2).

$$\rho_5 = \frac{P}{RT_5} = \frac{72,000}{287.1 \times 283.5} = \underline{0.8846 \text{ Kg/s}}$$

Siendo:

$$T_5 = 10.5^\circ\text{C} = 283.5^\circ\text{K}$$

$$v_5 = \frac{\dot{m}}{\rho_5 A_5} = \frac{0.149}{0.8846 \times 0.28} = \underline{0.6 \text{ m/s}}$$

Siendo:

$$A_5 = \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi(0.6)^2}{4} = 0.28 \text{ m}^2$$

9.6. Cálculo de la densidad (ρ_6) y velocidad (v_6) del aire de punto medio del interior del domo: punto (6)

$$\rho_6 = \frac{P}{RT_6} = \frac{72,000}{287.1 \times 283.3} = \underline{0.8852 \text{ Kg/s}}$$

Siendo:

$$T_5 = 10.3^\circ\text{C} = 283.3^\circ\text{K}$$

$$v_6 = \frac{\dot{m}}{\rho_6 A_6} = \frac{0.149}{0.8852 \times 37.6992} = \underline{0.0045 \text{ m/s}}$$

Siendo:

$$A_6 = \pi r^2 = \pi(2\sqrt{3})^2 = \pi(12) = 37.6992 \text{ m}^2$$

9.7. Cálculo de la densidad (ρ_3) y velocidad (v_7) en la base del piso medio interior del domo: punto (7)

$$\rho_7 = \frac{P_5}{RT_7} = \frac{72,000}{287.1 \times 282} = \underline{0.8893 \text{ Kg/s}}$$

Siendo:

$$T_5 = 9^\circ\text{C} = 282^\circ\text{K}$$

$$v_7 = \frac{\dot{m}}{\rho_7 A_7} = \frac{0.149}{0.8893 \times 50} = \underline{0.00335 \text{ m/s}}$$

Tabla 20

Resumen de Resultados de los parámetros del flujo de aire en su recorrido por la cámara de aire y el interior del domo.

Parámetros	Ingreso en la base (1)	Base de ca (2)	Mitad del domo en la ca (3)	Altura del acumulado r (4)	Ingreso superior (5)	En el medio interior del domo (6)	En la base inferior (piso) del domo (7)
Temperatura	7.5	7.5	13	13.5	10.5	10.3	9

(T) °C							
Densidad	0.894	0.894			0.884	0.885	
(ρ): Kg/m ³	4	1	0.847	0.8753	6	2	0.8893
Área (A): m ²	0.5	3.841	3.335	2.8774	0.28	37.7	50
Velocidad (v): m/seg	0.33	0.043	0.051	0.0592	0.6	0.004	0.0033
		4				5	5

Elaboración propia.

3.4.3.4. Diseño del generador fotovoltaico

1. Cálculo del valor mínimo mensual de irradiación diaria solar sobre un plano horizontal ($G_{dm(0)}$)

Los datos de irradiación solar registrados en la ciudad de Urubamba Cusco donde se encuentra instalado el domo experimental tienen una latitud -13.206° y longitud, tiene un valor mínimo de la irradiación global diaria sobre la superficie horizontal que se considera para el diseño es de:

$$G_{dm(0)} = 5.22 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

2. Cálculo de la inclinación óptima del módulo FV

El ángulo de inclinación óptima resultante para maximizar la captación de energía solar está dado por la ecuación:

$$\beta_{\text{opt}} = 3.7 + 0.69|\phi|$$

Donde:

$\phi = -13.305764$ (Latitud de la ciudad de Urubamba, ubicación del domo)

Reemplazando valores, se tiene:

$$\beta_{\text{opt}} = 3.7 + 0.69|-13.305764| = 12.881^\circ$$

En la práctica también se usa fórmulas basadas en la experiencia según la latitud del lugar que proporcionen la inclinación óptima en función del periodo

de tiempo y el uso que se le dé al generador FV. En la tabla se muestra la inclinación según la latitud.

Tabla 21

Ángulo de inclinación según latitud

Latitud del lugar	Ángulo de inclinación en invierno	Ángulo de inclinación en verano
(0 a 15)°	15°	15°
(15 a 25)°	Latitud	Latitud
(25 a 30)°	Latitud +5°	Latitud -5°
(30 a 35)°	Latitud +10°	Latitud -10°
(35 a 40)°	Latitud +15°	Latitud -15°
>40°	Latitud +20°	Latitud -20°

Se recomienda en la práctica así mismo que la inclinación del módulo FV no debe ser menor de 15°, para permitir que la suciedad acumulada sobre la superficie sea retirada por el agua de lluvia.

Por lo tanto, para el tipo de instalación autónoma se selecciona que el Ángulo es de:

$$\beta = 15^\circ$$

3. Cálculo del valor diario medio de la radiación solar inicial sobre una superficie inclinada ($G_d(0, \beta_{max})$)

El valor medio de la irradiación global anual que recibe la superficie inclinada con el Ángulo óptimo y Azimut cero, está dado por la ecuación.

$$G_{da}(0, \beta_{opt}) = \frac{G_{da(0)}}{1 - 4.46 \times 10^{-4} \beta_{opt} - 1.19 \times 10^{-4} \beta_{opt}^2}$$

Donde:

$$G_{dm(0)} = 5.22 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2 \cdot \text{día}} \cdot (\text{Valor medio diario de la irradiación solar en la ciudad de$$

Urubamba sobre un plano horizontal).

$$\beta_{opt} = 12.88^\circ \dots\dots\dots (\text{Ángulo de inclinación óptima})$$

Reemplazando valores se tiene:

$$G_{da}(0, \beta_{opt}) = \frac{5.22}{1 - 4.46 \times 10^{-4} \times 12.88 - 1.19 \times 10^{-4} (12.88)^2}$$

$$G_{da}(0, \beta_{opt}) = 5.3565157$$

Por lo tanto:

El valor diario medio de la irradiación global anual sobre una superficie inclinada con el Ángulo óptimo y Azimut cero, resulta:

$$G_{da}(0, \beta_{opt}) \cong 5.356 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

4. Cálculo de las horas solar pico diario (HSP)

El valor de las HSP diario sobre una superficie inclinada durante el día puede variar entre 3 a 7 horas, obteniéndose con la siguiente ecuación:

$$HSP = \frac{G_{da}(0, \beta_{opt})}{I}$$

Siendo:

$$G_{da}(0, \beta_{opt}) \cong 5.356 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

$$I = 1000 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} = 1 \frac{\text{KW}}{\text{m}^2}$$

$$HSP = \frac{5.356}{1} = 5.356 \text{ Hr} \cong 5.4 \text{ Hr.}$$

5. Pérdidas de radiación solar

Para conseguir la máxima captación de energía solar, los módulos fotovoltaicos se deben orientar, en el hemisferio sur hacia el norte cero ($\alpha = 0$), con un Ángulo de inclinación óptimo (β_{opt}). No obstante, esto no siempre es posible, ya que pueden influir otros factores como imperativos físicos, sombras, resistencias al viento, etc. Para considerar estas pérdidas con respecto a la posición óptima, se considera la constante para periodo de diseño (K), el factor de irradiación (FI) y el factor de sombra (FS); los mismos que a continuación se detallan.

5.1. Cálculo de la constante para periodo de diseño (K)

La constante para el periodo de diseño (K), indica la relación entre el valor medio de la irradiación global anual sobre una superficie inclinada $G_{da}(0, \beta_{opt})$ y la irradiación diaria sobre el plano horizontal $G_d(0)$. Está dado por la expresión:

$$K = \frac{G_{da}(0, \beta_{opt})}{G_d(0)}$$

Donde:

$$G_{da}(0, \beta_{opt}) = 5.356 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}} \quad (\text{Valor medio diario de la radiación solar sobre un plano inclinado})$$

$$G_{d(0)} = 5.22 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}} \quad (\text{Valor medio diario de la radiación solar sobre un plano horizontal})$$

Reemplazando los valores se tiene:

$$K = \frac{5.356}{5.22} = 1.0260536$$
$$\boxed{K \cong 1.03}$$

Esta constante corrige la inclinación del módulo horizontal respecto a la inclinación óptima (la radiación que recibe en un plano inclinado es algo mayor que un plano horizontal)

5.2. Cálculo del factor de irradiación (FI)

Cuando no es posible orientar e inclinar un generador FV o colector solar en forma óptima se aplica un coeficiente de corrección denominado factor de irradiación (FI). Este factor se calcula según los ángulos de orientación (α) e inclinación (β) que se elige y está dado por las siguientes fórmulas matemáticas.

$$FI = 1 - \left[1.2 \times 10^{-4} * (\beta - \beta_{opt})^2 + 3.5 \times 10^{-5} * \alpha^2 \right]; \quad 15^\circ < \beta \leq 90^\circ$$

$$FI = 1 - \left[1.2 \times 10^{-4} * (\beta - \beta_{opt})^2 \right]; \text{ para: } \beta \leq 15^\circ$$

Para los paneles fotovoltaicos FV

$\beta = 15^\circ$ (Inclinación real se la superficie)

$\beta_{opt} = 12.88^\circ$ (Inclinación óptima de la superficie)

$\alpha = 180^\circ$ (Azimut 180° u orientación de la superficie)

Reemplazando valores para el Ángulo de inclinación menor o igual a 15° se tiene:

$$FI = 1 - \left[1.2 \times 10^{-4} * (15 - 12.88)^2 \right]; \beta \leq 15^\circ$$

$$FI = 0.99946067$$

$$FI \cong 0.9995$$

Este factor corrige la inclinación real (β), respecto a la inclinación óptima β_{opt} . En este caso para $\beta = 15^\circ$, no depende de la orientación real $\alpha = 180^\circ$.

5.3. Cálculo del factor de sombra (FS)

Se considera debido al campo libre que eta ubicado el domo.

$$F_s = 1 \quad (\text{asumido})$$

5.4. Cálculo del valor medio mensual de irradiación global diario sobre la superficie del generador FV

Esta dado por la ecuación:

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = G_{dm(0)} \times K \times FI \times FS$$

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = 5.22 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}} \times 1.03 \times 0.995 \times 1$$

$$G_{dm}(\alpha, \beta) = 5.374 \frac{\text{KWH}}{\text{m}^2\text{-día}}$$

3.4.3.5. Cálculo de la potencia mínima del generador FV

El valor mínimo de la potencia del generador FV P_{Gmin} se calcula con la siguiente expresión matemática.

$$P_{Gmin} = \frac{W_d \times G_{CEM}}{G_{dm}(\alpha, \beta) \times P_R}$$

Donde:

P_{Gmin} : Potencia mínima del generador FV (W)

$G_{CEM} = 1000 \frac{W}{m^2}$ (Irradiación según condición estándar)

$G_{dm}(\alpha, \beta) = 5.374 \frac{KWH}{m^2 \cdot día}$ (Valor medio mensual de irradiación diaria)

$W_d = 1458.8 \frac{WH}{día}$ (Consumo de energía diaria)

$P_R = 0.6$ (60%) (Rendimiento energético para sistemas con inversor, batería y regulador de carga)

Reemplazando los valores se tiene:

$$P_{Gmin} = \frac{1458.8 \times 1000}{5374 \times 0.6} = 452.4253 W$$

$P_{Gmin} = 453 W$

3.4.3.6. Selección del módulo fotovoltaico

Con el fin de no sobredimensionar el generador se verificará que con la potencia máxima del módulo elegido no sobrepase el 20% del valor P_{Gmin} . Es decir, la potencia nominal del generador FV, debe cumplir;

$$P_{Gmin} \leq P_G \leq 1.2 P_{Gmin} = 1.2 \times 453$$

$453 W \leq P_G \leq 544 W$

La selección del módulo FV adecuado implica elegir módulos con la tensión nominal adecuada para un sistema aislado con acumulación y una potencia que

conectando un número adecuado de módulos proporciona como mínimo la potencia mínima calculada (P_{Gmed})

Como la tensión del sistema de acumulación se ha fijado en 24 V, se elige 2 módulos FV en serie de 12 V.

Se recopiló información de las características técnicas de los módulos FV de diferentes fabricantes y que son económicas y eficientes. Se seleccionó módulo FV marca “LIDERS” Monocristalino de 12 V de tensión nominal cuyas características de los parámetros eléctricos del módulo FV son:

$P_{max} = 85 \text{ W} \pm 3\%$	Potencia eléctrica máxima o potencia pico.
$V_{oc} = 22.4 \text{ V}$	Tensión de corto circuito abierto de salida del módulo FV.
$I_{SC} = 5.13 \text{ A}$	Corriente de corto circuito de salida del módulo FV.
$V_{mp} = 17.8 \text{ V}$	Tensión de máxima potencia o tensión pico.
$I_{mp} = 4.78 \text{ A}$	Corriente de máxima potencia o corriente pico
$T_{oper} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$ a $85 \text{ }^\circ\text{C}$	Temperatura de operación
$\alpha = 0.0825 \text{ } \%/^\circ\text{C}$	Coefficiente corriente temperatura
$\beta = 0.404 \text{ } \%/^\circ\text{C}$	Coefficiente tensión temperatura

3.4.3.7. Cálculo del número de módulos de los paneles FV

Para determinar el número de módulos de los paneles FV a conectar para satisfacer la potencia mínima prevista, se utiliza la siguiente fórmula matemática:

$$N_T = N_P \times N_S \geq \frac{P_{Gmin}}{P_{max}}$$

Donde:

$P_{Gmin} = 453 \text{ W}$ Potencia mínima requerida por el generador FV

$P_{max} = 85 \text{ W}$ Potencia máxima del módulo FV

Remplazando los valores, se tiene.

$$N_T = N_p \times N_s \geq \frac{453}{85} = 5.33 \cong 6$$

$$N_T = N_p \times N_s = 6$$

Por lo tanto:

Como la tensión nominal del módulo FV es de 12 V y la tensión de sistema de acumulación 24 V, entonces se elegiría dos (2) módulos FV en serie de 12 V y resultando tres (3) ramas en paralelo con dos (2) módulos en serie por cada rama, haciendo un total de seis (6) módulos FV. Es decir:

NP = 3 Tres (3) ramas en paralelo

NS = 2 Dos (2) módulos en serie por cada rama

Resultando:

$$N_T = N_p \times N_s = 6$$

3.4.3.8. Dimensionamiento del subsistema de generación FV

Similarmente a lo diseñado por el generador FV, se tiene el dimensionamiento completo de todo el sistema de generación FV para satisfacer la demanda energética del domo tanto en corriente continua de (182 WH/día) y en corriente alterna de (1276 WH/día). En la secuencia simplificada adjunto se dimensiona el generador FV, el banco de batería, el inversor y el regulador de carga. Las mismas que se detallan a continuación.

Tabla 22

Consumo de carga DC

Equipo DC	A1 Número	A2 Carga (W)	A3 (Hrs uso/día)	A4 (WH/día) A1xA2xA3
Foco ahorrador	2	7	7	42
Foco ahorrador	2	7	10	140
Total	POTENCIA = 28 W		ENERGÍA = 182 WH/día	

A5: Carga de DC total diaria 182 WH/día

Tabla 23

Consumo de carga AC

Equipo AC	A6 Número	A7 Carga (W)	A8 (Hrs uso/día)	A9 Carga (WH/día)
Foco ahorrador (LED)	1	9.6	10	96
Televisor	1	31.2	4	124.8
Computador portátil	1	18	4	72
Router	1	16	24	384
Módem	1	25	24	600
Total		POTENCIA = 99.8 W		ENERGÍA = 1,276.8 WH/día

A.- CARGA AC

A11: Carga total AC diaria (sumar columna A9).	1276.8 WH/día
A12: Factor inverso (DC - AC).	1.2
A13: Carga diaria DC equivalente (All x A12).	1532.16 WH/día
A14: Carga máxima continua AC (sumar columna A7).	99.8 W
A15: Carga máxima Surge AC (sumar columna: A10 + A14).	99.8 W

B.- CORRIENTE PICO DEL GENERADOR FV

B1: Carga DC diaria (A5).	182 WH/día
B2: Carga DC (de cargas AC) diaria (A13).	1532.16 WH/día
B3: Carga DC total diaria (B1 + B2).	1714.16 WH/día
B4: Tensión DC del sistema.	24 V
B5: Carga diaria corriente DC(B3/B4).	71.423 AH/día
B6: Factor de seguridad (Baterías, perd. Sist, etc.).	1.1
B7: Carga de corriente DC diaria corregida (B5 x B6).	78.56 AH/día
B8: Radiación solar (HSP).	5.2 horas
B9: Corriente pico del SFV (B7/B8).	15.11 A/día

C.- DIMENSIONAMIENTO DEL GENERADOR FV

C1: Corriente pico dei SFV (B9).	15.11 A/día
----------------------------------	-------------

C2: Corriente pico del módulo seleccionado. (catálogo)	4.78 A
C3: Arreglo del módulo en paralelo (C1/C2).	3.16
C4: Arreglo del módulo en paralelo (Redondeo).	3
C5: Tensión DC nominal del sistema (B4).	24 V
C6: Tensión DC nominal del módulo (catalogo).	12 V
C7: Numero de módulos serie (C5/C6).	2
C8: Número total de módulos (C4 x C7).	6 módulos FV

Se selecciona: 6 módulos FV (3 en paralelo con 2 módulos en serie por c/u) de 12V/85W

D. DIMENSIÓN DEL BANCO DE BATERIAS

DI: Carga DC total diario (B7).	78.56 AH/día
D2: Días de reserva (emplear 2 a 5 días).	2 días
D3: Capacidad nominal banco de baterías (D1 x D2).	157.12 AH
D4: Profundidad de descarga.	0.6
D5: Capacidad corregida del banco de baterías (D3/D4).	261.86 AH
D6: Capacidad nominal de la batería	65 AH
(Viene de información del catálogo: emplear capacidad C24)	
D7: Arreglo de baterías en paralelo (D5/D6).	4.028
D8: Arreglo de baterías en paralelo (Redondear D7).	4.0
D9: Tensión DC Nominal del sistema (B4).	24 V
D10: Tensión DC Nominal de batería.	12V
(Viene de información del catálogo).	
D11: Número de baterías serie (D9/D10).	2
D12: Número total de baterías (D8 x D11).	8 baterías

E.- DIMENSIONAMIENTO DEL INVERSOR

E1: Carga máxima continua AC (A14).	99.8 W
E2: Carga Máxima Surge AC (A15).	99.8 W
E3: Tensión de entrada del inversor en CC (coincide con la tensión de acumulación del sistema FV)	24 V
E4: Tensión de salida del inversor en ca	220 V
E5: Potencia del inversor	1000 W

(viene de información de catálogo)

E6: Capacidad máxima continuo AC del inversor. 2,400 W

(Viene de información de catálogo debe ser mayor a E1).

E7: Capacidad Máxima Surge AC del inversor. 2,400 W

(Viene información de catálogo debe ser mayor a E2).

**Se selecciona: un inversor de 24 V CC – 220 V CA / 1200 VA (1000 w) – Pot.
máx=2400W**

E.- DIMENSIONAMIENTO DEL REGULADOR

F1: Número de paneles en paralelo (C8). 6

F2: Corriente de corto circuito del módulo FV. 5.13 A

(Viene información del catálogo).

F3: Factor de seguridad para daños. 1.25

F4: Corriente de entrada al regulador ($F1 \times F2 \times F3$). 38.475 A

(corriente de cortocircuito del controlador: I_{CE})

F5: Potencia de carga en alterna (A14). 99.8 W

F6: Eficiencia del inversor. 0.88

F7: Tensión nominal del regulador 24 V

F8: Corriente de salida del regulador a la carga. ($F3 \times F5 / F6 \times F7$) 5.91 A

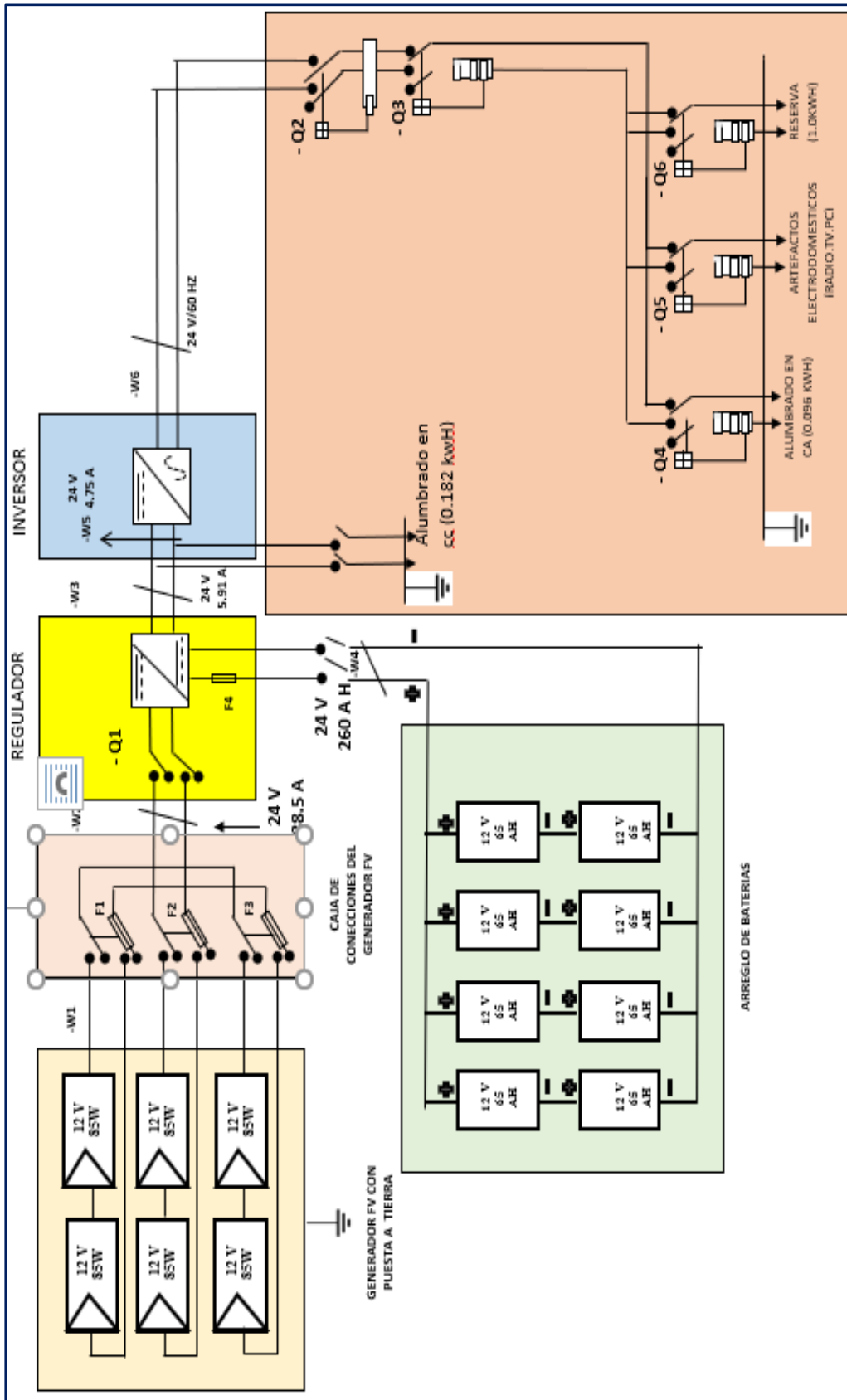


Figura 14. Esquema de proceso de generación fotovoltaica

3.4.3.9. Diseño de la carga térmica del acumulador solar PCM23

1. Cálculo geométrico del domo experimental

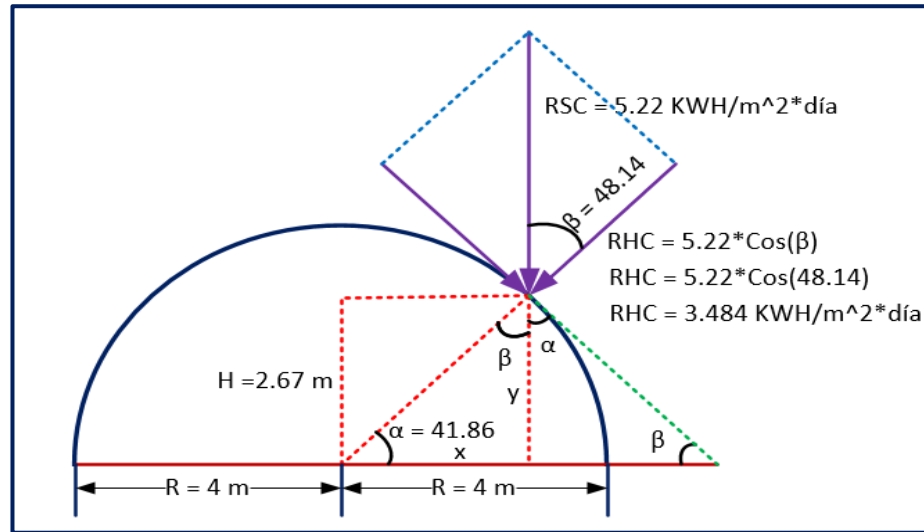


Figura 15. Diseño del acumulador solar

Cálculo de y:

- Altura media donde se ubica el domo.

$$y = \frac{2}{3}R = \frac{2}{3} * 4 = 2.67 \text{ m}$$

Cálculo de x:

- La ecuación de la circunferencia concenro en el origen y radio cuatro (4) metros.

$$x^2 + y^2 = 4^2$$

$$x^2 + (2.67)^2 = 16$$

$$x = 2.98 \text{ m}$$

- $\tan \alpha = \frac{y}{x} = \frac{2.67}{2.97} = 0.896$

$$\alpha = 41.86^\circ$$

- Cálculo del ángulo de inclinación β .

Como:

$$\alpha + \beta = 90^\circ \rightarrow \beta = 90^\circ - 41.86 = 48.14^\circ$$

$$\beta = 48.14^\circ$$

2. Cálculo de la energía entregada por la radiación solar para la carga del acumulador PCM23

Sabemos que la radiación para Urubamba Cusco sobre un plano horizontal es de:

$$RSC = 5.22 \frac{KWH}{m^2 - día}$$

3. La radiación solar perpendicular

La radiación perpendicular es el área translúcida está dado por:

$$RHC = RSC * \cos(\beta)$$

$$RHC = 5.22 * \cos(48.14) = 5.22 * 0.667313$$

$$RHC = 3.4834 \frac{KWH}{m^2 - día}$$

4. La radiación solar que entra al domo

La radiación solar que ingresa al domo es solo el 40 a 60% de este valor (RHC) que se aprovecha. Considerando el 40%, que se aprovecha se tiene:

$$Rad, Ingresa al domo = 0.4 * RHC = 0.4 * 3.4834$$

$$Rad, Ingresa al domo = 1.3936 \frac{KWH}{m^2 - día}$$

5. La energía que ingresa al domo para cargar al acumulador PCM23

La energía que entrega por toda el área translúcida (AT) es de 10 m² está dado por:

$$E_{Entregado, Cargar} = Rad, Ingresa al domo * A_T$$

$$E_{Entregado, Cargar} = 1.3936 * 10 \frac{KWH}{día}$$

$$E_{Entregado, Cargar} = 13.936 \frac{KWH}{día}$$

$$E_{Entregado,Cargar} = 13.64 \frac{KWH}{día}$$

Por lo tanto:

Esta energía ingresa al domo y está disponible para cargar el acumulador PCM23.

6. La energía requerida para que se cargue las 60 placas del acumulador PCM23

La carga térmica de las 60 placas (CT 60 Placas) disponible para la noche está dado por la ecuación:

$$CT\ 60\ Placas = N^{\circ}PCM * CT * PN * \%L$$

$N^{\circ}PCM = 60$	....	(Número de placas del acumulador PCM23 en el domo de 50 m ²)
$CT = 43\ Kcal/Kgr$	....	(Carga térmica del acumulador PCM23)
$PN = 3Kgr$	....	(Peso neto del material de la placa PCM23)
$\%L = 100\%$	....	(porcentaje del acumulador que se licua)

Reemplazando valores se tiene:

$$CT\ 60\ Placas = 60 * 43 * 3 * 1$$

$$CT\ 60\ Placas = 7740\ Kcal$$

$$CT\ 60\ Placas = 9\ KWH$$

Por lo tanto:

La carga térmica requerida por las 60 placas del acumulador PCM23 es de 9 KWH para un porcentaje de licuación del 100%.

7. Cálculo de las pérdidas durante las 12 horas de la noche

Está dado por la siguiente fórmula matemática:

$$Pérdidas, 12 Hr noche = U_G * ACE * DT * N^{\circ}HrsP / 1000 * 860$$

Donde:

$ACE = 100m^2$	....	(Área de cobertura externa, lona)
$DT = TM - TEM$		(Diferencia de temperatura interior y exterior)
$DT = 20 - 8 = 12$	....
$N^{\circ}HrsP = 12 Hr$	....	(Número de horas pérdidas de calor en la noche)
$K_{PER} = 0.035 W/m * ^{\circ}C$	....	(Conductividad térmica del PER)
$E_{PER} = 0.1m$	....	(Espesor del aislante térmico del PER)
$U_G = 0.35 W/m^2 * ^{\circ}C$	....	(Coeficiente global de transferencia de calor)
$TEM = 8^{\circ}C$	....	(Temperatura externa media)
$TM = 20^{\circ}C$	....	(Temperatura media supuesta en la noche en el centro del domo)

Reemplazando valores, se tiene:

$$Pérdidas, 12 Hr noche = 0.35 * 100 * 12 * 12 / 1000 * 860$$

$$Pérdidas, 12 Hr noche = 4334.4 Kcal$$

$$Pérdidas, 12 Hr noche = 5.04 KWH$$

Por lo tanto:

Para un espesor del aislante del PER de 10 cm, solo se requiere 5.04 KWH, con la cual se garantiza la carga del acumulador.

8. Acumulador

Si el espesor del aislante térmico del PER es la mitad ($E_{PER} = 5 Cm$)

Para el caso el espesor del aislante térmico sea de $E_{PER}=5$ Cm, $U_G = 0.71 W/m^2 * ^\circ C$ se tiene las pérdidas durante las 12 horas de la noche.

$$\text{Pérdidas, 12 Hr noche} = 0.71 * 100 * 12 * 12/1000 * 860$$

$$\text{Pérdidas, 12 Hr noche} = 8793 \text{ Kcal}$$

$$\text{Perdidas, 12 Hrs noche} = 10.224 \text{ KWH}$$

9. Análisis de los resultados

Las 60 placas que entrega calor (7740 Kcal = 9 KWH) en este último caso para ($E_{PER} = 5$ Cm), no cubren la pérdida de calor (8793 Kcal = 10.224 KWH) por lo que se puede agregar más placas adicionales para esta diferencia de (8793 – 7740 =1053 Kcal), estas se cubren con: $1053/43*3 = 8$ placas adicionales de PCM23. Otro análisis podría ser que consideramos la temperatura media en el centro del domo de 18 °C, en este caso las pérdidas durante las 12 horas de la noche son de 8.52 KWH y como se dispone de 9 KWH, se cubre la pérdida de calor.

Se debe aclarar que estas ecuaciones no registran calores sensibles, masa inercial, aportes de las personas, pérdidas por fugas de calor, aire de renovación, etc. Estos se han tratado en otro capítulo.

De la ecuación utilizada para el cálculo de la carga térmica dice que la carga está en función de $N^{\circ}PCM$ y del %L, para que él %L = 100%, va a depender de la radiación del lugar. Cusco tiene elevados niveles de radiación solar y %L < 100 podríamos tenerlos solo si tenemos lluvias, días nublados, pero que en los meses de friaje Son bajas. Es probable que existan días con -3 °C.

3.4.3.10. Cálculo de la cantidad de acumulador PCM23 requerido para satisfacer la demanda térmica de calefacción del domo experimental

La demanda térmica y la cantidad de PCM se calcula tanto para el espesor del PER de 5 cm y 10 cm, considerado 2 casos para el área traslúcida cuando están cerrado y abierto por las noches. Si se cierra el área única de cobertura es de 100 m2 y en el caso que esté abierto su área de cobertura tiene 2 partes la pared y techo un área de 90 m2 y el área traslúcida de 10 m2. La demanda térmica debe satisfacer las

pérdidas de calor que se produce durante la noche (6 pm a 6 am), cuya cantidad de acumuladores PCM23 requerido que satisface la demanda térmica permite tener en el interior del domo una temperatura de 20°C, considerando que la temperatura exterior promedio es de 8°C. aquí juega un papel muy importante el coeficiente global de transferencia de calor (U_G), ya que cuanto menor es su valor se requerirá menor cantidad de PCM23, a continuación, se detalla dichos cálculos.

3.4.3.11. Cálculo de la demanda térmica y N° de PCM23 si el espesor del PER es $e_{PER} = 5\text{cm}$

1. Si se cierra el área traslúcida por las noches

1.1. Cálculo del coeficiente global de transmisión de calor (U_G)

El Coeficiente Global de Transmisión de Calor, considerando las cargas térmicas solo por cobertura con aislamiento térmico del PER en el domo está dado por la fórmula:

$$U_G = \frac{1}{R_T} \quad ; \text{ siendo: } \quad R_T = \frac{e_{PER}}{K_{PER}}$$

Donde:

$$K_{PER} = 0.035 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}} \quad \dots \text{ (Conductividad térmica del PER).}$$

$$e_{PER} = 5\text{cm} = 0.05 \text{ m} \quad \dots \text{ (Espesor del aislamiento térmico con PER).}$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$R_T = \frac{e_{PER}}{K_{PER}} = \frac{0.05 \text{ m}}{0.035 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{K}}} = 1.428571 \cong \underline{1.4286 \text{ m}^2 \text{ }^\circ\text{K}}$$

Resultando el coeficiente global de transmisión térmica de:

$$U_G = \frac{1}{1.4286} = 0.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^\circ\text{K}}$$

Este valor pudo ser algo menor, si se considera los otros aislantes que conforman la envoltura del domo; sin embargo, este valor es bastante práctico porque nos permite estimar con bastante exactitud, ya que la influencia de los otros es baja.

1.2. Cálculo de la demanda térmica de calefacción (Q_{cal})

La Demanda Térmica de Calefacción requerida para satisfacer las condiciones deseadas en el interior del domo ($T_i = 20^\circ\text{C}$) está dado por las pérdidas de calor que se produce durante la noche (12 hr aprox.), cuya Ecuación Matemática es:

$$Q = \frac{U_G \times ACE \times DT \times N^\circ\text{hrs.P}}{1000} \times 860 \quad [\text{Kcal}]$$

Donde:

$$U_G = 0.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} \quad \text{.....(Coeficiente Global de Transmisión de calor por cobertura con}$$

PER)

$$ACE = 100 \text{ m}^2 \quad \text{.....(Área de cobertura externa cerrado)}$$

$$T_M = 20^\circ\text{C} \quad \text{.....(Temperatura media deseada en el interior del domo)}$$

$$T_{EM} = 8^\circ\text{C} \quad \text{.....(Temperatura exterior promedio del domo)}$$

$$DT = 20 - 8 = 12^\circ\text{C} \quad \text{....(Diferencia de temperatura entre interior y exterior o salto térmico)}$$

$$N^\circ \text{ hrs. P} = 12 \quad \text{.....(Número de horas de calor perdido durante la noche (6 pm a 6 am))}$$

$$1 \text{ KWH} = 860 \text{ Kcal} \quad \text{....(factor de conversión)}$$

Reemplazando valores en la Ecuación se tiene:

$$Q = \frac{0.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{K}} \times 100 \text{ m}^2 \times 12^\circ\text{C} \times 12 \text{ Hrs} \times 860 \frac{\text{Kcal}}{\text{KWH}}}{1000 \frac{\text{W}}{\text{KW}}} = 8,668.8 \text{ Kcal} = 10.08 \text{ Kwh}$$

$$Q = 8668.8 \text{ Kcal} = 10.08 \text{ KWH}$$

Expresado en potencia sería de:

$$q = \frac{Q}{t} = \frac{10.08 \text{ KWH}}{12 \text{ H}} = 0.840 \text{ KW}$$

$$q = 840 \text{ W}$$

Por lo tanto, la energía perdida durante la noche sería aproximadamente de 10.1 Kwh, el mismo expresado en potencia es de 840 W.

1.3. Cálculo de la cantidad de PCM23 requerido para satisfacer la demanda térmica del domo (N_{PCM23}) cuando el área traslúcida (ventana) se cierra por las noches

La masa requerida para satisfacer la demanda térmica está dada por la fórmula matemática:

$$m = \frac{Q}{\bar{C}_{PS} (T_m - T_1) + \lambda + \bar{C}_{PL} (T_2 - T_m)}$$

Donde:

$Q = 10.08 \text{ KWH} = 36,288 \text{ KJ} \dots\dots$ (Demanda térmica requerida por el Domo)

$\bar{C}_{PS} = 2.1 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C} \dots\dots$ (Calor específico del CPM23 en estado sólido)

$\bar{C}_{PL} = 2.5 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{C} \dots\dots$ (Calor específico del CPM23 en estado líquido)

$T_m = 23^\circ \text{ C} \dots\dots$ (Temperatura de mezcla sólido-líquido o fusión del PCM23)

$\lambda = 180 \text{ KJ/Kg} \dots\dots$ (Energía específica, entalpía o calor latente de PCM23)

$T_1 = 23 - 3 = 20^\circ\text{C} \dots\dots$ (Temperatura mínima promedio de descarga operativa del PCM23, considerando 3°C de descenso como promedio de la temperatura de fusión).

$T_2 = 23 + 6 = 29^\circ\text{C} \dots\dots$ (temperatura máxima promedio de carga operativa del PCM23. Considerando 6°C de ascenso como promedio de la temperatura de fusión).

Reemplazando valores, se tiene:

$$m = \frac{36,288 \text{ KJ}}{2.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (23^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) + 180 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} + 2.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (29^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C})}$$

$$m = 180.268256334 \text{ Kg} \cong 180.3 \text{ Kg}$$

Como 1 placa PCM23 = 3 Kg, entonces se tiene la cantidad de placas de PCM23 de:

$$N^\circ \text{ PCM23} = \frac{180.3 \text{ Kg}}{3 \text{ Kg/PCM23}} = 60.089418778 \cong 60.1$$

$$N^{\circ} \text{PCM23} \cong 60 \text{ placas}$$

Debido a las pérdidas diversas que puedan existir se consideró para la experimentación inicial 60 placas de PCM23. Resultando la cantidad de energía emitida por el acumulador solar PCM23 como calor latente (Q_L) y sensible (Q_S) de:

1.3.1. Como calor latente (Q_L)

$$\text{Para } 60 \text{ PCM23} \Rightarrow Q_L = E_{50, \text{PCM23}} = 0.15 \times 60 = \underline{9.0 \text{ KWH}} \text{ (sólido - líquido)}$$

1.3.2. Como calor sensible (Q_S)

$$\text{a) } Q_L = 3 \frac{\text{Kg}}{\text{PCM}} \times 60 \text{ PCM} \times 2.1 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} (23^{\circ}\text{C} - 20^{\circ}\text{C}) = \underline{0.315 \text{ KWH}} \text{ (sólido a líquido)}$$

$$\text{b) } Q_L = 3 \frac{\text{Kg}}{\text{PCM}} \times 60 \text{ PCM} \times 2.5 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}^{\circ}\text{C}} (29^{\circ}\text{C} - 23^{\circ}\text{C}) = \underline{0.75 \text{ KWH}} \text{ (líquido a vapor)}$$

- Teniendo como calor sensible total (Q_{ST}) muy bajo de:

$$Q_{ST} = 0.315 + 0.75 = 1.065 \text{ KWH}$$

- Siendo el calor total (Q_T) igual a:

$$Q_T = Q_L + Q_S = 9.0 + 1.065 \cong 10.1 \text{ KWH}$$

Por lo tanto, se estima que las 60 placas de acumulador solar PCM23 cubren la demanda térmica requerida por el domo, entregando prácticamente toda la energía térmica como calor latente (9 Kwh) a temperatura constante y como calor sensible (de sólido a líquido y de líquido a vapor) solo una mínima cantidad de energía (1.065 Kwh).

2. Si permanece abierto el área traslúcida (ventana) por las noches

El área traslúcida (ventana) de PVC de superficie 10 m^2 y de espesor 0.5 mm , se instala en un domo a $2/3$ de la altura en la cual se encuentra en toda el área de

contorno (franja translúcida) el acumulador solar PCM23, cubierta solo por las coberturas exterior e interior de PVC de 0.5 mm. La pared y techo está compuesta por un aislamiento térmico de PER de 5 cm de espesor, una cámara de aire de 10 cm de espesor y 2 coberturas exterior e interior de PVC de espesor 0.5 mm. La temperatura promedio del interior de la habitación es 20°C y la del exterior 8°C en promedio. Se requiere calcular la cantidad del Acumulador solar PCM23 que permite satisfacer la demanda térmica de calor del domo, considerando la pérdida en el área translúcida (ventana), además de las pérdidas en la pared y techo.

2.1. Calor perdido por la pared y techo

2.1.1. Cálculo de la resistencia térmica total (R_T)

Está dado por la fórmula matemática:

$$R_T = \frac{1}{h_e} + R_{e+Rca} + R_i + \frac{1}{h_i}$$

Donde:

$$R_e = R_{PVC} + R_{PER} = \frac{0.0005 \text{ m}}{0.12 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}} + \frac{0.05 \text{ m}}{0.035 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}}$$

$$R_e = 1.4327381 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (\text{Resistencia exterior al calor que ofrece el PVC y PER})$$

$$h_e = 17 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \quad (\text{Coeficiente convectivo del aire exterior})$$

$$h_i = 9.09 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \quad (\text{Coeficiente convectivo del aire interior})$$

$$R_{ca} = \frac{0.17}{2} = 0.085 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (\text{Resistencia para cámara de aire no ventilada})$$

$$R_i = \frac{0.0005 \text{ m}}{0.12 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}} = 0.004167 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (\text{Resistencia interior en la cobertura interior de PVC}).$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$R_T = \frac{1}{17\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}} + 1.4327381 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0.085 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0.004167 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + \frac{1}{9.09\text{W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}}$$

$$R_T = 1.691 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

2.1.2. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U_G)

Es la recíproca de la Resistencia Térmica total de calor, y está dado por la ecuación:

$$U_G = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{1.691 \text{ m}^2\text{-}^\circ\text{C/W}}$$

$$U_G = 0.592 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}$$

2.1.3. Cálculo de la demanda térmica ($Q_{P,T}$)

Está dado por el calor que se pierde por la cobertura (pared y techo), sin considerar el área translúcida.

Se calcula con la fórmula matemática:

$$Q_{P,T} = \frac{U_G \times ACE \times DT \times \text{N}^\circ \text{Hrs.P} \times 860}{1000} \quad [\text{Kcal}]$$

Donde:

$U_G = 0.592 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ (Coeficiente global de transferencia de calor por la cobertura)

$ACE = 90 \text{ m}^2$ (Área de cobertura externa: pared y techo)

$\text{N}^\circ \text{Hrs P} = 12 \text{ Hrs}$(Número de Horas de pérdida de calor en la noche de 6pm a 6am)

$DT = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ (Diferencia de temperatura entre el exterior (8°C) y el interior (20°C))

Reemplazando se tiene:

$$Q_{P,T} = \frac{0.592 \times 90 \times 12 \times 12 \times 860}{1000} = 6,598.2 \text{ Kcal} \cong 7.66 \text{ KwH.}$$

$$Q_{P,T} = 7.66 \text{ KwH}$$

3. Calor perdido por el área traslúcida o la ventana (qv)

3.1. Cálculo de la resistencia térmica total (R_T)

Está dado por la fórmula matemática:

$$R_T = \frac{1}{h_e} + R_{PVC} + R_{ca} + R_i + \frac{1}{h_i}$$

Donde:

$$h_e = 17 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \quad (\text{Coeficiente convectivo del aire exterior})$$

$$h_i = 9.09 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \quad (\text{Coeficiente convectivo del aire interior})$$

$$R_i = 0.004167 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C} \quad (\text{Resistencia interior en la cobertura interior de PVC})$$

$$R_{PVC} = 0.004167 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (\text{Resistencia exterior al calor exterior del PVC})$$

$$R_{ca} = 0.085 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} \quad (\text{Resistencia en la cámara de aire, ligeramente ventilada})$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$R_T = \frac{1}{17 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}} + 1.4327381 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0.004167 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0.085 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + 0.004167 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}} + \frac{1}{9.09 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}}$$

$$R_T = 0.2622 \frac{\text{m}^2\text{-}^\circ\text{C}}{\text{W}}$$

En el área traslúcida no va el aislamiento térmico, por lo que la resistencia total, también se puede hallar restando a la resistencia total hallado en el caso (en el caso anterior) la resistencia del PER, resultando:

$$R_T = 1.691 - 1.42857 = \underline{0.2623} \frac{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}{\text{W}} \text{ (Se verifica el valor calculado).}$$

3.2. Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor (U_G)

Es la recíproca de la Resistencia Térmica total de calor, y está dado por la ecuación:

$$U_G = \frac{1}{R_T} = \frac{1}{0.2622 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$U_G = 3.814 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}}$$

3.3. Cálculo de la demanda térmica (Q_v)

Está dado por el calor que se pierde área traslúcida o ventana y se calcula con la fórmula matemática:

$$Q_v = \frac{U_G \times ACE \times DT \times N^\circ \text{ Hrs.} \times P \times 860}{1000} \quad [\text{Kcal}]$$

Donde:

$U_G = 3.814 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ (Coeficiente global de transferencia de calor por el área traslúcida)

$ACE = 10 \text{ m}^2$ (Área traslúcida de la cobertura exterior)

$N^\circ \text{ Hrs } P = 12 \text{ Hrs}$ (Número de Horas de pérdida de calor en la noche de 6pm a 6am)

$DT = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ (Diferencia de temperatura entre el interior 20°C y el exterior 8°C)

Reemplazando valores, se tiene:

$$Q_v = \frac{3.814 \times 10 \times 12 \times 12 \times 860}{1000} = 4,723.26 \text{ Kcal} \cong 5.4922 \text{ KwH.}$$

$$Q_v \cong 5.5 \text{ KwH}$$

3.4. Cálculo de la demanda total requerido por el domo (Q_T)

Está dado por el calor total que se pierde en la cobertura, pared y techo (Q_{PT}) y el calor que se pierde en el área traslúcida o ventana (Q_V), resultando:

$$Q_T = Q_{P,T} + Q_V = 7.66 + 5.5 = 13.16 \text{ Kwh}$$

$$Q_T = 13.16 \text{ Kwh} = 47,349 \text{ KJ}$$

Por lo tanto, se pierde calor por la pared y techo 7.67 Kwh y por el área traslúcida (ventana) de 10 m^2 se pierde 5.5 Kwh. Aumenta las pérdidas en 3 Kwh a diferencia del primer caso cuando se cierra el área traslúcida (o ventana), por lo que se requiere más acumuladores solares PCM23 para calefactor y satisfacer la demanda requerida.

3.5. Cálculo de la cantidad de PCM23 requerido para satisfacer la demanda térmica (N_{PCM23}) cuando el área traslúcida (ventana) está abierto por las noches

La masa requerida para satisfacer la demanda térmica está dada por la fórmula matemática:

$$m = \frac{Q}{\bar{C}_{PS} (T_m - T_1) + \lambda + \bar{C}_{Pl} (T_2 - T_m)}$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$m = \frac{47,349 \text{ KJ}}{2.1(23 - 20) + 180 + 2.5(29 - 23)}$$

$$m = 235.2161 \text{ Kg}$$

$$m \cong 235.22 \text{ Kg}$$

Entonces la cantidad de PCM23 requerido es:

$$N^{\circ} \text{PCM23} = \frac{235.2161 \text{ Kg}}{3 \text{ Kg/PCM}} = 78.4 \text{ PCM} \cong \underline{79 \text{ placas de PCM23}}$$

Por tanto:

- Este valor es relativamente alto por lo que se plantea disminuir las pérdidas en la ventana o aumentar el espesor del PER.
- Para disminuir las pérdidas y como consecuencia el número de placas de PCM23, una alternativa es cerrar el área traslúcida por la noche resultando como pérdida de 10.1 KWH y 60 placas de PCM23 satisfacen la pérdida de calor.
- La otra alternativa fue aumentar el espesor del aislamiento térmico del PER, para lo cual previamente se calculó el espesor óptimo económico resultando un valor de $E = 10 \text{ cm}$, con la cual se disminuyó las pérdidas de calor y consecuentemente número de placas del acumulador solar PCM23, cuyo cálculo se desarrolla a continuación.

4. Cálculo de la demanda térmica y n° de PCM, si el espesor del PER se duplica

4.1. Si se cierra el área traslúcida por la noche

4.1.1. Cálculo de la resistencia térmica total (R_T)

$$R_T = \frac{1}{h_{ex}} + R_e + R_{ca} + R_i + \frac{1}{h_i}$$

Donde:

$$R_e = R_{PVC} + R_{PER} = \frac{0.0005}{0.12} + \frac{0.1}{0.035} = 2.86131 \frac{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

$$R_T = \frac{1}{17} + 2.86131 + 0.085 + \frac{0.0005}{0.12} + \frac{1}{9.09}$$

$$R_{Tv} = 3.11931072099 \frac{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Por lo tanto, la resistencia térmica total tendrá un valor de:

$$R_{Tv} = 3.12 \frac{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

4.1.2. Cálculo del coeficiente global (U_T)

El coeficiente global de transferencia de calor es la recíproca de la Resistencia Total y será:

$$U_T = \frac{1}{R_T} = 0.320563644736 \cong 0.321 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

$$U_T = 0.321 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}$$

4.1.3. Cálculo de la demanda térmica (Q_T)

Está dado por la fórmula matemática:

$$Q_T = \frac{U_G \times ACE \times DT \times N^\circ \text{HrsP} \times 860}{1000} \quad [\text{Kcal}]$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$Q_T = \frac{0.321 \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \times 100 m^2 \times 12^\circ C \times 12 \text{ Hrs} \times 860 \frac{\text{Kcal}}{\text{KWH}}}{1000 \frac{W}{KW}}$$

$$Q_T = 3970.11 \text{ Kcal} = \underline{4.6164 \text{ KWH}}$$

$$Q_T = 4.62 \text{ KWH} = 16,619.056 \text{ KJ} \cong \underline{16,619.1 \text{ KJ}}$$

4.1.4. Cálculo de la cantidad de placas del acumulador PCM23

$$m = \frac{Q}{\bar{C}_{PS}(T_m - T_1) + \lambda + \bar{C}_{PI}(T_2 - T_m)}$$

$$m = \frac{16,619.0561431}{2.1(23 - 20) + 180 + 2.5(29 - 23)}$$

$$m = 82.558649 \cong \underline{82.56 \text{ Kg}}$$

- Entonces la cantidad de placas de PCM23 es de:

$$N^\circ \text{ PCM23} = \frac{82.56 \text{ Kg}}{3 \text{ Kg/PCM23}}$$

$$N^{\circ} \text{PCM23} \cong 27.52 = \underline{28 \text{ placas de PCM23}}$$

Por lo tanto:

Al duplicar el espesor del PCM23 ($e_{\text{PER}} = 10\text{cm}$), la demanda térmica disminuye a 4.62 KWH, y la cantidad de PCM23 es solo de 28 placas, reduciéndose considerablemente la demanda térmica y el N° de placas de PCM23.

4.2. Si permanece abierto el área traslúcida por las noches

Se pierde calor a través de la cobertura de 90 m^2 y en el área traslúcida de 10 m^2 .

4.2.1. Cálculo de la demanda térmica o del calor que se pierde a través de la cobertura del domo de 90 m^2

Está dado por la fórmula matemática

$$Q_D = \frac{U_G \times ACE \times DT \times N^{\circ}\text{hrs.P} \times 860}{1000}$$

Donde:

$$U_G = 0.321 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}} \quad (\text{Coeficiente global para } e_{\text{PER}} = 10 \text{ cm})$$

$$ACE = 90 \text{ m}^2 \quad (\text{Área de cobertura externa, no considera el área traslúcida de } 10\text{m}^2)$$

$$DT = 12^{\circ}\text{C} \quad (\text{Diferencia de temperatura entre la interior y exterior})$$

$$N^{\circ} \text{ hrsP} = 12 \quad (\text{Asumiendo número de horas de pérdidas durante la noche})$$

$$1 \text{ KWH} = 860 \text{ Kcal} \quad (\text{Factor de conversión de energía})$$

$$1 \text{ KW} = 1000 \text{ W} \quad (\text{factor de conversión de potencia})$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$\Rightarrow Q_D = \frac{0.321 \times 90 \times 12 \times 12 \times 860}{1000}$$

$$\therefore Q_D = 3,577.7376 \text{ Kcal} = 4.16016 \text{ KWH} \cong \underline{4.2 \text{ KWH}}$$

4.2.2. Cálculo de la demanda térmica o del calor que se pierde a través del Área Traslúcida (o ventana)

Está dado por la fórmula matemática:

$$Q_v = \frac{U_G \times ACE \times DT \times N^{\circ}hrs.P \times 860}{1000}$$

Donde:

$$U_G = 3.81435 \frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C} \quad (\text{Coeficiente global sin considerar el PER})$$

$$ACE = 10 m^2 \quad (\text{Área translúcida de la cobertura externa de PVC})$$

$$DT = 12^{\circ}C \quad (\text{Diferencia de temperatura entre la interior y exterior del domo})$$

$$N^{\circ} hrsP = 12 \text{ Hrs.} \quad (N^{\circ} \text{ de horas de pérdidas estimado})$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$\Rightarrow Q_v = \frac{3.81435 \times 10 \times 12 \times 12 \times 860}{1000}$$

$$\therefore Q_v = 5.492664 \text{ Kcal}$$

$$Q_v \cong 5.493 \text{ KWH} \cong \underline{5.5 \text{ KWH}}$$

4.2.3. La Demanda Térmica total de calor requerido será de:

$$Q_T = Q_D + Q_v$$

$$Q_T = 4.2 + 5.5 = 9.7 \text{ KWH} \cong \underline{34,920 \text{ KJ}}$$

4.2.4. Cálculo de la cantidad de acumulador solar PCM23

La masa total del material acumulador PCM23 está dado por la fórmula:

$$m = \frac{Q_T}{\bar{C}_{PS}(T_m - T_1) + \lambda + \bar{C}_{PI}(T_2 - T_m)}$$

$$m = \frac{34,920 \text{ KJ}}{2.1(23 - 20) + 180 + 2.5(29 - 23)}$$

$$m = 173.47242921 \text{ Kg}$$

$$\boxed{m \cong 173.5 \text{ Kg}}$$

Entonces la cantidad de placas requerido del acumulador PCM23 es de:

$$N^{\circ} \text{ PCM23} = \frac{173.5 \text{ Kg}}{3 \text{ Kg/PCM}} = 57.8241431 \text{ PCM}$$

$$N^{\circ} \text{ PCM23} = 58 \text{ Placas de PCM23}$$

Por tanto: Considerando el espesor del PER de 10 cm y 60 palcas de PCM23, sin cerrar el área traslúcida se garantiza la demanda térmica requerida de modo que se tenga en el interior del domo 20°C. Se puede concluir que considerando el área traslúcida sin cerrar a diferencia que cuando se cierra por la noche tanto la demanda térmica y el número de PCM23 se duplica aproximadamente.

Es necesario indicar que los resultados obtenidos en el domo experimental, nos van a permitir hacer las mejoras que deben ser consideradas para el domo comercial.

Tabla 24

Resumen de resultados de la cantidad de PCM23 requerido para satisfacer la demanda térmica de calefacción del domo.

Casos	Espesor del aislante PER (E _{PER} : cm)	Resistencia Térmica $\left(R_T : \frac{m^2 \cdot ^\circ C}{w} \right)$	Coefficiente térmico global $\left(U_G : \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ C} \right)$	Área de la cobertura exterior (ACE: m ²)	Demanda térmica (KJ)	Cantidad de masa del PCM23 (Kg)	Cantidad de placas de PCM23 (# placas)
Área traslúcida cerrado	Espesor del PER 5 cm	1.4284	0.7	100	10.1 (36.288)	180.3	60
Área traslúcida o ventana abierta	Pared y techo (espesor del PER: 5 cm)	1.691	0.592	90	7.66 (27.576)	136.99	46
	Área traslúcida (sin PER)	0.263	3.814	10	5.5 (19.800)	98.361	33
				Total	13.16 (47.376)	235.35	79
Área traslúcida cerrado	Espesor del PER 10 cm	3.1193	0.321	100	4.6164 (16.6191)	82.56	28
Área traslúcida o ventana abierta	Pared y techo (espesor del PER: 10 cm)	3.1193	0.321	90	4.16	74.4	25
	Área traslúcida (sin PER)	0.2623	3.814	10	5.5 (19.800)	98.36	33

	Total	100	9.66 (34.776)	172.76	58
--	-------	-----	------------------	--------	----

3.4.3.12. Descripción de la instalación y ubicación de los PCMs23

- El domo para la experimentación es de 50 m² de base, tiene una altura de 4m de radio y 100 m² de cubierta de lona de PVC que cubre el aislamiento térmico en base a polietileno reticulado. (PER).
- Los PCM23 es una cantidad de 60 placas, se colocaron formando un anillo en el área traslucida, ubicada a 2/3 de la altura, de tal manera de dar 38°C. Este anillo se enfrenta a la radiación solar que contiene a los PCM23 e n el área traslucida. En la figura anexa el domo se puede observar los detalles de posesión relativa al PCM 23.

3.4.4. Descripción de la operación del sistema de calefacción

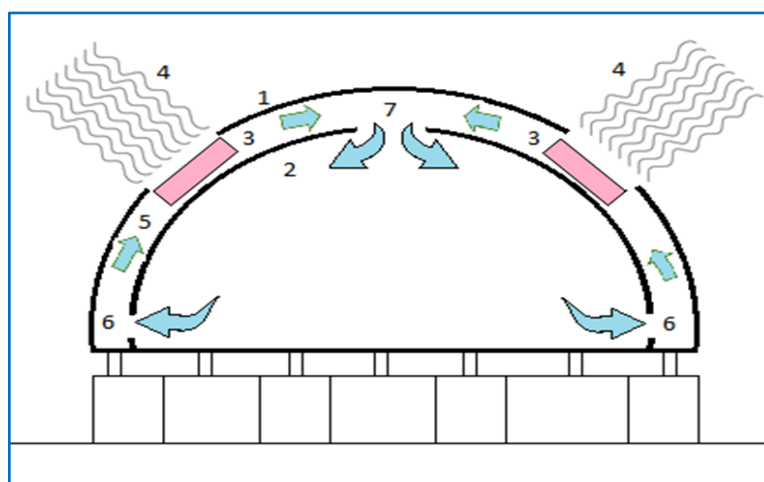


Figura 16. Proceso de circulación con aire en el domo experimental

- Durante el día los PCM23 (3), que se encuentra en el área traslucida cubierta de PVC por las membranas exterior (1) e interior (2), se carga con el calor proveniente de la radiación solar (4) y tan pronto empieza a bajar la temperatura ambiente a menos de 23°C, empieza el PCM23 a entregar el calor a 23°C de forma constante al aire. El aire recepciona el calor del contorno del PCM a una temperatura constante de 23°C, teniendo una perdida por transferencia en el contenedor del PCM que es de PVC de

aproximadamente 10°C. Por diferencia de densidad empieza a circular por la cámara de aire (5) como se muestra en la figura () en el esquema de circulación, ingresando el aire frío (6) por la base inferior e interior del domo de espesor de 2 cm y saliendo el aire caliente (7) por la parte superior al interior del domo por un diámetro de 60 cm.

- El aire caliente al ingresar al domo calienta el ambiente interior, estratificándose su temperatura hasta su base inferior, aumentando su densidad como aire frío, para volver a ingresar por la base interior e inferior a la cámara de aire; que nuevamente el aire en su paso por las PCMs se calienta, recirculando por la cámara y el interior del domo en forma natural. Por diferencia de densidad, uniformizándose la temperatura en su interior en un promedio de 11 a 12°C y la humedad relativa de 50 a 60%, según las condiciones exteriores de temperatura y humedad relativa del medio ambiente, lo cual es determinante para su calefacción, debido a las pérdidas de calor al exterior, que se producen en el aislamiento térmico del domo, lográndose un salto térmico en promedio de 5°C aproximadamente.

3.4.4.1. Ensayo, planteamiento experimental y procesamiento de información

3.4.4.1.1. Condiciones de ensayo

- Para realizar las condiciones de Ensayo fue necesario determinar los siguiente:
- Fijar las condiciones ambientales interior del domo (temperatura y humedad relativa), observando que no esté definida ni controlada la condición del ambiente exterior al domo ($T_i = 20^\circ\text{C}$, $HR_i = 50\%$)
- Las dimensiones del aislamiento térmica del domo experimental, ($e_{per} = 5\text{cm}$, $e_{ca} = 10\text{cm}$, $e_{pvc} = 0.5\text{mm}$)
- La cantidad de Acumuladores de materiales de cambio de Fase PCM23 incorporados en el domo (60 placas).

- Contar con la cantidad de ocupantes (4) y estando el equipamiento completo, considerar los siguientes rangos de temperatura para satisfacer las necesidades de calefacción y refrigeración:

Calefacción. - Cuando el ambiente exterior está a menor temperatura que la especificada por el domo.

Esto ocurre durante la noche y específicamente más crítico de 5 a 6:30 am calefactándose con PCM 23.

Refrigeración. - Cuando el ambiente exterior está a menor temperatura que la especificada por el domo, esto ocurre durante el día y específicamente más crítico de 12 am a 2:30 pm aproximadamente, refrigerándose en forma natural mediante apertura por tubos existentes en el domo para renovación de aire fresco.

3.4.4.1.2. Planeamiento experimental

Definidas las primeras condiciones de ensayo serán:

A. Ensayo Tipo (1): regresión lineal múltiple

1. Manteniéndose constante las condiciones físicas (parámetros de diseño) del domo experimental. Permaneciendo sus dimensiones fijas para las condiciones nominales diseñadas, en la que no varía el espacio entre las capas internas de cobertura del domo que forman parte del aislamiento térmico como son: el espesor del aislamiento polietileno reticulado ($e_{per} = 5$ cm), el espesor de la cámara de aire ($e_{ca} = 10$ cm).
2. Luego se midieron las condiciones ambientales exteriores del domo (t_{amb} , HR_{amb} , P_{atm}), las condiciones ambientales internas del domo (T_i , HR_i), la temperatura del aire en contacto con el acumulador PCM23 (T_{PCM}) y el tiempo según la hora transcurrida del día.

Todas estas mediciones de temperatura, humedad relativa y presión atmosférica local fueron registradas cada 5 minutos durante los 3 meses de helada por los 8 sensores marca Oregon y los 3 sensores de respaldo marca Tynitac, ubicada en los diferentes puntos del ambiente del domo.

3. Todas las mediciones realizadas por los 8 sensores permitieron también obtener el comportamiento dinámico de las temperaturas, humedades relativas y presión atmosférica local en los diferentes puntos del domo, así como obtener sus gráficas correspondientes como se indica en los resultados del ensayo obtenido.
4. Para hallar el modelo matemático se aplicó el Modelo de “Regresión Lineal Múltiple” para determinar cómo afecta: la condición ambiental exterior (T_{amb} , HR_{amb} , P_{atm}) en el interior del domo, la temperatura que entrega el acumulador de Energía PCM23 (T_{PCM}) al aire para calefacción del domo y el tiempo según la hora del día (t) que influyen en el ambiente interior del domo produciéndose pérdida por transferencia de calor durante la noche. Determinándose con los datos obtenidos el comportamiento dinámico de la temperatura (T_i) y Humedad Relativa (HR_i) en el interior del domo, según la fórmula de la función matemática:

$$(T_i, HR_i) = f_1(T_{amb}, HR_{amb}, P_{atm}, T_{PCM}, t)$$

Los parámetros indicados del modelo fueron medidos por los sensores considerados los siguientes puntos ubicados en el domo como son: parámetros ambientales interiores (T_i , HR_i) ubicado en el centro del domo correspondiente al punto (3) determinado por el sensor denominado CH3., parámetros ambientales exteriores (T_{amb} , HR_{amb} , P_{atm}) ubicado en el exterior del domo correspondiente al punto (8) determinado por el sensor denominado CH8, el parámetro de calefacción del acumulador PCM23 determinado por la temperatura que entrega al aire (T_{PCM}) está ubicado en el punto (5), correspondiente al sensor denominado CH5 y finalmente el parámetro tiempo (t) registrado con un cronómetro según la hora del día.

5. Fue importante resaltar los valores óptimos alcanzados (máximos y mínimos) y humedad relativa registrados por los 8 sensores desde CH1 hasta CH8 determinándose su comportamiento dinámico y sus valores óptimos para los casos críticos de friaje en la mañana (4 a 6 am) y calor al

medio día (11 a 13 hrs) logrados durante los 3 meses de helada (mayo, junio y julio).

B. Ensayo Tipo (2): Diseño factorial compuesto

- Se varió las condiciones físicas (parámetro de diseño) del domo según el planeamiento del diseño experimental, variando sus dimensiones entre capas internas que conforman la cobertura del domo que forman parte del aislamiento térmico como son: El polietileno Reticulado (PER) y la cámara de aire (C_{aire}). así mismo se varió el número de placas de acumuladores de materiales de cambio de fase (N_{pcm}) incorporadas al domo.
- Luego se midieron según el planteamiento del diseño experimental establecido: El espesor del polietileno reticulado (E), el espesor de la cámara de aire (C) y la cantidad de materiales de cambio de fase PCM23 incorporados al domo y las condiciones ambientales internas del domo (T_i , HR_i) manteniendo las condiciones ambientales exteriores establecidas para la época de friaje.
- Para hallar el modelo matemático se aplicó el modelo: “Diseño factorial compuesto 2^3 ”, para determinar cómo afecta la variación de los espesores: Polietileno reticulado (E) y la cámara de aire (C) en la pérdida por cobertura del domo y la cantidad de PCM23 (N) para calefacción del aire que ingresa al domo. Determinándose el comportamiento de los parámetros de calefacción (T_i , HR_i) en el interior del domo, según la forma de la función matemática:

$$(T_i, HR_i) = f_2(E, C, N)$$

- Las mediciones de los sensores de temperatura (T_i) y humedad relativa (HR_i), permitieron determinar el comportamiento de los parámetros de calefacción en el interior del domo, así como sus graficas correspondientes y sus valores óptimos (máximos y mínimos) alcanzados durante los meses críticos de friaje.

3.4.5. Resultados experimentales

Tabla 25

Temperatura (Mayo 20 Al 31: 2015)

HORA	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
00:00	5.62	8.42	12.65	12.56	16.37	9.99	12.72	6.08
01:00	5.28	7.96	11.91	11.85	16.05	9.36	12.00	5.75
02:00	5.46	7.88	11.41	11.37	15.75	9.11	11.51	5.89
03:00	6.05	8.07	11.16	11.14	15.45	9.15	11.25	6.34
04:00	6.54	8.35	11.08	11.07	15.16	9.38	11.13	6.76
05:00	6.49	8.38	11.01	11.01	14.93	9.39	11.04	6.80
06:00	6.61	8.41	10.93	11.03	14.66	9.40	10.97	6.87
07:00	7.75	9.12	11.45	12.15	14.49	10.53	11.43	8.68
08:00	9.55	10.38	12.52	15.50	14.40	12.65	12.43	11.54
09:00	11.96	12.40	15.42	29.21	14.45	21.14	15.55	20.00
10:00	15.45	15.51	21.19	42.89	14.60	29.17	20.57	27.88
11:00	18.38	18.21	24.82	47.46	14.84	31.76	24.25	30.72
12:00	19.96	20.00	27.31	48.87	15.22	33.90	26.65	31.43
13:00	20.65	20.99	28.07	46.35	15.65	33.08	27.59	29.88
14:00	21.13	21.75	28.23	43.64	16.10	32.69	27.95	28.19
15:00	19.92	21.44	27.71	37.89	16.54	30.87	27.39	23.95
16:00	16.91	19.26	24.61	26.59	16.85	23.15	24.62	17.68
17:00	14.35	17.02	21.81	22.30	17.05	19.34	21.98	14.79
18:00	11.96	14.86	19.89	20.49	17.17	17.26	20.02	12.02
19:00	9.66	12.92	18.21	18.37	17.20	15.35	18.30	9.60
20:00	8.41	11.56	16.69	16.72	17.15	13.92	16.73	8.62
21:00	7.55	10.52	15.44	15.45	17.01	12.85	15.51	7.92
22:00	6.66	9.53	14.34	14.35	16.85	11.83	14.45	7.11
23:00	6.04	8.85	13.38	13.34	16.62	10.93	13.46	6.49

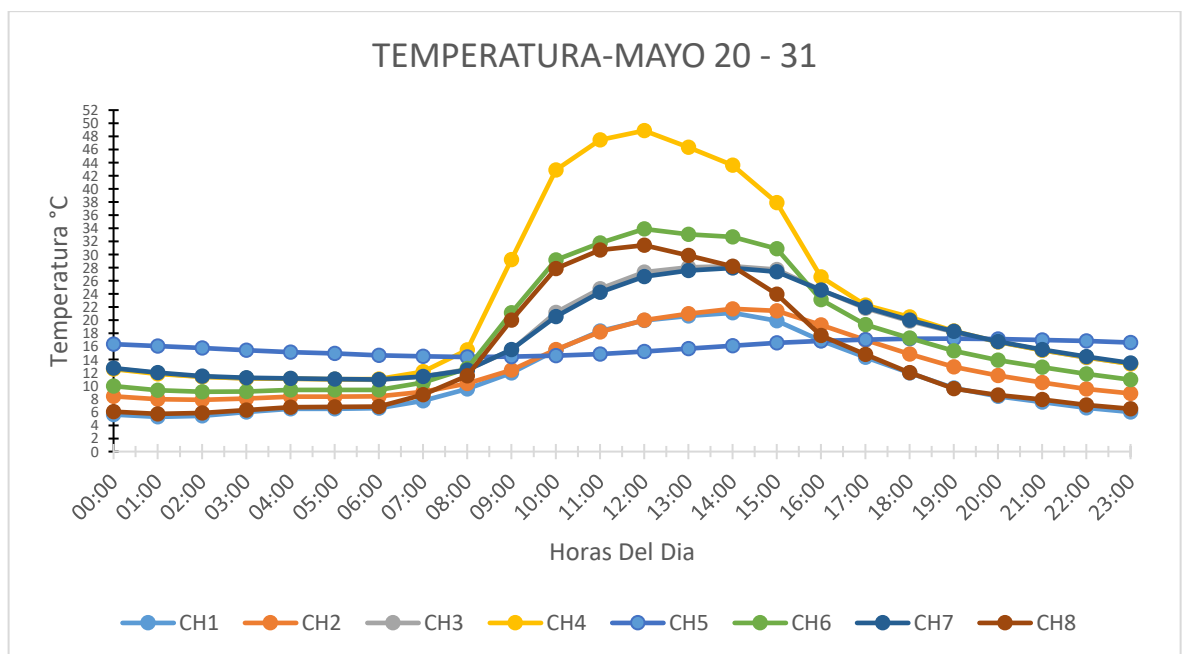


Figura 17. Gráfica temperatura mes mayo de diferentes ambientes del domo durante las 24 horas

Tabla 26

Temperatura (Junio 2015)

HORA	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
00:00	4.84	7.84	13.17	13.24	16.72	10.97	13.98	5.66
01:00	4.56	7.33	12.51	12.50	16.43	10.23	13.14	5.31
02:00	4.74	7.29	12.22	11.98	16.11	9.83	12.52	5.41
03:00	4.97	7.33	11.76	11.60	15.78	9.58	12.11	5.55
04:00	5.06	7.31	11.55	11.32	15.50	9.36	11.78	5.57
05:00	5.08	7.24	11.35	11.08	15.22	9.11	11.48	5.57
06:00	5.27	7.28	11.22	11.03	14.95	9.04	11.25	5.69
07:00	6.72	8.22	11.65	11.57	14.69	9.94	11.45	7.34
08:00	8.67	9.55	12.63	13.72	14.55	11.68	11.98	10.16
09:00	11.15	11.37	15.22	21.72	14.52	17.11	13.82	19.02
10:00	15.40	14.57	20.66	36.76	14.65	28.91	18.95	27.63
11:00	19.05	17.54	24.78	45.74	14.89	34.69	23.16	31.95
12:00	21.46	19.87	27.55	48.93	15.24	37.06	26.18	34.08
13:00	22.55	21.39	28.64	46.83	15.68	36.76	27.75	33.16
14:00	22.82	22.18	28.80	44.39	16.15	36.50	28.27	30.54
15:00	20.83	21.67	28.16	37.83	16.58	32.46	27.44	24.65
16:00	17.30	19.16	25.09	26.86	16.93	24.55	24.50	18.03
17:00	14.48	16.83	22.18	22.99	17.17	20.84	22.00	15.18
18:00	11.30	14.37	20.16	20.77	17.32	18.46	20.13	11.75
19:00	9.14	12.48	18.53	18.97	17.38	16.60	18.52	9.51
20:00	7.93	11.23	17.28	17.45	17.37	15.16	17.58	8.54
21:00	7.01	10.20	15.87	16.14	17.28	13.95	16.51	7.74
22:00	6.21	9.34	14.82	15.09	17.14	12.92	15.45	7.01
23:00	5.46	8.52	13.91	14.11	16.96	11.91	14.66	6.26

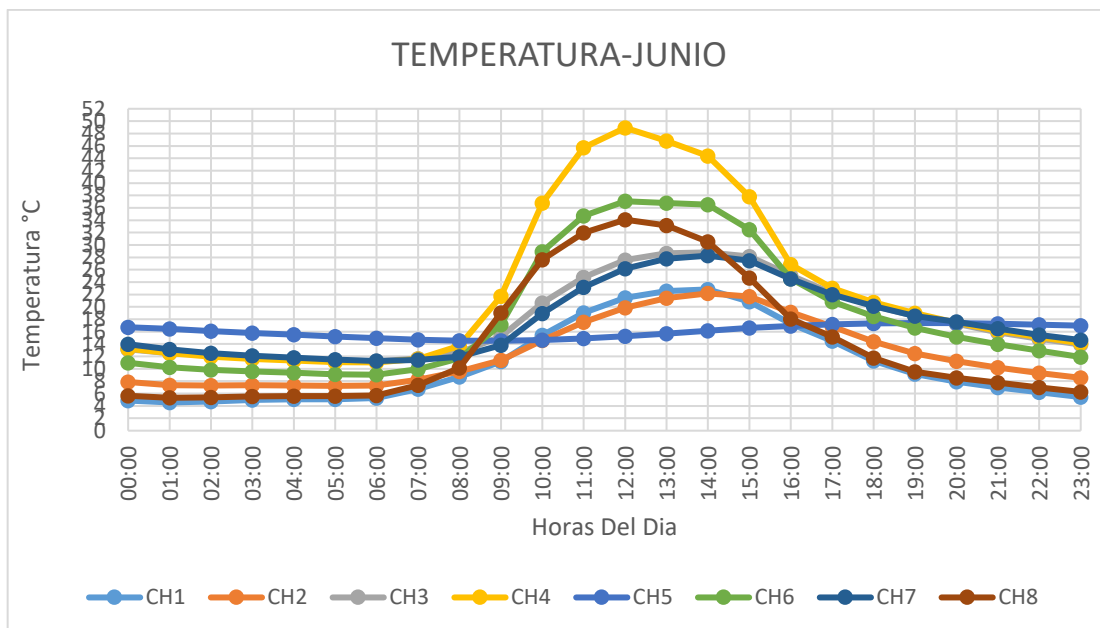


Figura 18. Gráfica temperatura mes junio de diferentes ambientes del domo durante las 24 horas

Tabla 27

Temperatura (Julio 2015)

HORA	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8
00:00	4.55	7.91	12.18	12.15	14.97	10.28	12.22	5.26
01:00	3.95	7.17	11.30	11.27	14.69	9.43	11.33	4.64
02:00	3.31	6.44	10.55	10.50	14.40	8.63	10.57	4.02
03:00	2.77	5.80	9.82	9.78	14.10	7.89	9.90	3.47
04:00	2.63	5.46	9.27	9.23	13.71	7.35	9.37	3.27
05:00	2.47	5.14	8.79	8.77	13.80	6.88	8.91	3.22
06:00	2.5	4.98	8.46	8.48	13.00	6.54	8.67	3.22
07:00	3.83	5.36	8.58	8.75	12.77	6.94	8.96	4.40
08:00	5.36	6.43	9.01	9.44	12.66	7.61	9.61	6.45
09:00	8.38	8.33	11.07	15.40	13.03	16.65	12.31	15.99
10:00	12.44	12.82	16.94	30.10	13.42	27.42	17.84	27.20
11:00	16.85	16.60	22.74	39.29	13.98	32.80	22.72	32.17
12:00	19.9	19.63	26.47	43.17	14.40	34.43	26.17	34.08
13:00	21.53	21.50	28.66	42.76	14.90	34.73	27.92	33.97
14:00	21.77	22.36	29.27	40.80	15.41	33.43	28.44	30.57
15:00	20.34	21.91	28.40	36.53	15.74	30.54	27.50	25.19
16:00	16.81	19.33	24.91	26.92	15.83	23.36	24.46	17.83
17:00	14.13	17.11	21.88	22.49	15.90	19.49	21.67	14.90
18:00	11.35	14.91	19.73	20.08	15.98	17.20	19.58	11.83
19:00	8.77	12.64	17.50	18.12	15.77	15.14	17.74	9.09
20:00	7.48	11.29	16.34	16.53	15.70	13.77	16.30	7.97
21:00	6.57	10.29	15.10	15.22	15.52	12.58	15.04	7.23
22:00	5.59	9.33	14.04	14.10	15.29	11.43	13.85	6.37
23:00	4.92	8.47	13.02	12.98	15.03	10.44	12.88	5.75

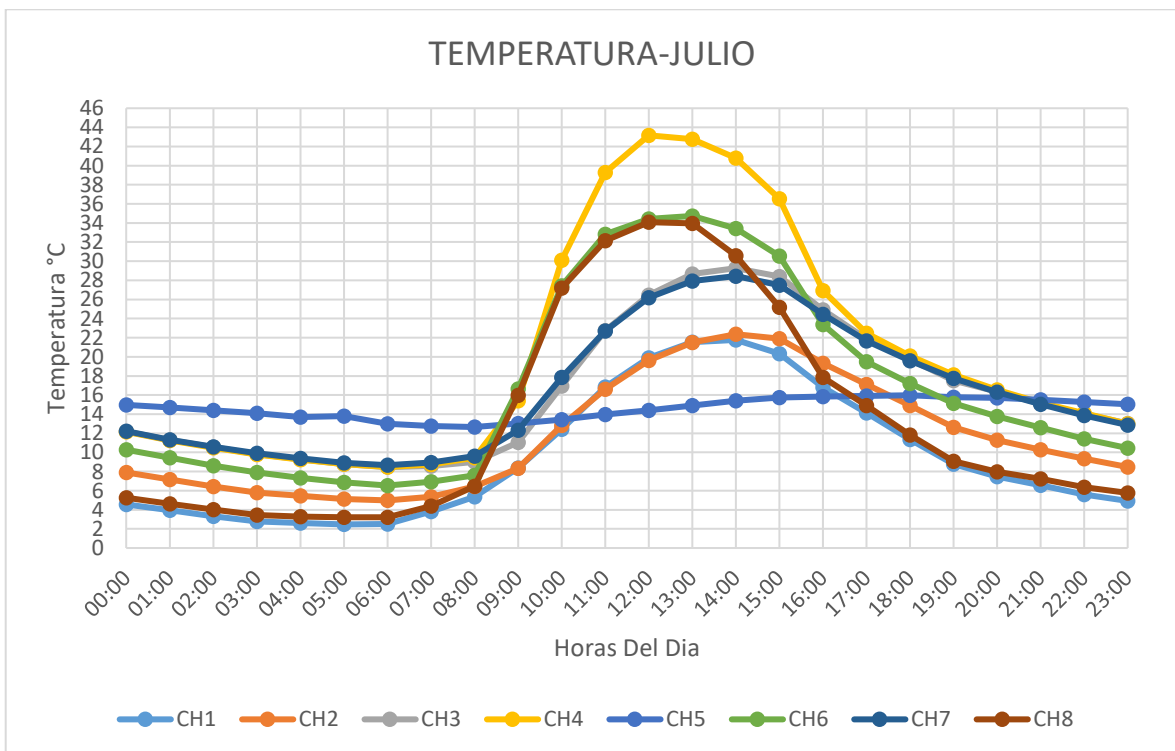


Figura 19. Gráfica temperatura mes julio de diferentes ambientes del domo durante las 24 horas

3.5. Descripción detallada de métodos por objetivos específicos

- Modelamiento matemático y análisis estadístico

3.5.1. Formulación matemática para determinar la temperatura (T_i) y humedad Relativa (HR_i) en el interior de un domo experimental según la variación dinámica de las condiciones ambientales en la ciudad de Urubamba – Cusco

3.5.1.1. Identificación de las variables que intervienen

Las variables (independientes) que influyen para determinar tanto la temperatura (T_i) y Humedad Relativa (HR_i) interior en un domo experimental utilizando calefacción con PCM son:

1. Temperatura ambiental exterior (T_{ex})
2. Humedad relativa ambiental exterior (HR_{ex})
3. Tiempo en horas (t_{hrs})
4. Temperatura del PCM (T_{PCM})
5. Presión atmosférica (ambiental) local (P_{atm})
6. Radiación solar (Rad)
7. Velocidad del viento (V_v)
8. Precipitación (Prec)
9. Nubosidad (Nub)
10. Pérdidas de calor (Q_{per})
 - 10.1. Pérdida en la cobertura del domo o pared (Q_{cob})
 - 10.2. Pérdida en el área traslucida o ventana (Q_{AT})
 - 10.3. Pérdida en el piso o interior del domo (Q_{piso})
 - 10.4. Pérdida en la puerta del domo (Q_{puerta})
 - 10.5. Otros

$$\Rightarrow (T_i, HR_i) = f(T_{ex}, HR_{ex}, t, T_{PCM}, P_{Atm}, Rad, V_v, Prec, Nub, Q_{perd})$$

Donde:

T_i : temperatura interior del domo

HR_i : Humedad relativa interior del domo

3.5.1.2. Análisis y reducción de las variables

Considerando que el estudio más relevante es para los meses de friaje (helada): Mayo, junio y julio, las variables asumidas como intervinientes (o constantes) son:

- Radiación Solar (Rad) = K_1 (puede considerarse el promedio para Urubamba – Cusco de 5.2 KWH/m²día en la noche es cero)
- Precipitación (Prec) = K_2 (En los meses de helada no hay lluvias y en el caso de existir sería mínima)
- Nubosidad (Nub) = K_3 (Muy poco de niebla, es casi despejado)
- Velocidad de viento (Vv) = K_4 (En el valle de Urubamba hay poca velocidad de viento y se encuentra el domo en un lugar cercado casi cerrado)
- Pérdidas de Calor (Q_{perd}) = K_5 (Puede considerarse constante, ya que las condiciones de diseño de la pared o cobertura de la ventana o área traslúcido, peso y puerta son fijos.

Por tanto:

Del análisis de las variables intervinientes consideradas como constantes, se puede reducir a una sola variable interviniente del producto de cada uno.

Es decir, el efecto de estas variables intervinientes está representados por la constante (K) conocido como variable interviniente:

$$K_I = K_1 \times K_2 \times K_3 \times K_4 \times K_5$$

3.5.1.3. Formulación del modelo matemático

Considerando las variables dependientes, independientes intervinientes, la función matemática está representada por la función matemática:

$$\left(\underbrace{T_i, HR_i}_{\text{Variables dependientes}} \right) = f \left(\underbrace{T_{ex}, HR_{ex}, t, T_{PCM}, P_{Atm}}_{\text{variables independientes}}, \underbrace{K_I}_{\text{Variable interviniente}} \right)$$

- La función matemática indicada, puede ser representada mediante la relación de proporcionalidad (α):

$$T_i \propto T_{ex}^{a_1} \cdot HR_{ex}^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot T_{PCM}^{a_4} \cdot P_{atm}^{a_5} \cdot K_I$$

$$HR_i \propto T_{ex}^{b_1} \cdot HR_{ex}^{b_2} \cdot t^{b_3} \cdot T_{PCM}^{b_4} \cdot P_{atm}^{b_5} \cdot K'_I$$

- Para transformar la proporcionalidad a una ecuación matemática, se ajusta a una igualdad mediante las constantes de proporcionalidad (K_{II} y K'_{II}) que representa otras variables intervinientes no consideradas y que pueden estar incluida, es decir:

$$T_i = K_{II} T_{ex}^{a_1} \cdot HR_{ex}^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot T_{PCM}^{a_4} \cdot P_{atm}^{a_5} \cdot K_I$$

$$HR_i = K'_{II} T_{ex}^{b_1} \cdot HR_{ex}^{b_2} \cdot t^{b_3} \cdot T_{PCM}^{b_4} \cdot P_{atm}^{b_5} \cdot K'_I$$

- Resultando las ecuaciones:

$$\Rightarrow T_i = \underbrace{K_I K_{II}}_{K_1} T_{ex}^{a_1} \cdot HR_{ex}^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot T_{PCM}^{a_4} \cdot P_{atm}^{a_5}$$

$$HR_i = \underbrace{K'_I K'_{II}}_{K_2} T_{ex}^{b_1} \cdot HR_{ex}^{b_2} \cdot t^{b_3} \cdot T_{PCM}^{b_4} \cdot P_{atm}^{b_5}$$

Considerando las constantes únicas “ K_1 ” y “ K_2 ” como el producto de las constantes:

$$K_1 = K_I \times K_{II}$$

$$K_2 = K'_I \times K'_{II}$$

Por tanto:

La ecuación del modelo matemático planteado tanto para la temperatura interior (T_i) y humedad relativa interna (HR_i) será:

$$T_i = K_1 \cdot T_{ex}^{a_1} \cdot HR_{ex}^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot T_{PCM}^{a_4} \cdot P_{atm}^{a_5}$$

(I)

$$HR_i = K_2 \cdot T_{ex}^{b_1} \cdot HR_{ex}^{b_2} \cdot t^{b_3} \cdot T_{PCM}^{b_4} \cdot P_{atm}^{b_5}$$

Donde:

a_1, a_2, a_3, a_4, a_5 = son parámetros de temperatura interior (por determinarse)

b_1, b_2, b_3, b_4, b_5 = son parámetros de humedad relativa interior (por determinarse)

K_1 = Constante de proporcionalidad que representa a todas las variables intervinientes en el proceso para la temperatura.

K_2 = Constante de proporcionalidad que representa a todas las variables intervinientes en el proceso para la humedad relativa.

- Linealizando los modelos matemáticos, se obtiene las ecuaciones de Regresión Lineal Múltiple para la temperatura interior del domo (y_1) y humedad relativa interior del domo (HR_1)

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_3x_3 + a_4x_4 + a_5x_5 \quad \text{.....(II)}$$

$$y_2 = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 \quad \text{..... (III)}$$

Donde:

$a_i = a_0, a_1, \dots, a_5$ (Coeficiente de regresión de la T_i)

$b_i = b_0, b_1, \dots, b_5$ (Coeficiente de regresión de la HR_i)

- Los coeficientes de Regresión Lineal Múltiple de la Temperatura Interior (a_i) y de la Humedad Relativa Interior (b_i), deben determinarse por la teoría de ajustes de mínimos cuadrados.

3.5.1.4. Ajuste por mínimos cuadrados para la obtención de las ecuaciones normales o ecuaciones de regresión lineal múltiple

Para determinar los coeficientes de Regresión Lineal Múltiple de la Temperatura Interior (a_i) y Humedad Relativa Interior (b_i), deben obtenerse a partir de las Ecuaciones Normales o Ecuaciones de Regresión desarrollados a partir de las Ecuaciones (II) y (III), aplicando la Teoría de Ajustes por mínimos cuadrados, por el Método directo (simplificado), resultando las siguientes 6 ecuaciones normales (o ecuaciones de regresión):

3.5.1.4.1. Ecuaciones normales para la temperatura interior:

$$Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 + a_3 \sum x_3 + a_4 \sum x_4 + a_5 \sum x_5 = \sum y_1 \quad (1)$$

$$a_0 \Sigma x_1 + a_1 \Sigma x_1^2 + a_2 \Sigma x_1 x_2 + a_3 \Sigma x_1 x_3 + a_4 \Sigma x_1 x_4 + a_5 \Sigma x_1 x_5 = \Sigma x_1 y_1 \quad (2)$$

$$a_0 \Sigma x_2 + a_1 \Sigma x_1 x_2 + a_2 \Sigma x_2^2 + a_3 \Sigma x_2 x_3 + a_4 \Sigma x_2 x_4 + a_5 \Sigma x_2 x_5 = \Sigma x_2 y_1 \quad (3)$$

$$a_0 \Sigma x_3 + a_1 \Sigma x_1 x_3 + a_2 \Sigma x_2 x_3 + a_3 \Sigma x_3^2 + a_4 \Sigma x_3 x_4 + a_5 \Sigma x_3 x_5 = \Sigma x_3 y_1 \quad (4)$$

$$a_0 \Sigma x_4 + a_1 \Sigma x_1 x_4 + a_2 \Sigma x_2 x_4 + a_3 \Sigma x_3 x_4 + a_4 \Sigma x_4^2 + a_5 \Sigma x_4 x_5 = \Sigma x_4 y_1 \quad (5)$$

$$a_0 \Sigma x_5 + a_1 \Sigma x_1 x_5 + a_2 \Sigma x_2 x_5 + a_3 \Sigma x_3 x_5 + a_4 \Sigma x_4 x_5 + a_5 \Sigma x_5^2 = \Sigma x_5 y_1 \quad (6)$$

3.5.1.4.2. Ecuaciones normales para la humedad relativa interior:

$$N b_0 + b_1 \Sigma x_1 + b_2 \Sigma x_2 + b_3 \Sigma x_3 + b_4 \Sigma x_4 + b_5 \Sigma x_5 = \Sigma y_2 \quad (1)$$

$$b_0 \Sigma x_1 + b_1 \Sigma x_1^2 + b_2 \Sigma x_1 x_2 + b_3 \Sigma x_1 x_3 + b_4 \Sigma x_1 x_4 + b_5 \Sigma x_1 x_5 = \Sigma x_1 y_2 \quad (2)$$

$$b_0 \Sigma x_2 + b_1 \Sigma x_1 x_2 + b_2 \Sigma x_2^2 + b_3 \Sigma x_2 x_3 + b_4 \Sigma x_2 x_4 + b_5 \Sigma x_2 x_5 = \Sigma x_2 y_2 \quad (3)$$

$$b_0 \Sigma x_3 + b_1 \Sigma x_1 x_3 + b_2 \Sigma x_2 x_3 + b_3 \Sigma x_3^2 + b_4 \Sigma x_3 x_4 + b_5 \Sigma x_3 x_5 = \Sigma x_3 y_2 \quad (4)$$

$$b_0 \Sigma x_4 + b_1 \Sigma x_1 x_4 + b_2 \Sigma x_2 x_4 + b_3 \Sigma x_3 x_4 + b_4 \Sigma x_4^2 + b_5 \Sigma x_4 x_5 = \Sigma x_4 y_2 \quad (5)$$

$$b_0 \Sigma x_5 + b_1 \Sigma x_1 x_5 + b_2 \Sigma x_2 x_5 + b_3 \Sigma x_3 x_5 + b_4 \Sigma x_4 x_5 + b_5 \Sigma x_5^2 = \Sigma x_5 y_2 \quad (6)$$

3.5.1.5. Representación matricial de las ecuaciones normales o de regresión lineal múltiple

Las representaciones de las Ecuaciones Normales en forma matricial para la temperatura interior (y_1) y la humedad relativa interior (y_2) en el interior del domo, están dados por:

3.5.1.5.1. Representación matricial para la temperatura interior del domo experimental (y_1)

$$\underbrace{\begin{bmatrix} N & \Sigma x_1 & \Sigma x_2 & \Sigma x_3 & \Sigma x_4 & \Sigma x_5 \\ \Sigma x_1 & \Sigma x_1^2 & \Sigma x_1 x_2 & \Sigma x_1 x_3 & \Sigma x_1 x_4 & \Sigma x_1 x_5 \\ \Sigma x_2 & \Sigma x_1 x_2 & \Sigma x_2^2 & \Sigma x_2 x_3 & \Sigma x_2 x_4 & \Sigma x_2 x_5 \\ \Sigma x_3 & \Sigma x_1 x_3 & \Sigma x_2 x_3 & \Sigma x_3^2 & \Sigma x_3 x_4 & \Sigma x_3 x_5 \\ \Sigma x_4 & \Sigma x_1 x_4 & \Sigma x_2 x_4 & \Sigma x_3 x_4 & \Sigma x_4^2 & \Sigma x_4 x_5 \\ \Sigma x_5 & \Sigma x_1 x_5 & \Sigma x_2 x_5 & \Sigma x_3 x_5 & \Sigma x_4 x_5 & \Sigma x_5^2 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \\ a_5 \end{bmatrix}}_{X_1} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Sigma y_1 \\ \Sigma x_1 y_1 \\ \Sigma x_2 y_1 \\ \Sigma x_3 y_1 \\ \Sigma x_4 y_1 \\ \Sigma x_5 y_1 \end{bmatrix}}_{b_1}$$

Entonces la representación de la ecuación matricial de la temperatura interior es de la forma:

$$A \cdot X_1 = b_1$$

Donde:

A: Matriz de Diseño o coeficientes.

b₁: Vector de observaciones de la temperatura interior

x₁ = a_i (i=0,1,2,...,5): vector de coeficientes de la temperatura interior del domo.

3.5.1.5.2. Representación matricial para la humedad relativa en el interior del domo experimental (y₂)

$$\underbrace{\begin{bmatrix} N & \Sigma x_1 & \Sigma x_2 & \Sigma x_3 & \Sigma x_4 & \Sigma x_5 \\ \Sigma x_1 & \Sigma x_1^2 & \Sigma x_1 x_2 & \Sigma x_1 x_3 & \Sigma x_1 x_4 & \Sigma x_1 x_5 \\ \Sigma x_2 & \Sigma x_1 x_2 & \Sigma x_2^2 & \Sigma x_2 x_3 & \Sigma x_2 x_4 & \Sigma x_2 x_5 \\ \Sigma x_3 & \Sigma x_1 x_3 & \Sigma x_2 x_3 & \Sigma x_3^2 & \Sigma x_3 x_4 & \Sigma x_3 x_5 \\ \Sigma x_4 & \Sigma x_1 x_4 & \Sigma x_2 x_4 & \Sigma x_3 x_4 & \Sigma x_4^2 & \Sigma x_4 x_5 \\ \Sigma x_5 & \Sigma x_1 x_5 & \Sigma x_2 x_5 & \Sigma x_3 x_5 & \Sigma x_4 x_5 & \Sigma x_5^2 \end{bmatrix}}_A \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \end{bmatrix}}_{X_2} = \underbrace{\begin{bmatrix} \Sigma y_2 \\ \Sigma x_1 y_2 \\ \Sigma x_2 y_2 \\ \Sigma x_3 y_2 \\ \Sigma x_4 y_2 \\ \Sigma x_5 y_2 \end{bmatrix}}_{b_2}$$

Entonces la representación de la ecuación matricial de la Humedad Relativa interior es de la forma:

$$A \cdot X_2 = b_2$$

Donde:

A : Matriz de diseño o coeficientes.

b₂ : Vector de observaciones de la humedad relativa interior

x₂ = b_i (i=0,1,2,...,5): vector de coeficientes de la humedad relativa interior del domo.

3.5.1.6. Cálculo de los parámetros o coeficientes de regresión lineal múltiple

3.5.1.6.1. Cálculo de los coeficientes de regresión lineal múltiple de la temperatura interior (a_i)

Resolviendo el sistema de las ecuaciones normales o la ecuación matricial para la temperatura interior (T_i), se tiene:

$$\boxed{X_1 = A^{-1} \times b_1 = a_i} \quad \text{para: } i = 0, 1, 2, \dots, 5$$

Donde:

A^{-1} : Es la inversa de la Matriz de coeficientes.

$X_1 = a_i$ ($i=1, 2, \dots, 5$): Es el vector de coeficientes de la temperatura interior obtenido.

Resolviendo con el programa MATLAB, se tiene:

$$A = [24 \ 56.29943255 \dots -7.86332498; 56.29943255 \\ 137.102661 \dots 2.57643168];$$

$$b_1 = [65.6381013 \ 157.225752 \dots -21.5186329];$$

$$X = A \setminus b_1$$

$$\boxed{\begin{array}{l} a_0 = 1.9547 \\ a_1 = 0.2794 \\ a_2 = -0.4611 \\ a_3 = 0.0013 \\ a_4 = 1.2587 \\ a_5 = 4.6771 \end{array}} \quad \dots \text{ (IV)}$$

3.5.1.6.2. Cálculo de los coeficientes de regresión lineal múltiple de la humedad relativa interior (b_i)

Resolviendo el sistema de las ecuaciones normales o la ecuación matricial para la humedad relativa interior (HR_i), se tiene:

$$\boxed{X_2 = A^{-1} \times b_2 = b_i} \quad \text{para: } i = 0, 1, 2, \dots, 5$$

Resolviendo con el programa MATLAB, se tiene:

$$X = A \setminus b_2$$

$$\boxed{\begin{array}{l} b_0 = 13.9256 \\ b_1 = 0.0827 \\ b_2 = 0.3636 \end{array}} \quad \dots \text{ (V)}$$

$$b_3 = -0.00925$$

$$b_4 = -0.0875$$

$$b_5 = 34.8354$$

3.5.1.7. Resultados de las ecuaciones de regresión lineal múltiple en variables codificadas para la temperatura (y_1) y humedad relativa (y_2) en el interior del domo experimental

Reemplazando los coeficientes de regresión obtenidos (IV) y (V) en las ecuaciones (II) y (III), se tiene las ecuaciones de Regresión Lineal Múltiple para la temperatura (y_1) y la humedad relativa (y_2) en el interior del domo experimental, definido por:

3.5.1.7.1. Ecuación de regresión lineal múltiple para la temperatura en el interior del domo experimental (y_1)

$$y_1 = 1.9547 + 0.2794x_1 - 0.4611x_2 + 0.00132x_3 + 1.2587x_4 + 4.6771x_5 \quad (\text{VI})$$

3.5.1.7.2. Ecuación de regresión lineal múltiple para la humedad relativa en el interior del domo experimental (y_2)

$$y_2 = 13.93 + 0.0827x_1 - 0.3636x_2 - 0.00925x_3 - 0.875x_4 + 34.8354x_5 \quad (\text{VII})$$

3.5.1.8. Resultados del modelamiento matemático en variables originales para la Temperatura (y_1) y humedad relativa (y_2) en el interior del domo experimental

El modelamiento matemático en términos de variables originales para la temperatura (T_i) y Humedad Relativa (HR_i) en el interior del domo experimental, son obtenidos reemplazando las ecuaciones de regresión (IV) y (V) en la ecuación original (I), resultando los modelamientos matemáticos que se indican a continuación:

3.5.1.8.1. Modelamiento matemático para la temperatura en el interior del domo experimental (T_i)

Como se tiene que la temperatura interior es de la forma:

$$T_i = K_1 \cdot T_{ex}^{a_1} \cdot HR_{ex}^{a_2} \cdot t^{a_3} \cdot T_{PCM}^{a_4} \cdot P_{atm}^{a_5}$$

Donde:

$$K_1 = e^{a_0} = e^{1.9547} = 7.0618 \cong 7.062 \cong 7.1$$

$$\Rightarrow T_i = K_1 \cdot T_{ex}^{0.2794} \cdot HR_{ex}^{-0.4611} \cdot t^{0.00132} \cdot T_{PCM}^{1.2587} \cdot P_{atm}^{4.6771}$$

$$\Rightarrow T_i = 7.1 \cdot \frac{T_{ex}^{0.2794} \cdot t^{0.00132} \cdot T_{PCM}^{1.2587} \cdot P_{atm}^{4.6771}}{HR_{ex}^{0.4611}} \quad (VIII)$$

Cuyas unidades de medida son:

[T_{ex}]: °C, [HR_e]: %, [t]: Hr, [T_{PCM}]: °C, [$P_{atm.}$]: bar

3.5.1.8.2. Modelamiento matemático para la humedad relativa en el interior del domo experimental (HR_i)

Como se tiene que la Humedad Relativa interior (HR_i) es de la forma:

$$HR_i = K_2 T_{ex}^{b_1} \cdot HR_{ex}^{b_2} \cdot t^{b_3} \cdot T_{PCM}^{b_4} \cdot P_{atm}^{b_5}$$

Donde:

$$K_2 = e^{b_0} = e^{13.9256} = 1116,377.91711 \cong 1116,377.92$$

$$\Rightarrow HR_i = 1116,377.92 T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_{ex}^{0.3636} \cdot t^{-0.00925} \cdot T_{PCM}^{-0.0875} \cdot P_{atm}^{34.8354}$$

$$\Rightarrow HR_i = \frac{1116,377.92 T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_{ex}^{0.3636} \cdot P_{atm}^{34.8354}}{t^{0.00925} \cdot T_{PCM}^{0.0875}} \quad (IX)$$

Cuyas unidades de medida son:

[T_{ex}]: °C, [t]: Hr, [T_{PCM}]: °C, [HR_e]: %, [$P_{atm.}$]: bar

3.5.2. Análisis estadístico del modelo de regresión múltiple de la temperatura (T_i) y humedad relativa (HR_i) en el interior del domo

3.5.2.1. Validación del modelo de regresión múltiple de la temperatura interior del domo (T_i)

En la tabla que se muestra a continuación se presentan los datos experimentales de la temperatura interior (T_i) y sus valores ajustados (\hat{T}_i), sus errores residuales (e_i), cuadráticos (e_i^2) y la diferencia de los errores sucesivos al cuadrado ($(e_i - e_{i-1})^2$); lo que nos permitió determinar la suma de los errores sucesivos al cuadrado (SSES) y la suma de los errores cuadráticos (SSE), cuyo cociente es el Durbin Watson (DW) que es el indicador de autocorrelación.

Tabla 28

Datos ajustados linealizados de la temperatura interior y sus parámetros estadísticos

AJUSTE INICIAL (Y1= 1.9547 + 0.2794 x1 - 0.4611 x2 + 0.0013 x3+ 1.2587x4 + 4.6771x5)										
x1 Normal	x2 Normal	x3 Normal	x4 Normal	x5 Normal	y1 Normal	y1 Formúla	e Errores	e2	e2-e1	(e2-e1)/e2
5.653333	57.070000	24	15.980000	0.722513	12.650000	12.75772023	0.107720	0.0116036		
5.213333	59.366667	1	15.683333	0.722417	11.886667	11.90508183	0.018415	0.0003391	-0.089305	0.007975455
5.103333	61.469000	2	15.380000	0.722320	11.380000	11.36627432	-0.013726	0.0001884	-0.0321405	0.001033012
5.090000	63.259333	3	15.070000	0.722310	10.896667	10.93003372	0.033367	0.0011133	0.047092391	0.002217693
5.176667	64.806000	4	14.753333	0.722417	10.613333	10.58490928	-0.028424	0.0008079	-0.06179044	0.003818058
5.206667	65.945667	5	14.616667	0.722840	10.370000	10.42617225	0.056172	0.0031553	0.084595973	0.007156479
5.293333	67.106000	6	14.180000	0.723330	10.196667	10.03540296	-0.161264	0.0260061	-0.21743629	0.047278542
6.833333	68.467667	7	13.973333	0.723757	10.556667	10.51377108	-0.042896	0.0018401	0.118368127	0.014011014
9.433333	67.687000	8	13.863333	0.724073	11.393333	11.47682534	0.083492	0.0069710	0.126388255	0.015973991
18.413333	60.740667	9	13.996667	0.723327	13.946667	14.65098851	0.704322	0.4960688	0.620829172	0.385428861
27.640000	43.162000	10	14.230000	0.721873	19.670000	19.4348785	-0.235122	0.0552821	-0.93944301	0.882553174
31.713333	33.462000	11	14.566667	0.720447	24.193333	23.1770043	-1.016329	1.0329240	-0.7812072	0.610284685
33.253333	27.175660	12	14.956667	0.719290	27.183300	26.52827813	-0.655022	0.4290537	0.361306826	0.130542623
32.376667	25.072333	13	15.413333	0.718133	28.483333	28.17182467	-0.311508	0.0970374	0.343513538	0.11800155
29.863333	21.982667	14	15.893333	0.717457	28.866667	30.2857238	1.419057	2.0137222	1.730565139	2.994855701
25.293333	23.231667	15	16.296667	0.717230	28.196667	29.04781338	0.851146	0.7244502	-0.56791042	0.32252225
17.860000	27.473333	16	16.540000	0.717450	24.946667	24.89247927	-0.054188	0.0029363	-0.90533411	0.819629854
15.003333	34.061333	17	16.720000	0.718153	22.020000	21.86834675	-0.151653	0.0229987	-0.09746552	0.009499527
11.903333	38.105667	18	16.843333	0.719067	19.973333	19.76495015	-0.208383	0.0434234	-0.0567296	0.003218248
9.446667	41.861000	19	16.803333	0.720063	18.133333	17.80602659	-0.327306	0.1071295	-0.11892356	0.014142812
8.436667	45.767000	20	16.763333	0.720827	16.833333	16.5906028	-0.242730	0.0589180	0.084576202	0.007153134
7.670000	49.176000	21	16.626667	0.721623	15.526667	15.54925742	0.022590	0.0005103	0.265320626	0.070395035
6.860000	52.093333	22	16.453333	0.722100	14.446667	14.53000269	0.083336	0.0069448	0.060745264	0.003689987
6.200000	54.813333	23	16.226667	0.722320	13.476667	13.57874165	0.102075	0.0104192	0.01873896	0.000351149
			y1=			17.32804623	SSE=	5.15384351	SSES=	6.471732833

$$y_1 = \frac{(7.1T_{ex}^{0.2794} * T^{0.0013} * T_{pcm}^{1.2587} * P_{atm}^{4.6771})}{(Hr_e^{0.1611})}$$

Fórmula de la temperatura interior

PARÁMETROS ESTADÍSTICOS		
DW=	$\sum(e_i - e_{i-1})^2 / \sum e_i^2$	1.2557
$s^2 =$	SSE/N-K	0.28632464
S =	$\sqrt{(SSE/N-K)}$	0.5351
cv =	S/y1 x100	3.1

Para la validación del modelo de la ecuación de regresión resultante en variables originales de la temperatura interior del domo, está determinado por:

$$T_i = 7.1 \frac{T_{ex}^{0.2794} \cdot t^{0.00132} \cdot T_{PCM}^{1.2587} \cdot P_{atm}^{4.6771}}{HR_{ex}^{0.4611}}$$

3.5.2.1.1. Desviación estándar normalizado de la temperatura interior

Se calcula la desviación o error estándar de la temperatura interior (y_1) respecto al subconjunto de variables independientes, mediante la ecuación:

$$S_{y_1/\bar{X}} = S_{[T_i/(T_{ex}, HR_e, t, T_{PCM}, P_{Atm})]} = \sqrt{\frac{SSE}{N-K}}$$

Donde:

SSE = 5.15384351 (Suma del cuadrado del error)

N = 24 (Número de datos)

K = 6 (Número de ecuaciones normales o número de coeficientes de la ecuación de regresión)

$y_1 = T_i$ (Temperatura interior del domo)

$\bar{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = (T_{ex}, HR_e, t, T_{PCM}, P_{Atm})$

Reemplazando valores, nos da por resultado la desviación o el error estándar:

$$S_{y_1/\bar{X}} = S_{[T_i/(T_{ex}, HR_e, t, T_{PCM}, P_{Atm})]} = \sqrt{\frac{5.15384351}{24-6}} = 0.535093113$$

Una buena medida del ajuste lineal es hallar la desviación estándar $S_{y_1/\bar{X}}$ normalizado para el rango de y_1 , determinado por:

$$\frac{S_{y_1/\bar{X}}}{\Delta y_1} = \frac{S_{y_1/X_1 \dots X_5}}{y_{1max} - y_{1min}} = \frac{0.535093113}{28.867 - 10.197}$$
$$\frac{S_{y_1/\bar{X}}}{\Delta y_1} = 0.0286606$$

La serie de dispersión será:

$\frac{S_{y_1/\bar{X}}}{\Delta y_1} = 0.0286606$
--

Por lo tanto:

Como esta serie normalizado de dispersión está cerca al ajuste estricto de 0.01, indica que tiene un bajo nivel de dispersión, lo que garantiza la validación del modelo.

Otros parámetros usados para evaluar la bondad de ajuste son: el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de correlación (r) y el Durbin Watson (DW) que se definen para la temperatura interior (y_1) como se indican a continuación:

3.5.2.1.2. Coeficiente de variación de la temperatura interior (CV₁)

$CV_1 = \frac{S_1}{\bar{y}_1} \times 100$

 [%]

Donde:

$S_1 = 0.535093113^\circ\text{C}$ (desviación estándar de la temperatura interior del domo)

$\bar{y}_1 = 17.326667^\circ\text{C}$ (valor promedio de la temperatura interior del domo)

Reemplazando valores, se tiene:

$$CV_1 = \frac{0.535093113}{17.326667} \times 100 = 3.08802$$

$$CV_1 = 3.1\%$$

Por tanto, como el coeficiente de variación es bajo ($CV < 10\%$), indica que el grado de dispersión de los datos es pequeño (no son dispersos), por lo que representa a una muestra que tiende a ser homogéneo (no tiene ruido).

3.5.2.1.3. Coeficiente de correlación de la temperatura interior (r_1)

Está definido por la ecuación:

$$r_1 = \sqrt{\frac{S_B - SSE}{S_B}}$$

Donde: $SB = \sum (y_i - \bar{y}_1)^2$

Siendo:

$S_B = 1016.631275$ (es una medida de la dispersión de los datos de la temperatura interior y_i , en torno a su valor promedio \bar{y}_1)

$\bar{y}_1 = 17.32804623$ (valor promedio de la temperatura interior)

$SSE = 5.15384351$ (suma del cuadrado del error)

$y_1 = y_{11}, y_{12}, \dots, y_{1,24}$ (Valores calculados de la temperatura interior con la fórmula de ajuste)

Reemplazando valores, se tiene:

$$S_B = \sum (y_1 - \bar{y}_1)^2 = 1016.631275$$

El coeficiente de correlación (r_2), para temperatura interior, se rá:

$$r_1 = \sqrt{\frac{1016.631275 - 5.1538435}{1016.631275}} = \sqrt{0.994930469}$$

$$r_1 = 0.99746201$$

Por tanto, tiene un coeficiente de correlación alto que garantiza la bondad del modelo.

3.5.2.1.4. Auto correlación por Durbin Watson para la temperatura interior (DW1)

El Durbin Watson está determinado por la ecuación:

$$DW1 = \frac{SSES}{SSE} = \frac{\sum (e_i - e_{i-1})^2}{\sum e_i^2}$$

Donde:

SSES = 6.471732833 (Suma al cuadrado de la diferencia de los errores sucesivos).

SSE = 5.15384351 (Suma del cuadrado de los errores)

Reemplazando valores, se tiene:

$$DW1 = \frac{SSES}{SSE} = \frac{6.471732833}{5.15384351}$$

$$DW1 = 1.25571 = 1.26$$

Este valor es tan bajo tiende a subir a 2 por lo que no tiene problema de auto relación.

Conclusión: El modelo generado reproduce con mucha precisión los resultados experimentales de la temperatura interior del domo. Así mismo al correlacionar el error (e_i) entre el valor de la temperatura interior experimental (y_i) y el calculado (ajustado), se observa una tendencia aleatoria, lo cual confirma la bondad del modelo generado, así mismo lo confirman la desviación estándar normalizado ($S_{y_i/\bar{x}}$), coeficiente de variación (CV1), el coeficiente de correlación ($r1$) y la auto correlación por Durbin Watson (DW1), calculado para la temperatura interior del domo (T_i).

En el anexo se presenta un gráfico de la variación de la temperatura interior (T_i) del domo como promedio trimestral para los meses de friaje durante las 24 horas, según la variación registrada de los parámetros ambientales (T_{ex} , HR_e ,

P_{Atm}) y la temperatura del acumulador de energía PCM23 (T_{PCM}). En la gráfica se muestra también con fines comparativos la temperatura (T_{ex}) y la temperatura del acumulador PCM23 (T_{PCM}).

3.5.2.2. Validación del modelo de regresión múltiple de la humedad relativa en el interior del domo experimental (HR_i)

En la tabla se presenta a continuación los datos experimentales (HR_i) y sus valores ajustados (\hat{HR}_i), sus errores residuales (e_i), cuadráticos (e_i^2) y la diferencia de los errores sucesivos al cuadrado ($e_i - e_{i-1}$)²; lo que nos permitió determinar la suma de los errores sucesivos al cuadrado (SSES) y la suma de los errores cuadráticos (SSE), cuyo cociente entre estos 2 últimos es el Durbin Watson (DW), que es el indicador de autocorrelación de la Humedad Relativa interior del domo.

Tabla 29

Datos ajustados linealizados de la humedad relativa interior y sus parámetros estadísticos

AJUSTE INICIAL ($Y_2=13.9256 + 0.0827 x_1 - 0.3636 x_2 - 0.0092 x_3 - 0.0875 x_4 + 34.8354$)											
x1 Normal	x2 Normal	x3 Normal	x4 Normal	x5 Normal	y2 Normal	y2 Formula	e Errores	e2	e2-e1	(e2-e1)^2	$S_B = \sum (y_i - \bar{y}_i)$
5.653333	57.070000	24	15.980000	0.722513	51.370000	51.69852083	0.328521	0.1079259			
5.213333	59.366667	1	15.683333	0.722417	52.452333	53.48080685	1.028474	1.0577585	0.699953	0.489934229634	
5.103333	61.469000	2	15.380000	0.722320	53.485000	53.56344201	0.078442	0.0061531	-0.950032	0.902560489087	
5.090000	63.259333	3	15.070000	0.722310	54.781667	53.98241791	-0.799249	0.6387991	-0.877691	0.770341673466	
5.176667	64.806000	4	14.753333	0.722417	56.142333	54.77364614	-1.368687	1.8733037	-0.569438	0.324259376800	
5.206667	65.945667	5	14.616667	0.722840	57.372333	56.21470872	-1.157624	1.3400940	0.211063	0.044547412808	
5.293333	67.106000	6	14.180000	0.723330	58.490667	58.05950743	-0.431160	0.1858986	0.726465	0.527750986401	
6.833333	68.467667	7	13.973333	0.723757	59.866000	60.96596702	1.099967	1.2099275	1.531127	2.344348628679	
9.433333	67.687000	8	13.863333	0.724073	60.982667	63.274441014	2.291743	5.2520866	1.191776	1.420330312228	
18.413333	60.740667	9	13.996667	0.723327	60.516000	61.90444849	1.388448	1.9277892	-0.903295	0.815941231430	
27.640000	43.162000	10	14.230000	0.721873	54.402667	52.58588965	-1.816777	3.3006799	-3.205226	10.273472630440	
31.713333	33.462000	11	14.566667	0.720447	45.619667	45.12593251	-0.493734	0.2437737	1.323043	1.750442407526	
33.253333	27.175660	12	14.956667	0.719290	40.123000	39.59157353	-0.531426	0.2824141	-0.037692	0.001420685729	
32.376667	25.072333	13	15.413333	0.718133	36.582333	36.14972824	-0.432605	0.1871469	0.098822	0.009765729998	
29.863333	21.982667	14	15.893333	0.717457	33.083667	33.01616389	-0.067503	0.0045567	0.365102	0.133299219240	
25.293333	23.231667	15	16.296667	0.717230	31.723000	32.7696826	1.046683	1.0955445	1.114186	1.241409787573	
17.860000	27.473333	16	16.540000	0.717450	33.272000	34.14085031	0.868850	0.7549009	-0.177832	0.031624323403	
15.003333	34.061333	17	16.720000	0.718153	36.958333	37.59412176	0.635789	0.4042273	-0.233062	0.054317685495	
11.903333	38.105667	18	16.843333	0.719067	40.453000	40.11060172	-0.342398	0.1172366	-0.978187	0.956849878101	
9.446667	41.861000	19	16.803333	0.720063	44.052333	42.71833082	-1.334002	1.7795618	-0.991604	0.983278306846	
8.436667	45.767000	20	16.763333	0.720827	46.452333	45.34913828	-1.103195	1.2170386	0.230807	0.053272083225	
7.670000	49.176000	21	16.626667	0.721623	48.309333	48.00708742	-0.302246	0.0913524	0.800949	0.641519536498	
6.860000	52.093333	22	16.453333	0.722100	49.106333	49.72865092	0.622318	0.3872796	0.924563	0.854817663014	
6.200000	54.813333	23	16.226667	0.722320	50.194000	50.81226987	0.618270	0.3822576	-0.004048	0.000016386732	
					y2=	48.150746	SSE=	23.8477068	SSSES=	24.62552066	

$$\begin{aligned}
 1) \quad & SSE = \sum e_i^2 = 23.8477068 \\
 2) \quad & SSES = 24.62552066 \\
 3) \quad & DW = \frac{\sum(e_i - e_{i-1})^2}{\sum e_i^2} = \frac{SSES}{SSE} = \frac{24.62552066}{23.8477068} = 1.032615877 \cong 1.033 \\
 4) \quad & \sigma^2 = MCE = \frac{SSE}{N-K} = \frac{23.8477068}{24-6} = 1.3248726 \\
 5) \quad & s = \sigma = \sqrt{1.3248726} = 1.151 \qquad 7) \qquad S_B = \sum(y_i - \bar{y}_1)^2 = 24825.48 \\
 6) \quad & cv = \frac{s}{\bar{y}_2} \times 100 = \frac{1.51 \times 100}{48.150746} = 2.39 \quad 8) \quad r_2 = \sqrt{\frac{S_B - SSE}{S_B}} = 0.99952
 \end{aligned}$$

Para la validación del modelo de la ecuación de Regresión resultante en variables originales de la Humedad Relativa en el interior del domo, determinado por:

$$HR_i = 1'116,377.92 \frac{T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_{ex}^{0.3636} \cdot P_{atm}^{34.8354}}{t^{0.00925} \cdot T_{PCM}^{0.0875}} \qquad (\beta)$$

3.5.2.2.1. Desviación estándar normalizado de la humedad relativa

Se calcula la desviación estándar de la humedad relativa (y_2) respecto al subconjunto de variables independientes (\bar{x}) mediante la ecuación:

$$S_{(y_2/\bar{x})} = S_{[HR_i/(T_{ex}, HR_e, t, T_{PCM}, P_{Atm})]} = \sqrt{\frac{SSE}{N-K}}$$

Donde:

SSE = 23.8477068..... (Suma del cuadrado del error)

N = 24 (Número de datos)

K = 6 (Número de coeficientes de la ecuación de regresión)

$\bar{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = (T_{ex}, HR_e, t, T_{PCM}, P_{Atm})$ Variables independientes

$y_2 = HR_i$ (Humedad relativa en el interior del domo)

Reemplazando valores, tenemos la desviación estándar de la Humedad Relativa Interior del domo:

$$S_{(y_2/\bar{x})} = S_{[HR_i/(T_{ex}, HR_{e,t}, T_{PCM}, P_{Atm})]} = \sqrt{\frac{23.8477068}{24-6}} = 1.151031$$

Una buena medida del ajuste lineal es hallar la desviación estándar $S_{(y_2/\bar{x})}$ normalizado para el rango de y_2 , determinado por:

$$\frac{S_{(y_2/\bar{x})}}{\Delta y_2} = \frac{S_{[y_2/(X_1, X_2, \dots, X_5)]}}{y_{2max} - y_{2min}} = \frac{1.1510311}{(63.27441014 - 31.7230)}$$

La serie de dispersión normalizada será:

$$\frac{S_{(y_2/\bar{x})}}{\Delta y_2} = 0.03648$$

Por lo tanto, como esta serie normalizado de dispersión está cerca al ajuste estricto de 0.01, indica que tiene un bajo nivel de dispersión, lo que garantiza la validación del modelo.

Otros parámetros usados para evaluar la bondad del ajuste son: el coeficiente de variación (CV), el coeficiente de correlación (r) y el Durbin Watson (DW), las mismas que se definen a continuación:

3.5.2.2.2. Coeficiente de variación de la humedad relativa interior del domo (CV₂)

Está definido por la ecuación:

$$CV_2 = \frac{S_2}{\bar{y}_2} \times 100 \text{ [%]}$$

Donde:

$S_2 = 1.1510311$(desviación estándar de la humedad relativa interior del domo)

$\bar{y}_2 = 48.150746$(valor promedio de la humedad relativa interior del domo)

Reemplazando estos valores en la ecuación, se tiene:

$$CV_2 = \frac{1.1510311}{48.150746} \times 100 = 2.3904741$$

$$CV_2 = 2.39\%$$

Por tanto. - Como el coeficiente de variación es bajo ($CV_2 < 10\%$), indica que el grado de dispersión de los datos es pequeño (los datos de la humedad relativa no son dispersos), por lo que representa una muestra que tiende a ser homogénea (sin ruido).

3.5.2.2.3. Coeficiente de correlación de la humedad relativa interior del domo (r_2)

Está definido por la ecuación:

$$r_2 = \sqrt{\frac{S_B - SSE}{S_B}} \quad \text{Donde: } S_B = \sum_{i=1}^{24} (y_2 - \bar{y}_2)^2$$

Siendo:

$$S_B = \sum_{i=1}^{24} (y_2 - \bar{y}_2)^2 = 24825.480729 \dots \text{ (Es una medida de la dispersión de los$$

datos de la humedad relativa interior y_2 , respecto a su valor promedio \bar{y}_2)

$$\bar{y}_2 = 48.150746 \quad \text{(valor promedio de la humedad relativa interior)}$$

$$SSE = 23.8477068 \dots \text{ (suma del cuadrado del error)}$$

$y_2 = y_{21}, y_{22}, \dots, y_{2,24}$ (Valores calculados de la humedad relativa interior con la fórmula de ajuste)

El coeficiente de correlación (r_2), para la humedad relativa interior, será:

$$r_2 = \sqrt{\frac{24825.4807298 - 23.8477068}{24825.4807298}}$$

$$r_2 = 0.99951958$$

3.5.2.2.4. Auto correlación por Durbin Watson para la humedad relativa (DW2)

Está definido por la ecuación:

$$DW2 = \frac{SSES}{SSE} = \frac{\sum (e_i - e_{i-1})^2}{\sum e_i^2}$$

Donde:

$SSES = 24.62552066$ (suma al cuadrado de la diferencia de los errores sucesivos)

$SSE = 23.847706$ (suma al cuadrado de los errores)

Reemplazando valores, se tiene:

$$DW2 = \frac{24.62552066}{23.8477068} = 13.032615877 \cong 1.033$$

Por lo tanto: Este valor es relativamente bajo, por lo que debe verificarse la existencia de auto correlación. El DW_2 podrá mejorarse bajo un modelo de Regresión Lineal alternativo, de modo que su valor alcance cerca de 2.

Conclusión. - Se concluye que el modelo generado reproduce con mucha precisión los resultados experimentales de la Humedad Relativa interior del domo. El error residual (e_i) obtenido entre el valor de la humedad relativa interior experimental (HR_i) y el calculado (ajustado) HR_i , tiene una tendencia aleatoria, lo cual valida la bondad del modelo generado, como lo confirman: la desviación estándar normalizado ($S_2/\Delta y_2$), el coeficiente de variación (CV2), el coeficiente de correlación (r_2) y el Durbin Watson (DW2), calculados para la humedad relativa interior del domo (HR_i).

En el anexo se presenta un gráfico de la variación de la humedad relativa interior del domo (HR_i) como promedio trimestral para los 3 meses de friaje, durante las 24 horas, según la variación registrada de los parámetros ambientales (T_{ex} , HR_e , P_{atm}) y temperatura de la acumulador de energía PCM23 (T_{PCM}). En la gráfica se muestra

también con fines comparativos la humedad relativa exterior (HR_e), y la humedad relativa del acumulador (HR_{PCM}).

3.5.3. Prueba de hipótesis de la bondad del modelo de regresión linealizado para la temperatura y humedad relativa interior del domo

Para evaluar la bondad del modelo de regresión lineal múltiple, consiste en determinar mediante las pruebas estadísticas, si el modelo generado representa adecuadamente los datos que le dieron origen (Prueba F de significación grupal) y si cada uno de los coeficientes del modelo de regresión es necesario (Prueba t de significación individual). La prueba de hipótesis requiere que los términos del error ε_i del modelo de regresión tengan una distribución normal e independiente con media cero y varianza σ^2 .

Para realizar la prueba de hipótesis, se determina previamente el modelo matemático propuesto según el diseño planteado y su correspondiente modelo de regresión estadístico a ser probado, las mismas que se detallan a continuación.

Modelo matemático linealizado

Para validar si el modelo de regresión lineal propuesta se ajusta apropiadamente a los datos experimentales, se propone validar el modelo matemático Linealizado para la temperatura interior del domo (y_1) y la humedad relativa interior del domo (y_2) obtenido en la ecuación (VI) y (VII), que son de la forma:

$$y_i = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5$$

Cuyo modelo de regresión estadístico a ser probado es de la forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \varepsilon_i$$

Dónde:

$i = 1$ (para la temperatura interior: T_i)

$i = 2$ (para la humedad relativa interior: HR_i)

3.5.4. Prueba de hipótesis de significación de la regresión o prueba f de significación grupal de la temperatura interior

La prueba de la significación de la regresión, nos sirve para determinar si existe una relación lineal entre la variable respuesta (y_1) y el subconjunto de variables regresoras: x_1, x_2, \dots, x_5 .

3.5.4.1. Modelo de regresión de la temperatura interior (y_1)

El modelo completo de la temperatura interior linealizada es:

$$y_i = 1.9547 + 0.2794x_1 + 0.4611x_2 + 0.00132x_3 + 1.2587x_4 + 4.6771x_5$$

Este modelo es la forma:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5$$

3.5.4.2. Hipótesis planteada

H_0 : Hipótesis nula : $\beta_i = 0$ ($\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_5 = 0$): Regresión No es significativa

H_a : Hipótesis alterna : $\beta_i \neq 0$ (para al menos una i): Regresión es significativa

3.5.4.3. Nivel de significancia: $\alpha = 0.05$ (95% de confianza)

3.5.4.4. Criterios: se rechaza H_0 , si: $F_{exp_1} > F_{crit} = F_{Tablas}$

Siendo: $F_{crit} = F(\alpha, Dfe, Dfr) = F(\alpha, N-K, K-1) = F(0.05, 18.5) = 4.58$

$N = 24$ (número de datos totales)

$K = 6$ (número de coeficientes del modelo)

$Dfe = N - K = 18$... (grado de libertad del error)

$Dfr = K - 1 = 5$ (grado de libertad de la regresión)

El rechazo de la hipótesis nula H_0 , significa que F_{exp} excede a $F_{crit} = 5.58$, que implica que al menos uno de los regresores: X_1, X_2, \dots, X_5 , contribuye de manera significativa al modelo. De manera alternativa podría usarse el enfoque del valor de “P” (probabilidad) para la prueba de hipótesis. Por lo tanto, rechazar H_0 implica que el valor de (P) es menor que (α) que en este caso es 0.05.

Por lo general la prueba se resume en una tabla del análisis de varianza (ANOVA), que se indica a continuación:

3.5.4.5. Cálculos

Tabla 30

Análisis de varianza del modelo completo de la temperatura interior

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO COMPLETO DE LA TEMPERATURA INTERIOR DEL DOMO (T_i)				
Fuentes de Variación (FV)	Grado de Libertad (GL)	Suma de Cuadrados (SC)	Media de Cuadrados (MC)	$F_{Experimental}$ (F_{exp})
X_1	1	0.073978	0.073978	139.29
X_2	1	0.016950	0.016950	31.91
X_3	1	0.000013	0.000013	0.03
X_4	1	0.030988	0.030988	58.35
X_5	1	0.000181	0.000181	0.34
ERROR	18	0.00956	0.000531	
TOTAL	23	3.17403		

FV	GL	SC	MC	F_{exp}
REGRESIÓN	5	3.16447	0.632894	1191.67
ERROR	18	0.00956	0.000531	
TOTAL	23	3.17403	0.1380013	

Se cumple: $F_{exp} = \underline{1191.67} > F_{crit} = \underline{4.58}$

Por tanto: Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternante, que significa que el conjunto grupal de las variables independientes: X_1, X_2, \dots, X_5 influye significativamente con un 95% de confianza en la temperatura interior del domo (y_1) concluyéndose que la regresión es significativa.

ESTADÍSTICA DE REGRESIÓN

PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO LINEALIZADO DE LA TEMPERATURA INTERIOR DEL DOMO (T_i)

- Coeficiente de determinación: $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSe}{SST} = \underline{0.997}$
- R^2 ajustado = $1 - \frac{MCE}{MCT} = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{(n-P)} = \underline{0.996}$ ($n=24, p=6$)
- Coeficiente de correlación múltiple: $r = \sqrt{R^2} = \underline{0.998}$
- Error típico o desviación estándar (S) = $\sqrt{MCE} = \underline{0.023}$
- Media del Error Absoluto (mea) (mea) = $\frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} = \frac{0.0978}{24} = \underline{0.0041}$
- Durbin Watson (DW) = $\frac{\sum_{i=2}^{24} (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{24} (e_i)^2} = \frac{0.01316448}{0.0096} = \underline{1.3713}$

3.5.4.6. Decisión: significancia del modelo generado, según la prueba F grupal

Del modelo de regresión lineal generado, se determinó la significancia del conjunto de regresores mediante el ANOVA, en la que se cumple que: $F_{exp} = 1191.67 > F_{crit} = 4.58$, que significa que se rechaza la hipótesis nula, lo cual indica que el conjunto de regresores del modelo generado representa satisfactoriamente los datos que le dieron origen con una probabilidad o confianza del 95%.

De la estadística de regresión, se puede indicar que el coeficiente de correlación es alto, esto indica que el 99.8% de los datos son explicados por el modelo propuesto y solo los restantes 0.2% incrementaron el error. Por otro lado, la desviación estándar obtenida del modelo propuesto es bastante bajo de solo 0.023. El Durbin Watson (DW) calculado es de 1.3, que indica que no hay problema de autocorrelación serial en los residuos con un nivel de significancia del 95%.

3.5.4.7. Conclusión de la prueba “F” grupal

A partir de los 24 ensayos experimentales obtenidos para la temperatura interior (y_1) como promedio mensual trimestral durante las 24 horas para los 3 meses de friaje, se ha podido determinar el modelo matemático en variables originales como se indica en la ecuación (α), el cual ha sido linealizado para el sistema en estudio, el cual comprende 6 coeficientes involucrando a 5 variables independientes. El modelo matemático linealizado completo que ha verificado estadísticamente su regresión como significativa, mediante la prueba F grupal es: hallado en variable codificada con términos significativos (nivel de confianza del 95%) está dado para la temperatura interior del domo (Y_1) por la siguiente ecuación que representa a un plano.

$$y_1 = 1.9547 + 0.2794X_1 - 0.4611X_2 + 0.00132X_3 + 1.2587X_4 + 4.6771X_5$$

Si bien la prueba individual de c/u de las variables se realiza mediante la Prueba t-student, también con la prueba F-Fisher se puede analizar para cada variable, de modo que cumpla que $F_{exp} > F_{crit}$.

Del ANOVA para el modelo completo, analizando cada una de las Variables independientes mediante la prueba “F” individual, son significativos las variables: X_1 , X_2 y X_4 que corresponden a la temperatura ambiental exterior (T_{ex}), Humedad Relativa ambiental exterior (HR_{ex}) y la temperatura del acumulador PCM23 (T_{PCM}), las cuales influyen significativamente en la temperatura interior del domo (y_1), resultando el modelo matemático linealizado simplificado con un nivel de confianza del 95%.

$$y_1 = 0.2531 + 0.2867X_1 - 0.4158X_2 + 1.2532X_4$$

En variables naturales el modelo matemático linealizado simplificado de la temperatura interior del domo (T_i) viene expresado por la ecuación:

$$T_i = 0.2531 + 0.2867T_{Ex} - 0.4158HR_e + 1.2532T_{PCM}$$

El modelo matemático simplificado en variables originales para la temperatura interior del domo (T_i), está dado por la ecuación:

$$T_i = 1.288 \frac{T_{ex}^{0.2867} \cdot T_{PCM}^{1.2532}}{HR_{ex}^{0.4158}}$$

Como la temperatura del acumulador se mantiene casi constante debido al calor latente (cambio de fase sólido-líquido) con un promedio diario, mensual trimestral de:

$$T_{PCM} = 15.492917^{\circ}\text{C}$$

Reemplazando en la ecuación anterior, se tiene finalmente el Modelo Matemático simplificado, de la forma:

$$T_i = 39.94 \frac{T_{ex}^{0.2867}}{HR_e^{0.4158}}$$

Este resultado puede ser analizado del comportamiento y su gráfica.

3.5.5. Prueba de hipótesis de los coeficientes de regresión individual linealizada de la temperatura interior del domo (T_i)

3.5.5.1. Prueba “t” de student de significación de los coeficientes de regresión individual

Mide la significancia individual de cada uno de los regresores del modelo estadístico (mide la significancia individual de cada variable independiente o dependiente), cuyas hipótesis apropiadas son:

$$H_0 : \text{Hipótesis nula} \quad : \beta_i = 0$$

$$H_a : \text{Hipótesis alterna} \quad : \beta_i \neq 0$$

3.5.5.2. Nivel de Significancia:

$$\alpha = 0.05 \text{ (95\% de nivel de confianza)}$$

3.5.5.3. Criterios:

$$\text{Se rechaza } H_0 \text{ si: } t_j > t_{\text{crit}} = t_{\text{Tablas}}$$

Siendo: $t_{crit} = t(\alpha/2, N-K) = t(0.025, 18) = 2.101$

$N = 24$ (número de datos totales)

$K = 6$ (número de coeficientes del modelo)

3.5.5.4. Cálculos:

3.5.5.4.1. Cálculo del estimador de varianza (σ^2)

El estimador de varianza (σ^2) está dado por la fórmula matemática:

$$\sigma^2 = MCE = \frac{SSE}{N - K}$$

Donde:

$SSE = 0.0096$ (Suma al cuadrado del error)

$N = 24$ (Número de datos totales)

$K = 6$ (Número de coeficientes del modelo de regresión)

Reemplazando valores, se tiene el estimador de varianza (σ^2)

$$\sigma^2 = MCE = \frac{0.0096}{18} = 0.00053333$$

3.5.5.4.2. Cálculo de la matriz simétrica (C)

La matriz simétrica (C) está determinada por la fórmula matemática:

$$C = (X'X)^{-1}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_{00} & C_{01} & C_{02} & C_{03} & C_{04} & C_{05} & C_{06} \\ C_{10} & C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{20} & C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{30} & C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{40} & C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{50} & C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{60} & C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix}$$

$$C = 10^5 \times \begin{bmatrix} 0.1475 & -0.0005 & -0.0040 & -0.0001 & 0.0014 & 0.4119 \\ -0.0005 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0000 & -0.0009 \\ -0.0040 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0103 \\ -0.0001 & -0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & -0.0004 \\ 0.0014 & 0.0000 & 0.0000 & -0.0000 & 0.0005 & 0.0092 \\ 0.4119 & -0.0009 & -0.0103 & -0.0004 & 0.0092 & 1.2075 \end{bmatrix}$$

Los elementos de la diagonal principal de la matriz “C”, corresponde a los coeficientes de la ecuación de Regresión B_i ; $i = 0, \dots, 5$.

Según los siguientes resultados:

$$\begin{aligned} C_{00} &= C(1,1) = 1.4746 \times 10^4 \\ C_{11} &= C(2,2) = 1.0551 \\ C_{22} &= C(3,3) = 12.5429 \\ C_{33} &= C(4,4) = 0.1308 \\ C_{44} &= C(5,5) = 51.1274 \\ C_{55} &= C(6,6) = 1.2075 \times 10^5 \end{aligned}$$

3.5.5.4.3. Cálculo de t-student (t_i)

El t-student de cada coeficiente se calcula como:

$$t_0 = \frac{\beta_0}{\sqrt{\sigma^2 C_{00}}} = \frac{1.95}{\sqrt{(0.000531)(1.4746)(10^4)}} = 0.6968 \cong 0.7$$

$$t_1 = \frac{\beta_1}{\sqrt{\sigma^2 C_{11}}} = \frac{0.2794}{\sqrt{(0.000531)(1.0551)}} = 11.8$$

$$t_2 = \frac{\beta_2}{\sqrt{\sigma^2 C_{22}}} = \frac{-0.4611}{\sqrt{(0.000531)(12.5429)}} = -5.65$$

$$t_3 = \frac{\beta_3}{\sqrt{\sigma^2 C_{33}}} = \frac{0.00132}{\sqrt{(0.000531)(0.1308)}} = 0.1588 \cong 0.16$$

$$t_4 = \frac{\beta_4}{\sqrt{\sigma^2 C_{44}}} = \frac{1.259}{\sqrt{(0.000531)(51.1274)}} = 7.64$$

$$t_5 = \frac{\beta_5}{\sqrt{\sigma^2 C_{55}}} = \frac{4.68}{\sqrt{(0.000531)(1.2075)(10^5)}} = 0.58$$

3.5.5.5. Decisión de significancia del modelo según la prueba “t” individual

Los valores calculados de (t_j) se comparan con el valor de $t_{crit} = 2.101$, para hallar su significancia. Los coeficientes de regresión que tengan un valor de “t” de student menor que 2.101 no son estadísticamente significativos, es decir si:

$$t_j > t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{Se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{SÍ es significativo.}$$
$$t_j < t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{No se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{No es significativo.}$$

Según esto, se indica lo siguiente:

$$t_0 = 0.7 < t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{No se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{No es significativo.}$$
$$t_1 = 11.8 > t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{Se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{SÍ es significativo.}$$
$$t_2 = |-5.65| > t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{Se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{SÍ es significativo.}$$
$$t_3 = 7.64 < t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{No se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{No es significativo.}$$
$$t_4 = 7.64 > t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{Se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{SÍ es significativo.}$$
$$t_5 = 0.58 < t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{No se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{No es significativo.}$$

3.5.5.6. Conclusión de la prueba “t” individual

Se rechaza la hipótesis nula para los coeficientes de las variables X_1 , X_2 y X_4 , que corresponden a la temperatura exterior (T_{ex}), la humedad relativa exterior (HR_e) y la temperatura del acumulado PCM23 (T_{PCM}), los cuales influyen significativamente en la temperatura interior del domo (T_i) con un nivel de confianza del 95%. Resultando el modelo matemático simplificado con las variables significativas igual a:

$$y_1 = 0.2531 + 0.2867X_1 - 0.4158X_2 + 1.2532X_4$$

Que en variables naturales se puede expresar como:

$$T_i = 0.2531 + 0.2867T_{Ex} - 0.4158HR_e + 1.2532T_{PCM}$$

En variables originales corresponde a la ecuación:

$$T_i = 1.288 \frac{T_{ex}^{0.2867} \cdot T_{PCM}^{1.2532}}{HR_{ex}^{0.4158}}$$

Como la temperatura del Acumulador PCM23, se mantiene aproximadamente constante con un valor promedio diario, mensual trimestral de $T_{PCM} = 15.492917^\circ\text{C}$.

Reemplazando en la ecuación anterior, se tiene finalmente el modelo matemático, simplificado de la forma:

$$T_i = \frac{1.288 \times T_{ex}^{0.2867} \cdot (15.492917)^{1.2532}}{HR_{ex}^{0.4158}} = 39.94 \frac{T_{ex}^{0.2867}}{HR_{ex}^{0.4158}}$$

3.5.6. Prueba de hipótesis de coeficientes de regresión linealizado de la humedad relativa interior del domo (HR_i)

En forma similar para el caso de temperatura interior se realiza las pruebas de significación grupal e individual para la humedad relativa interior (HR_i), resultando en forma resumida las pruebas de significancia que se indican a continuación.

3.5.6.1. Prueba de hipótesis de regresión o prueba f de significación grupal de la humedad relativa

3.5.6.1.1. Modelo de regresión de la humedad relativa interior

El modelo completo de la Humedad Relativa interior linealizado es:

$$y_2 = 13.93 + 0.0827X_1 + 0.3636X_2 + 0.00925X_3 - 0.875X_4 + 34.8354X_5$$

Es de la forma:

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1X_1 + \beta_2X_2 + \beta_3X_3 + \beta_4X_4 + \beta_5X_5$$

3.5.6.1.2. Hipótesis planteada

$H_0 : \beta_i = 0 (\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_5)$: Regresión No significativa

$H_a : \beta_i \neq 0$ (para algún i): Regresión significativa

3.5.6.1.3. Nivel de Significancia:

$\alpha = 0.05$ (95% de nivel de confianza)

3.5.6.1.4. Criterio para la prueba G-grupal

Se rechaza H_0 , si: $F_{exp_i} > F_{crit} = F_{Tablas} = F(\alpha, Dfe, Dfr)$

$$F_{crit} = F(\alpha, N - K, K - 1) = F(0.05, 24 - 6, 6 - 1) = 4.58$$

18 5

3.5.6.1.5. Cálculos:

Tabla 31

Análisis de varianza para el modelo completo de la humedad relativa interior

ANÁLISIS DE VARIANZA PARA EL MODELO COMPLETO DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR DEL DOMO				
Fuentes de Variación (FV)	Grado de Libertad (GL)	Suma de Cuadrados (SC)	Media de Cuadrados (MC)	$F_{Experimental}$ (F_{exp})
X ₁	1	0.0006486	0.0006486	12.33
X ₂	1	0.010540	0.010540	20.03
X ₃	1	0.000653	0.000653	1.24
X ₄	1	0.000150	0.000150	0.28
X ₅	1	0.010048	0.010048	19.10
ERROR	18	0.009470	0.000526	-
TOTAL	23	0.967823	0.042079	-

FV	GL	SC	MC	F_{exp}
REGRESIÓN	5	0.958353	0.191671	364.32
ERROR	18	0.009470	0.000526	
TOTAL	23	0.967823	0.042079	

Se cumple: $F_{exp} = 364.32 > F_{crit} = 4.58$

Por tanto: Se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se acepta la hipótesis alternante (H_a), que significa que el conjunto grupal de las variables independientes: X_1, X_2, \dots, X_5 influye significativamente con un 95% de confianza en la humedad relativa interior del domo (y_2) concluyéndose que la regresión es significativa.

ESTADÍSTICA DE REGRESIÓN

PARÁMETROS DE REGRESIÓN DEL MODELO LINEALIZADO DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR DEL DOMO (HR_i)

- Coeficiente de determinación: $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSe}{SST} = \underline{0.9902}$
- R^2 ajustado = $1 - \frac{MCE}{MCT} = 1 - \frac{(n-1)(1-R^2)}{(n-P)} = \underline{0.988}$ ($n=24, p=6$)
- Coeficiente de correlación múltiple: $r = \sqrt{R^2} = \underline{0.9951}$
- Error típico o desviación estándar (S) = $\sqrt{MCE} = \underline{0.02293}$
- Media del Error Absoluto (mea) (mea) = $\frac{\sum_{i=1}^n e_i}{n} = \frac{0.0973}{24} = \underline{0.0041}$
- Durbin Watson (DW) = $\frac{\sum_{i=2}^{24} (e_i - e_{i-1})^2}{\sum_{i=1}^{24} (e_i)^2} = \frac{0.009305}{0.0095} = \underline{0.9795}$

3.5.6.1.6. Decisión de significancia del modelo generado, según la prueba “F” grupal

Del ANOVA, se puede observar que las variables X_3 y X_4 no tienen mayor influencia en la humedad relativa interior (HR_i), ya que individualmente estas variables no son significativas (no se rechazan la hipótesis nula H_0), entonces estos coeficientes son prácticamente cero, esto indica que estas 2 variables no intervienen en la ecuación que se ajusta a los datos experimentales. Esto se corrobora en el ANOVA, que indican que el error residual tiene mayor influencia que ambos factores (que se indican en la suma de cuadrados).

Respecto a la estadística de regresión, se puede observar que el coeficiente de correlación es alto, esto indica que el 99.51% de los datos son explicados por el modelo propuesto y solo los restantes 0.49% incrementarán el error. Por otro lado, el error típico es bastante bajo de solo 0.023 unidades (°C). El Durbin Watson es relativamente bajo, pero no presenta problema de autocorrelación, sin embargo, este valor puede ser mejorado con un modelo alternativo que tiende a llegar a 2 (modelo simple de regresión lineal múltiple).

Entonces cualquier cambio de la temperatura interior (T_i) está en función de las variables: X_1 , X_2 y X_5 que corresponden a la temperatura exterior (T_{ex}), Humedad Relativa exterior (H_{Re}) y la presión atmosférica (P_{atm}).

El ANOVA, indica que prácticamente con un 100% de confiabilidad el modelo matemático con términos significativos es aplicable a los datos experimentales. La ecuación que se obtiene es:

$$y_2 = 13.6388 + 0.093X_1 + 0.3935X_2 + 35.179X_5$$

Esta ecuación deberá verificarse mediante la prueba “t-student” de significación individual.

3.5.7. Prueba de hipótesis “t”-student de significación individual

3.5.7.1. Modelo de regresión de la humedad relativa (HR_i)

El modelo matemático completo de la Humedad Relativa interior a validar está dado por la ecuación:

$$y_2 = 13.93 + 0.0827x_1 + 0.3636x_2 - 0.00925x_3 - 0.087x_4 + 34.84x_5$$

Cuya ecuación de regresión estadística, es de la forma:

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_3x_3 + \beta_4x_4 + \beta_5x_5 + \varepsilon$$

3.5.7.2. Hipótesis planteada

$H_0 : \beta_1 = 0$ ($\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_5$): Regresión No significativa

$H_a : \beta_i \neq 0$ (para algún $i = 1, 2, \dots, 5$): Regresión significativa

3.5.7.3. Nivel de Significancia:

$\alpha = 0.05$ (95% de nivel de confianza)

3.5.7.4. Criterios para la prueba t-student individual:

Se rechaza H_0 , si: $t_j > t_{crit} = t_{Tablas}$

Siendo: $t_{crit} = t(\alpha/2, N-K) = t(0.025, 18) = 2.101$

$N = 24$ (Nº de datos totales)

$K = 6$ (Nº de coeficientes del modelo)

3.5.7.5. Cálculos

3.5.7.5.1. Cálculo del estimador de varianza (σ^2)

El estimador de varianza (σ^2) está dado por la fórmula matemática:

$$\sigma^2 = MCE = \frac{SSE}{N - K}$$

Donde:

$SSE = 0.009470$ (Suma al cuadrado del error)

$N = 24$ (Nº de datos totales)

$K = 6$ (Nº de coeficientes del modelo)

Reemplazando valores, se tiene el estimador de varianza (σ^2)

$$\sigma^2 = MCE = \frac{SSE}{N - K} = \frac{0.009470}{18} = 0.000526$$

3.5.7.5.2. Cálculo de la matriz simétrica (C)

La matriz simétrica (C) está determinada por la fórmula matemática:

$$C = (X'X)^{-1}$$

Donde:

X: es la misma matriz de diseño hallada anteriormente.

Resultando los elementos de la diagonal principal de la matriz C, el mismo valor hallado igual a:

$$C_{00} = C(1,1) = 1.4746 \times 10^4$$

$$C_{11} = C(2,2) = 1.0551$$

$$C_{22} = C(3,3) = 12.5429$$

$$C_{33} = C(4,4) = 0.1308$$

$$C_{44} = C(5,5) = 51.1274$$

$$C_{55} = C(6,6) = 1.2075 \times 10^5$$

3.5.7.5.3. Cálculo de t-student (t_j)

El t-student de cada coeficiente se calcula como:

$$t_0 = \frac{\beta_0}{\sqrt{\sigma^2 C_{00}}} = \frac{13.93}{\sqrt{(0.000531)(1.4746 \times 10^4)}} = \underline{5.002} > t_{\text{crit}} = 2.101 \text{ (se rechaza } H_0)$$

$$t_1 = \frac{\beta_1}{\sqrt{\sigma^2 C_{11}}} = \frac{0.0827}{\sqrt{(0.000531)(1.0551)}} = \underline{3.5105} > t_{\text{crit}} = 2.101 \text{ (se rechaza } H_0)$$

$$t_2 = \frac{\beta_2}{\sqrt{\sigma^2 C_{22}}} = \frac{0.3636}{\sqrt{(0.000531)(12.5429)}} = \underline{4.4764} > t_{\text{crit}} = 2.101 \text{ (se rechaza } H_0)$$

$$t_3 = \frac{\beta_3}{\sqrt{\sigma^2 C_{33}}} = \frac{|-0.00925|}{\sqrt{(0.000531)(0.1308)}} = 1.1152 < t_{\text{crit}} = 2.101 \text{ (No se rechaza } H_0)$$

$$t_4 = \frac{\beta_4}{\sqrt{\sigma^2 C_{44}}} = \frac{|-0.087|}{\sqrt{(0.000531)(51.1274)}} = 0.5305 < t_{\text{crit}} = 2.101 \text{ (No se rechaza } H_0)$$

$$t_5 = \frac{\beta_5}{\sqrt{\sigma^2 C_{55}}} = \frac{34.84}{\sqrt{(0.000531)(1.2075 \times 10^5)}} = 4.3716 > t_{\text{crit}} = 2.101 \text{ (se rechaza } H_0)$$

3.5.7.6. Decisión de significancia del modelo según la prueba “t” individual

Los valores calculados de (t_j) se comparan con el valor de $t_{\text{crit}} = 2.101$, para hallar su significancia. Los coeficientes de regresión que tengan un valor de t-

student menor que 2.101 no son estadísticamente significativos, caso contrario sí son significativos; es decir si:

$$t_j > t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{Se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{SÍ es significativo.}$$

$$t_j < t_{crit} = 2.101 \Rightarrow \text{No se rechaza "H}_0" \Rightarrow \text{No es significativo.}$$

Según esto se rechaza la hipótesis nula H_0 para los coeficientes de las variables: término independiente, x_1 , x_2 y x_5 , que corresponden al término constante (b_0), temperatura exterior (T_{ex}), Humedad relativa exterior (HR_e) y la presión atmosférica (P_{atm}), los cuales influyen significativamente en la humedad relativa interior del domo (HR_i) con un nivel de significancia del 95%. Las variables x_3 y x_4 no influyen en la humedad relativa interior (HR_i) ya que no son significativos (no se rechaza la hipótesis nula: H_0), esto indica que estas 2 variables no intervienen en la ecuación que se ajusta a los datos experimentales.

Resultando por tanto el modelo matemático simplificado con términos significativos igual a:

$$y_2 = 13.6388 + 0.093X_1 + 0.3935X_2 + 35.179X_5$$

3.5.8. Conclusión de la prueba de hipótesis de los coeficientes de regresión linealizado de la humedad relativa interior del domo (HR_i)

Tanto en las pruebas F de Fisher de significación grupal y t de student de significación individual, se concluye que el modelo matemático simplificado con términos significativos que se ajusta a los datos experimentales de la Humedad relativa interior del domo (HR_i), resulta la ecuación de Regresión igual a:

$$y_2 = 13.93 + 0.0827X_1 - 0.3636X_2 + 34.84X_5$$

Que, en variables originales también se puede expresar como:

$$HR_i = 13.93 + 0.0827T_{ex} + 0.3636HR_e + 34.84P_{atm}$$

En variables originales (no linealizado) corresponde a la ecuación:

$$HR_i = e^{13.93} \cdot T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_{ex}^{0.3636} \cdot P_{atm}^{34.84}$$

Como la presión atmosférica, se mantiene aproximadamente, constante con un valor promedio diario, mensual trimestral de $P_{atm} = 0.721056$ bar.

Reemplazando en la ecuación anterior, se tiene finalmente el modelo matemático, simplificado en variables originales de la forma:

$$HR_i = e^{13.93} \cdot (0.721056)^{34.84} \cdot T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_{ex}^{0.3636}$$

Resultando:

$$HR_i = 12.63 \cdot T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_{ex}^{0.3636}$$

Este resultado puede ser analizado su comportamiento en 3 dimensiones durante las 24 horas, tomadas como promedio trimestral para la temperatura exterior (T_{ex}) y Humedad Relativa exterior (HR_e).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis del balance energético del domo experimental

El balance energético del domo experimental está determinado por las pérdidas y aportes de calor, considerándose 2 estados comparativos inicial para espesor del PER de 5 cm y final para espesor del PER de 10 cm, cuyos coeficientes globales de transferencia de calor son respectivamente $0.5934 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$ y $0.3212 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$. Según las mejoras realizadas se redujo las pérdidas de calor principalmente en la transmisión, considerando 17 Hrs (durante el día en que no hay el sol) y 12 hrs durante la noche (de 6 pm a 6 am); cuyos resultados se indican en las siguientes tablas de pérdidas de calor.

4.1.1. Pérdidas térmicas totales de calor

En la tabla (32) se indica las perdidas térmicas totales de calor por transmisión, ventilación e infiltración, en la cual muestra que la pérdida total se reduce de 50.077 Kw/h a 28.484 Kw/h durante las 17 Hrs del día en promedio que no hay sol y 35.346 a 20.11 durante las 12 Hrs de la noche en promedio (de 6 pm a 6 am). De las cuales la mayor pérdida se produce en la transmisión mientras que las pérdidas por ventilación e infiltración son menores y se mantienen prácticamente constantes.

Tabla 32

Pérdidas térmicas totales de calor

Cargas térmicas de calor	Horas	Calor Total Perdido ($Q_{T,perd}$)	
		Inicial: $U_G=0.5934 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$	Final: $U_G=0.3212 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$
Transmisión	17	38.273 (76.43%)	16.68 (58.57%)
($Q_{P,trans.}$): KwH	12	27.016 (76.43%)	11.78 (58.58%)

Ventilación	17	9.08 (18.13%)	9.08 (31.87%)
($Q_{P,vent.}$): Kwh	12	6.41 (18.13%)	6.41 (31.87%)
Infiltración	17	2.724 (5.44%)	2.724 (9.56%)
($Q_{P,inf.}$): Kwh	12	1.92 (5.44%)	1.92 (9.55%)
Pérdida Total de calor	17	50.077 (100%)	28.484 (100%)
($Q_{P,inf.}$): Kwh	12	35.346 (100%)	20.11 (100%)

4.1.1.1. Pérdidas térmicas por transmisión de calor

En la tabla (32) se indica las pérdidas térmicas subtotales de transmisión de calor por: la cobertura (pared y techo), el piso, la puerta y el área traslúcida (o ventana); en el cual muestra que la pérdida total de transmisión se reduce de 38.273Kw/h a 16.68 Kw/h durante las 17 horas del día en que no hay sol y 27.018 Kw/h a 11.78 Kw/h durante las 12 horas de la noche. De los cuales la reducción de pérdidas que compone la transmisión se indica a continuación.

Tabla 33

Pérdidas térmicas por transmisión de calor

Pérdidas por transmisión de calor	Horas	Calor Total Perdido ($Q_{T,perd}$)	
		Inicial: $U_G=0.5934 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$	Final: $U_G=0.3212 \text{ W/m}^2\text{-}^\circ\text{C}$
Cobertura	17	17.843 (46.62%)	10.89 (65.28%)
($Q_{P,cob.}$): Kwh	12	12.595 (46.62%)	7.69 (65.28%)
Suelo o piso	17	5.10 (13.33%)	4.63 (27.76%)
($Q_{P,suelo}$): Kwh	12	3.60 (13.33%)	3.27 (27.76%)
Puerta	17	3.44 (8.98%)	1.16 (6.96%)
($Q_{P,puerta}$): Kwh	12	2.43 (8.99%)	0.82 (6.99%)
Ventana o área traslúcida	17	11.89 (31.07%)	0 (0.00%) cerrado
($Q_{P,vent.}$): Kwh	12	8.393 (31.06%)	0 (0.00%) cerrado
Pérdida total de calor por transmisión ($Q_{P,Trans.}$): Kwh	17	38.273 (100%)	16.68 (100%)
	12	27.018 (100%)	11.78 (100%)

4.1.1.1.1. Pérdidas en la cobertura (pared y techo)

La pérdida en la cobertura (pared y techo) se reduce de 17.843 Kwh a 10.89 Kwh durante las 17 horas del día que no hay sol y de 12.595 Kwh a 7.69 Kwh durante las 12 horas de la noche (de 6 pm a 6 am). Esta reducción es debido a que se aumenta el espesor del aislamiento térmico del PER de 5 cm a 10 cm.

4.1.1.1.2. Pérdidas en el piso

Se redujo de 5.10 KWH a 4.63 KWH para 17 horas del día que no hay sol y de 3.6 KWH a 3.27 KWH para 12 horas de la noche. Esta reducción es debido a que se utilizó materiales aislantes (madera prensada, enfoscado de cemento y polietileno expandido) en la parte inferior del piso, como lo especifica la norma peruana: “**em.110 Confort Térmico y lumínico con eficiencia energética**”. **Tabla (1), zona bioclimática N° (05) del Perú para clima Alto Andina.** Resultando una Resistencia Térmica total del piso de $2.2 \text{ m}^2\text{C/W}$ y un coeficiente global de transmisión térmica de calor de $U_T = 0.454 \text{ W/m}^2\text{C}$.

4.1.1.1.3. Pérdida en la puerta

La pérdida en la puerta se redujo de 3.44 Kwh a 1.16 Kwh durante 17 horas del día que no hay sol y de 2.43 Kwh a 0.82 Kwh durante las 12 horas de la noche. Esta reducción es debido a que se utilizó 2 puertas para no tener una exposición directa al aire exterior, tanto para ingresar o salir del domo.

4.1.1.1.4. Pérdida en la ventana o área traslúcida

La pérdida en la ventana o área traslúcida de 10 m^2 fue una de las mayores pérdidas principalmente durante la noche, por lo que se planteó cerrar por las noches, con el mismo aislamiento térmico del PER, lo que permitió aumentar la cobertura (Área exterior) del domo de 98 m^2 a 111 m^2 y reduciéndose la pérdida (de 11.89 Kwh para 17 horas y de 8.393 Kwh para 12 horas) prácticamente a cero. Fue importante considerar reducir estas pérdidas; por lo que se planteó para futuros estudios utilizar ventanas con aislamiento térmico tipo doble acristalamiento.

4.1.2. Demanda térmica de calor (Qd)

De lo analizado, se concluye que la pérdida total de calor durante las 12 horas de la noche (6 pm a 6 am) es de 20.11 Kwh, el mismo que nos permitió determinar la demanda térmica de calefacción para las condiciones de diseño: temperatura exterior mínimo de -3°C y temperatura interior de 15°C , obteniéndose un coeficiente global de transmisión máxima de $(UA)_{g,m\acute{a}x} = 1.1172 \text{ Kwh}/^{\circ}\text{C}$. Resultando la demanda térmica de calefacción instantánea expresado en Kwh definido por la fórmula:

$$Q_d = 1.1172(15 - T_{amb}) \quad [\text{Kwh}]$$

Verificándose para la condición de diseño, si la $T_{amb} = -3^{\circ}\text{C}$, entonces se obtiene la demanda térmica de calefacción de $Q_d = 20.11 \text{ Kwh}$, que se comprueba la pérdida total de calor hallado anteriormente.

4.1.2.1. Temperatura media mensual y trimestral durante la noche de los tres meses de friaje

En la tabla (34) se muestran las temperaturas promedias de los 3 meses de friaje, en el cual de mayo a julio va disminuyendo y como consecuencia la demanda térmica aumenta como se indica en la tabla (34). La temperatura promedio trimestral es de 6.71°C con la cual se obtiene la demanda térmica promedio para los meses de friaje de 9.26 KWH requerido.

Tabla 34

Temperatura ambiental media mensual y trimestral durante la noche de los meses de friaje de la ciudad de Urubamba – Cusco.

Temp. Mensual T ($^{\circ}\text{C}$)	HORAS DE LA NOCHE												Promedio Trimestral	
	18	19	20	21	22	23	24	01	02	03	04	05		06
Mayo T ($^{\circ}\text{C}$)	12.13	9.74	8.80	8.04	7.20	6.59	6.04	5.69	5.88	6.25	6.69	6.83	6.97	7.45
Junio T ($^{\circ}\text{C}$)	11.75	9.51	8.54	7.74	7.01	6.26	5.66	5.31	5.41	5.55	5.57	5.57	5.69	6.88
Julio T ($^{\circ}\text{C}$)	11.84	9.09	7.97	7.23	6.37	5.74	5.20	4.63	4.01	3.46	3.27	3.21	3.22	5.79
Promedio T ($^{\circ}\text{C}$)	11.91	9.41	8.44	7.67	6.86	6.20	5.64	5.22	5.10	5.08	5.18	5.21	5.29	6.71

4.1.2.2. Demanda térmica de calefacción media mensual y trimestral

Con la fórmula indicada anteriormente se obtuvo la demanda térmica de calefacción media para los meses de friaje (mayo, junio y julio) y el promedio trimestral considerando la temperatura ambiental promedio mensual y trimestral, como se indica en la tabla (35).

Tabla 35

Demanda térmica de calefacción mensual y trimestral.

Temperatura y demanda térmica	Meses de Friaje			Promedio Trimestral
	Mayo	Junio	Julio	
Temperatura ambiental promedio (°C)	7.451	6.889	5.795	6.71
Demanda térmica de calefacción (KwH)	8.434	9.062	10.287	9.26

4.1.3. Aportes u ofertas de calor

Los aportes de calor son debido al calor entregado por: los artefactos eléctricos, las personas cuando duermen durante la noche y por la cantidad de placas del acumulador PCM23, permaneciendo constante los 2 primeros y variando el aporte de calor según la cantidad de placas de PCM23 utilizadas en el domo y ésta a su vez según el porcentaje de carga o porcentaje de licuación (%L) del acumulador obtenido por el calentamiento solar durante el día (de 6 am a 6 pm), que luego se descarga durante la noche (de 6 pm a 6 am) según la carga acumulada durante el día. Es necesario indicar que para las condiciones óptimas obtenidas que el diseño factorial compuesto 2^3 se obtuvo para 60 placas de PCM23 y espesor del aislamiento térmico del PER de 10 cm con la cual se logró una temperatura máxima de 18 °C en promedio. En la tabla (36) también se muestra el calor aportado por 80 placas de PCM23 para el caso de turismo, con la cual se logra aportar mayor cantidad de energía acumulada, teniendo la limitación de utilizar más placas adicionales debido al costo que éstas representan.

Tabla 36

Aportes de calor según variación de la cantidad de placas del acumulador PCM23 y porcentaje de licuación

Aportes de calor	Aportes de Calor					
	50 PCM		60 PCM		80 PCM	
	%L=100	%L=74.4	%L=100	%L=74.4	%L=100	%L=74.4
Artefactos eléctricos (KwH)	0.7	+0.7	0.7	0.7	0.7	0.7
Calor que entregan las personas en la noche (KwH)	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Acumulador PCM23 (KwH)	7.5	5.58	9.00	6.70	12.0	8.93
Aporte total de calor (KwH)	11.98	10.06	13.48	11.18	16.48	13.41

4.1.4. Balance Energético

Conocido los aportes y demanda energética podemos hallar el Balance Energético mensual y trimestral para los meses de friaje y su autonomía correspondiente. El Balance Energético nos permite determinar que los aportes generales cubren (o es igual) a la demanda de calefacción requerida y la autonomía (A) nos permite determinar la cantidad de horas o días adicionales que se tenga como reserva para los días que no hay sol, los mismos que se indican en el cuadro del Balance energético Tabla (37). En el cuadro se muestra que la autonomía promedio trimestral fue de medio día (0.5 días) para porcentaje de licuación del 100% y 0.21 para porcentaje de licuación de 74.4%.

Fue importante también determinar la cantidad de placas requerido por el acumulador PCM23, que nos permita tener una autonomía de 1 día y 2 días que fueron obtenidos para un porcentaje de licuación (%L) de 100% (cargado completamente) y 74.44% (calculado parcialmente como promedio).

Tabla 37

Balance energético: Entre el aporte y demanda térmica de calor y autonomía para 60 placas del acumulador PCM23.

Balance	Meses de Friaje						Promedio Trimestral	
	Mayo		Junio		Julio		%L=100	%L=74.4
	%L=10	%L=74	%L=100	%L=74.4	%L=100	%L=74.4		
Total aporte de calor mensual y trimestral (KwH)	13.48	11.18	13.48	11.18	13.48	11.18	13.48	11.18
Demanda térmica de calor promedio mensual y trimestral (KwH)	8.43	8.43	9.06	9.06	10.29	10.29	9.26	9.26
Acumulación térmica de calor promedio mensual y trimestral (KwH)	5.05	2.75	4.42	2.12	3.19	0.89	4.22	1.92
Autonomía de calor promedio diario mensual y trimestral (Hrs. o días)	0.60	0.33	0.50	0.23	0.31	0.10	0.50	0.21

4.2. Análisis de la regresión lineal múltiple de la temperatura (t_i) y humedad relativa (H_{Ri}) en el interior del domo

4.2.1. Análisis de la regresión lineal múltiple de la temperatura (t_i) en el interior del domo

4.2.1.1. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático completo de la T_i .

El análisis de varianza obtenido con el programa MINITAB para la temperatura interior del domo (T_i) en base al modelo de la regresión lineal múltiple se muestra los resultados en la tabla (38). Obtenido a partir de los datos de la temperatura. En la columna de la izquierda tenemos las fuentes de variabilidad con los términos de las variables de regresión independiente lineal, el error y el total. Los términos considerados significativos (nivel de significancia inferior a 5%) están indicados en la tabla y sus variaciones de sus varianzas están colocadas gráficamente en orden de tamaño en la figura (20).



El término predominante es X_1 , seguido por los términos lineales X_4 y X_2 ; todos los cuales en ese orden ejercen una influencia predominante en la temperatura interior del domo (y_1). Los términos lineales X_3 y X_5 que corresponden al tiempo (t) y presión atmosférica (P_{atm}) no son significativos. De esta forma podemos decir que la temperatura interior del domo y_1 (T_i) depende fundamentalmente de la temperatura exterior X_1 (T_{ex}), seguido por la temperatura generada por el acumulador PCM23, X_4 (T_{PCM}) y la humedad relativa exterior X_2 (HR_e) en menor proporción.

Tabla 38

Análisis de regresión para el modelo completo: $y_1 LN$ vs. $x_1 LN$,

$x_2 LN$, $x_3 LN$, $x_4 LN$, $x_5 LN$

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	3.16447	0.632894	1191.67	0.000
$x_1 LN$	1	0.07398	0.073978	139.29	0.000
$x_2 LN$	1	0.01695	0.016950	31.91.	0.000
$x_3 LN$	1	0.00001	0.000013	0.03	0.876
$x_4 LN$	1	0.03099	0.030988	58.35	0.000
$x_5 LN$	1	0.00018	0.000181	0.34	0.566
Error	18	0.00956	0.000531		
Total	23	3.17403			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad.(pred)
0.0230456	99.70%	99.62%	99.33%

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	1.95	2.80	0.70	0.494	
$x_1 LN$	0.2794	0.0237	11.80	0.000	12.16
$x_2 LN$	-0.4611	0.0816	-5.65	0.000	41.10
$x_3 LN$	0.00132	0.00834	0.16	0.876	2.08
$x_4 LN$	1.259	0.165	7.64	0.000	5.36
$x_5 LN$	4.68	8.01	0.58	0.566	25.27

Ecuación de regresión

$$y_1 = 1.95 + 0.2794 x_1 LN - 0.4611 x_2 LN + 0.00132 x_3 LN + 1.259 x_4 LN + 4.68 x_5 LN$$

LN+4.68 x5 LN

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

Obs	$y_1 LN$	Ajuste	Resid	Resid est.
10	2.6352	2.6845	-0.0492	-2.95 R
12	3.1861	3.1431	0.0430	2.08 R
15	3.3627	3.4106	-0.0480	-2.47 R
Residuo grande				

Considerando los 3 primeros términos significativos podemos decir que ellos son responsables con el 92.6% de la variabilidad total, de los cuales el mayor que corresponde a la temperatura exterior (X_1) es responsable con el 56.2%, seguido por la temperatura generada por el PCM23 con el 23.53% y la humedad relativa exterior (X_2) con 12.87%. Los 2 términos que contribuyen con las menores variabilidades son las lineales X_5 y X_3 que corresponden a la presión atmosférica (P_{atm}) y el tiempo (t).

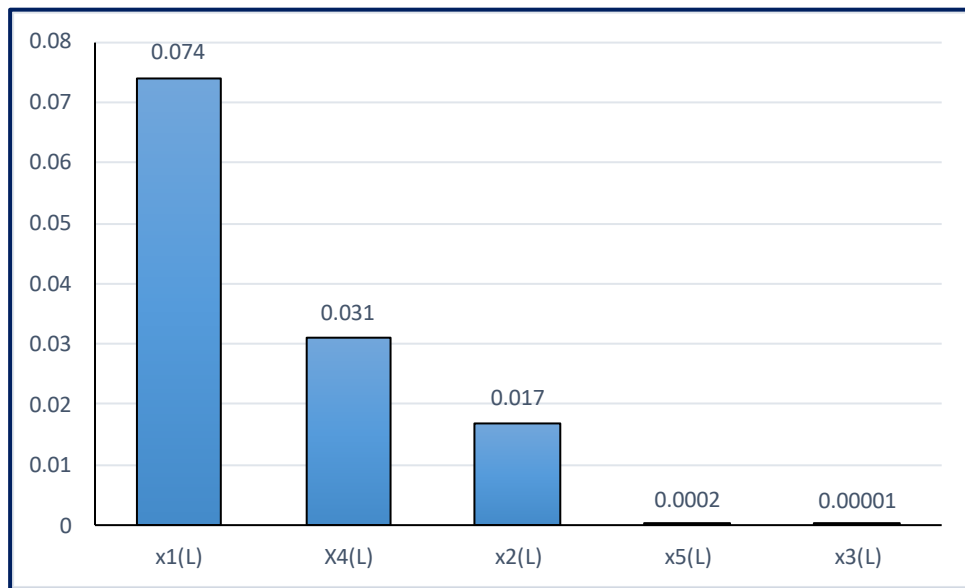


Figura 20. Varianza en función de las fuentes de variabilidad.

$\Sigma x_i = 0.12211349$ (Regresión)	: 92.74%
Error = 0.0095597	: <u>7.26%</u>
Total = 0.131673 (variabilidad total)	: 100.00%
<hr/>	
$x_1 + x_2 + x_4 = 0.121919$	92.60%
$x_1 = 0.073979$	56.2%
$x_4 = 0.030988$	23.53%
$x_2 = 0.016952$	<u>12.87%</u>
$\Sigma = 0.121919$	$\Sigma = 92.60\%$

Atendiendo ahora el ajuste del modelo a los datos experimentales obtenidos, se muestra la ecuación de regresión del modelo completo para la temperatura interior del domo (y_1), definido por:

$$\hat{y}_1 = 1.95 + 0.2794X_1 - 0.4611X_2 + 0.00132X_3 + 1.259X_4 + 4.68X_5 \quad \dots (\theta_1)$$

La tabla (39) muestra el resumen de los valores del análisis de varianza de ajuste considerando el modelo completo de la Ecuación (θ_1), donde verificamos que la variabilidad explicada por el modelo es de 99.70% (revelada por el índice: R^2) y el error asume una desviación estándar de 0.023.

Tabla 39

Análisis de varianza del ajuste realizado con el modelo completo para la temperatura interior domo.

FV	GL	SC	MC	F	P_value
Modelo	5	3.1645	0.63289	1191.7	0.000 (5.0102x10 ⁻²²)
Error Puro	18	0.00956	0.000531		
TOTAL	23	3.17403	0.138		

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSe}{SS_T} = 0.997 \dots\dots\dots (\text{coeficiente de determinación})$$

$$R = 0.998 \dots\dots\dots (\text{Coeficiente de correlación múltiple})$$

$$S = 0.023 \dots\dots\dots (\text{Desviación estándar})$$

4.2.1.2. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático para el modelo simplificado de la Ti

En la tabla del ANOVA para el modelo completo se muestran los valores de la prueba F-Fisher de regresión grupal y la prueba t de student individual de los coeficientes de regresión individual calculadas con el programa Minitab, observando en ambas pruebas que se rechazan la hipótesis nula H_0 para las variables X_1 , X_2 y X_4 que corresponde a la temperatura exterior (T_{ex}), Humedad Relativa exterior (HR_e) y Temperatura del acumulador PCM23 (T_{PCM}) y no se

rechazan la hipótesis nula H_0 para las variables X_3 y X_5 que corresponden al tiempo (t) y la presión atmosférica (P_{atm}), con la cual estas 2 variables se eliminan del modelo; resultando la ecuación de regresión simplificado que considera solo los términos significativos. Para lo cual similarmente se obtiene el ANOVA para el modelo simplificado que considera solo los términos significativos que se indica a continuación.

Similarmente se obtiene el ANOVA para el modelo simplificado que considera solo los términos significativos (ver tabla del ANOVA simplificado).

De igual forma, si consideramos un modelo que se ajuste a los datos con solo los términos significativos indicados en el ANOVA, tenemos:

$$y_1 = 0.2531 + 0.2867X_1 - 0.4158X_2 + 1.2532X_4 \quad \dots (\theta_2)$$

Esta ecuación representada en variables naturales corresponde a:

$$T_i = 0.2531 + 0.2867T_{ex} - 0.4158HR_e + 1.2532T_{PCM} \quad \dots (\theta_3)$$

La tabla (40) muestra el análisis de varianza del ajuste considerando el modelo simplificado, descrito en la ecuación (θ_2), el cual explica con el 99.7% de la variabilidad total y el error asume una desviación estándar de solo 0.0221, manteniéndose prácticamente el mismo valor alcanzado por el modelo completo.

Tabla 40
Análisis de varianza del modelo simplificado de la temperatura interior del domo

FV	GL	SC	MC	F _{cal}	P_value
Modelo	3	3.1642	1.0547	2151.5	0.000 (2.9228e ⁻²⁵)
Error Puro	20	0.0098046	0.00049023		
TOTAL	23	3.174	0.138		

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 0.997 \quad \dots \text{(coeficiente de determinación)}$$

$R = 0.998 \dots \text{(Coeficiente de correlación múltiple)}$

$S = 0.0221 \dots \text{(Desviación estándar)}$

Tabla 41

Análisis de regresión para el modelo simplificado: y_1 LN vs. x_1

LN, x_2 LN, x_4 LN

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	3.16447	0.632894	1191.67	0.000
x_1 LN	1	0.07398	0.073978	139.29	0.000
x_2 LN	1	0.01695	0.016950	31.91.	0.000
x_4 LN	1	0.03099	0.030988	58.35	0.000
Error	18	0.00956	0.000531		
Total	23	3.17403			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	99.70%	R-cuad. (ajustado)	99.62%	R-cuad. (pred)	99.33%
---	---------	--------	--------------------	--------	----------------	--------

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	0.2531	2.80	0.70	0.494	
x_1 LN	0.2867	0.0237	11.80	0.000	12.16
x_2 LN	-0.4158	0.0816	-5.65	0.000	41.10
x_4 LN	1.2532	0.165	7.64	0.000	5.36

Ecuación de regresión

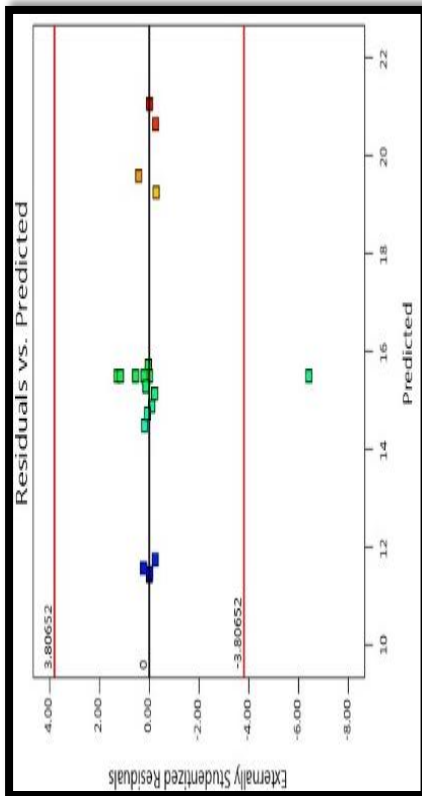
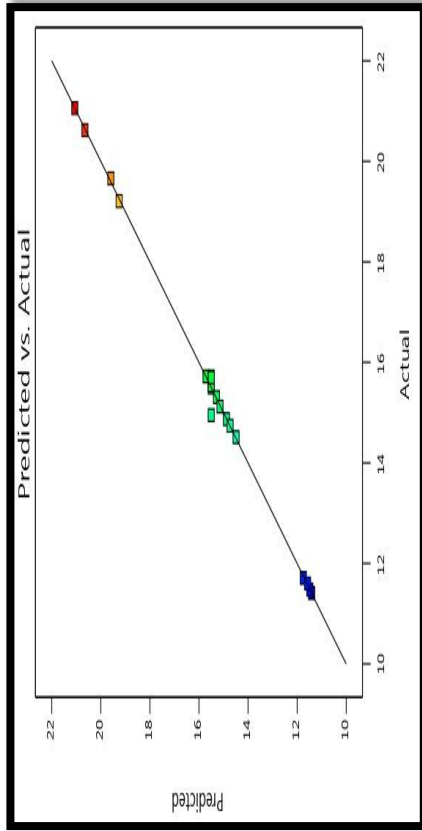
$$y_1 = 0.2531 + 0.2867X_1 - 0.4158X_2 + 1.2532X_4$$

Ajustes y diagnósticos para observaciones poco comunes

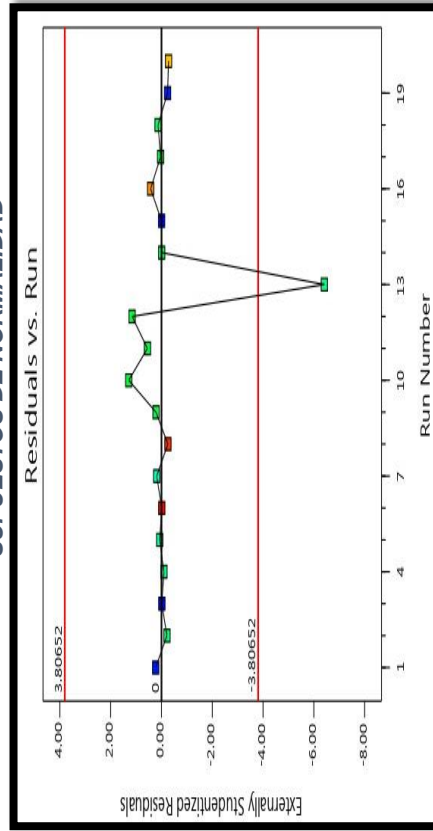
Obs	y_1 LN	Ajuste	Resid	Resid est.
10	2.6352	2.6845	-0.0492	-2.95
12	3.1861	3.1431	0.0430	2.08
15	3.3627	3.4106	-0.0480	-2.47
Residuo grande R				

4.2.1.3. Análisis y discusión de la verificación grafica del residuo y parámetros estadísticos para adecuabilidad del modelo matemático de la Ti

En la figura (21) se muestran cuatro gráficos, que fueron hallados para evaluar el residuo obtenido por el ajuste. El primero que presenta el residuo normalizado en contraste con la curva normal ideal representada por la línea recta. En este caso constatamos un buen comportamiento del residuo satisfaciendo el supuesto de normalidad a pesar de una pequeña discrepancia de los puntos en la parte inferior y central del gráfico. El segundo gráfico es el residuo en función de los valores ajustados, el cual se presenta con una distribución relativamente aleatoria, satisfaciendo el supuesto de independencia, a pesar de una cierta tendencia y concentración de puntos en el lado izquierdo. El tercer gráfico muestra la distribución de frecuencias del residuo frente a la curva normal esperada, a partir de lo cual podemos constatar una razonable concordancia, ya que los puntos del residuo asumen una distribución próxima a la normal centrada en cero. Adicionalmente se presenta el gráfico del residuo en función del orden de observación, en este caso también constatamos un buen comportamiento del residuo menores en magnitud a 0.025 como promedio, a pesar de ciertos valores mayores en la parte central (observaciones 10, 12, 15 y 16) en que fueron algo mayores, alcanzando estos valores del residuo menores a 0.05, con lo que se garantiza la validez del modelo propuesto.

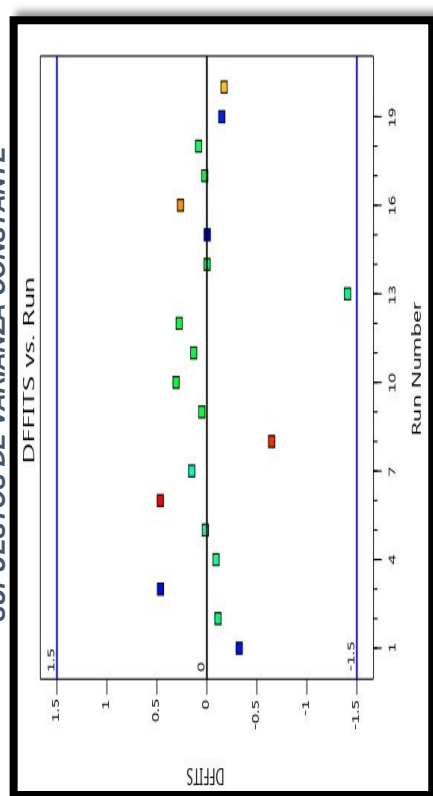


SUPUESTOS DE NORMALIDAD



PREDICHO VS ACTUAL

SUPUESTOS DE VARIANZA CONSTANTE



SUPUESTOS DE ALEATORIEDAD

Figura 21. Gráfica de residuos de la temperatura interior del domo

Fuente: Programa diseño experto

4.2.1.4. Graficas de la superficie de respuesta y curvas de nivel del modelo simplificado de la temperatura interior del domo (Ti)

A partir del modelo Linealizado ajustado y validado por las pruebas del residuo y parámetros estadísticos, construimos la gráfica para la temperatura interior del domo (y_1), para lo cual la ecuación simplificada linealizada está dada por:

$$\hat{y}_1 = 0.2531 + 0.2867X_1 - 0.4158X_2 + 1.2532X_4$$

Y expresado en variables originales, resulta:

$$\hat{T}_i = e^{0.2531} \cdot \frac{T_{ex}^{0.2867} \cdot T_{PCM}^{1.2532}}{HR_e^{0.4158}}$$

$$\hat{T}_i = 1.288 \cdot \frac{T_{ex}^{0.2867} \cdot T_{PCM}^{1.2532}}{HR_e^{0.4158}}$$

Considerando la temperatura del acumulador PCM23 aproximadamente constante como promedio diario mensual trimestral de: $T_{PCM} = 15.492917^\circ\text{C}$, resulta la temperatura interior simplificado igual a:

$$\hat{T}_i = 1.288 \frac{T_{ex}^{0.2867} \cdot (15.492917)^{1.2532}}{HR_e^{0.4158}}$$

$$\hat{T}_i = 39.94 \frac{T_{ex}^{0.2867}}{HR_e^{0.4158}}$$

Cuya ecuación linealizada, está dado por:

$$\hat{T}_i = 3.6874 + 0.2867T_{ex} - 0.4158HR_e$$

Estos resultados de los modelos ajustados simplificados nos permitieron analizar el comportamiento de la temperatura interior del domo (T_i) como promedio trimestral durante las 24 horas del día, para lo cual se conoce la temperatura exterior (T_{ex}), Humedad Relativa exterior (HR_e) y Temperatura del acumulador PCM23 (T_{PCM}), que fueron medidos. Los gráficos correspondientes se indican en el anexo.

Se construyó también la gráfica en 3D con el programa Matlab para el modelo linealizado simplificado dado por la ecuación:

$$\hat{T}_i = 3.6874 + 0.2867T_{ex} - 0.4158HR_e$$

```
>> %Programa en Matlab para gráfica en 3D de  $\hat{T}_i$ .
>> x1=[1.732245 1.651219 ..... 1.925707 1.824549]';
>> x2=[4.044279 4.083733 ..... 3.953037 4.003933]';
>> y1=3.6874 + 0.2867.* x1 - 0.4158.* x2
    y1=[2.5024  2.4628  ..... 2.5958  2.5457]';
>> X=[ones(size(x1)) x1 x2];
>> b = regress (y1, X)
    b = 3.6874
        0.2867
       -0.4158
>> Scatter 3(x1, x2, y1, 'filled')
>> hold on
>> x1Fit = min (x1): 0.02: max(x1);
>> x2Fit = min (x2): 0.02: max(x2);
>> [x1FIT, x2FIT]= meshgrid (x1fit, x2fit);
>> YFIT = b(1) + b(2).* x1FIT + b(3).* x2FIT;
>> mesh (x1FIT, x2FIT, YFIT)
>> contour (x1FIT, x2FIT, YFIT)
>> meshc (x1FIT, x2FIT, YFIT)
>> title ('Grafica de superficie respuesta y curva de Nivel de la  $T_i$ ')
>> Xlabel ('x1: Temperatura exterior')
>> Ylabel ('x2: Humedad Relativa exterior')
>> Zlabel ('y1: Temperatura interior del domo')
>> view (60,10)
>> hold off
>> grid
```

4.2.1.5. Cálculo del intervalo de confianza de los coeficientes de: regresión y residuales y parámetros estadísticos del modelo simplificado de la temperatura T_i

Adicionalmente se utilizó el Programa Matlab para validar los resultados obtenidos y obtener los intervalos de confianza: De los coeficientes de regresión, los residuales obtenidos y los parámetros estadísticos (R^2 , F, P) para 95% de confianza ($\alpha=0.05$) utilizando el comando: $[b, bint, r, rint, stasts]=regress(y1,X,\alpha)$. Resultando los intervalos de confianza y parámetros estadísticos que se indica en la tabla (42).

Tabla 42

Intervalos de confianza de los coeficientes de regresión y residuales - parámetros estadísticos de la temperatura interior (T_i)

b (coeficientes de regresión)	b_{int} (intervalos de confianza de los coeficientes de Regresión)
$b_0 = 0.2531$	$b_0 : -0.8012 \text{ — } 1.3075$
$b_1 = 0.2867$	$b_1 : 0.2463 \text{ — } 0.3270$
$b_2 = -0.4158$	$b_2 : -0.4996 \text{ — } -0.3319$
$b_4 = 1.2532$	$b_4 : 1.0013 \text{ — } 1.5050$
r (residual)	r_{int} (intervalo de confianza de los residuos)
$r_1 = -0.0035$	$r_1 : -0.0488 \text{ — } 0.0418$
$R_2 = -0.0026$	$r_2 : -0.0479 \text{ — } 0.0427$
⋮	⋮
$r_{23} = -0.0007$	$r_{23} : -0.0452 \text{ — } 0.0439$
$r_{24} = -0.0026$	$r_{24} : -0.0476 \text{ — } 0.0424$
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS (R^2, F, P)	
Stats = 1.0e + 03	
$R^2 = 0.0010$	F = 2.1515 P = 0.0000, 0.0000

4.2.1.6. Cálculos de los valores óptimos de la temperatura interior del domo del modelo simplificado (Y_{1opt})

Se determinó el valor óptimo del modelo simplificado Linealizado (con términos significativos) de la temperatura interior del domo (y_{1opt}), sujeto a las restricciones indicadas por las variables independientes (desde su valor mínimo

hasta su valor máximo, considerando su desfase térmico), utilizando el programa de Matlab, vía programación lineal por el método Simplex para el cálculo tanto de la temperatura interior mínima y máxima en el interior del domo.

4.2.1.6.1. Cálculo de la temperatura interior mínima en el interior del domo ($Y_{1,min}$)

$$\text{Min } y_1 = 0.2531 + 0.2867x_1 - 0.4158x_2 + 1.2532x_4$$

s.a.

$$x_1 \leq 3.5042$$

$$x_2 \leq 4.18883$$

$$x_4 \leq 2.73524$$

$$x_1 \geq 1.6442$$

$$x_2 \geq 3.229$$

$$x_4 \geq 2.6822$$

>> % Cálculo con el programa Matlab del valor mínimo de la temperatura interior del domo (y_{1min})

```
>> A = [1 0 0
```

```
0 1 0
```

```
0 0 1
```

```
-1 0 0
```

```
0 -1 0
```

```
0 0 -1];
```

```
>> f = [0.2867 -0.4158 1.2532];
```

```
>> b = [3.5042 4.18883 2.73524 -1.6442 -3.223 -2.6827]
```

```
>> x = linprog(f,A,b)␣
```

Optimal solution found

$$x = 1.6442 \Rightarrow x_1 = 1.6442 \Rightarrow T_{ex} = e^{1.6442} = 5.176^\circ\text{C} \text{ (para las 4 am)}$$

$$4.18883 \Rightarrow x_2 = 4.18883 \Rightarrow HR_e = e^{4.18883} = 65.9456\% \text{ (para las 5 am)}$$

$$2.6822 \Rightarrow x_4 = 2.6822 \Rightarrow T_{PCM} = e^{2.6822} = 14.62^\circ\text{C} \text{ (para las 5 am)}$$

- Reemplazando estos valores en la ecuación de regresión, se tiene el valor mínimo de la temperatura interior del domo:

$$\text{Min } y_1 = 0.2531 + 0.2867(1.66442) - 0.4158(4.18883) + 1.2532(2.6822) = 2.3441$$

$\text{Min } \hat{y}_1 = 10.42^\circ\text{C}$	(Valor mínimo promedio de la temperatura a las 6 am.)
---	---

Por lo tanto:

Este valor se verifica con los datos experimentales obtenidos, resultando para el caso más crítico de la temperatura interior más baja del domo, lográndose un salto térmico de 5.2°C para una temperatura exterior de 5.17°C para un desfase térmico de 2 hrs., humedad relativa exterior de 65.95% (para un desfase térmico de 1 hora), temperatura del acumulador PCM23 de 14.62°C (para un desfase térmico de 1 hora). Para estos valores la temperatura mínima alcanzada en el interior del domo es de 10.42°C para una temperatura exterior de 5.29°C que ocurre a las 6 am.

4.2.1.6.2. Cálculo de la temperatura interior máxima del domo (Y_{max})

$$\text{Max } \hat{y}_1 = 0.2531 + 0.2867x_1 - 0.4158x_2 + 1.2532x_4$$

s.a.

$$x_1 \leq 3.5042$$

$$x_2 \leq 4.18883$$

$$x_4 \leq 2.73524$$

$$x_1 \geq 1.6442$$

$$x_2 \geq 3.223$$

$$x_4 \geq 2.6822$$

>> % Cálculo con el programa Matlab del valor máximo de la temperatura interior del domo ($y_{1\text{máx}}$)

$$\text{>> A} = [1 \ 0 \ 0$$

$$0 \ 1 \ 0$$

$$0 \ 0 \ 1$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

$$\gg f = [-0.2867 \ 0.4158 \ -1.2532];$$

$$\gg b = [3.5042 \ 4.18883 \ 2.73524 \ -1.6442 \ -3.223 \ -2.6827]$$

$$\gg x = \text{linprog}(f,A,b) \downarrow$$

Optimal solution found

$$x = 3.5042 \Rightarrow x_1 = 3.5042 \Rightarrow T_{ex} = e^{3.5042} = 33.25^\circ\text{C} \text{ (para las 4 am)}$$

$$3.2230 \Rightarrow x_2 = 3.2230 \Rightarrow HR_e = e^{3.223} = 25.1\% \text{ (para las 5 am)}$$

$$2.7352 \Rightarrow x_4 = 2.7352 \Rightarrow T_{PCM} = e^{2.7352} = 15.413^\circ\text{C} \text{ (para las 5 am)}$$

- Reemplazando estos valores en la ecuación de regresión, se tiene el valor máximo de la temperatura interior del domo:

$$\text{Max } \hat{y}_1 = 0.2531 + 0.2867(3.5042) - 0.4158(3.223) + 1.2532(2.73524)$$

$$\text{Max } \hat{y}_1 = 3.3454 \Rightarrow T_{i,\text{max}} = e^{3.3454} = 28.372^\circ\text{C}$$

$\text{Máx } \hat{y}_1 = 28.4^\circ\text{C}$	(Valor máximo promedio de la temperatura interior a las 2 pm.)
--	--

Por lo tanto:

Este valor se verifica con los datos experimentales obtenidos (28.8°C), resultando para el caso máximo de la temperatura interior del domo de 28.4°C, con el modelo simplificado, para una temperatura exterior de 33.25°C (con un desfase térmico de 2 hrs.), humedad relativa exterior de 25.1% (con un desfase térmico de 1 hr.) y para la temperatura del acumulador PCM23 de 15.413°C (con un desfase térmico de 1 hr.), lográndose un salto térmico de solo 1°C que ocurre a las 2 pm.

4.2.2. Análisis de la regresión lineal múltiple de la humedad relativa interior del domo (HRi)

4.2.2.1. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático del modelo completo de la HRi

La tabla (42) muestra los valores del análisis de varianza realizada por el programa Minitab para los datos de la Humedad Relativa interior del domo (HR_i). Los valores de las varianzas más significativas indicadas en la tabla (42) se muestran en la figura (22), donde se constata que las variables: x_2 , x_5 y x_1 tienen mayor influencia en la Humedad relativa interior del domo (HR_i) por ser responsables por las mayores variabilidades de sus variabilidades de sus varianzas. Estos tres términos lineales que corresponden a la Humedad relativa exterior x_2 (HR_e), presión atmosférica local x_5 (P_{atm}) y temperatura exterior x_1 (T_{ex}) son responsables con aproximadamente 72.5% de la variabilidad total y por tanto ejercen mayor dominio sobre el comportamiento de la variable respuesta. De los cuales los términos predominantes casi con igual proporción son la Humedad relativa exterior con 28% y la presión atmosférica local con 27% seguido por la temperatura exterior con 17.4% aproximadamente.

Los términos lineales x_3 y x_4 que corresponden al tiempo (t) y la temperatura del acumulador PCM23 (T_{PCM}) no son significativos ya que contribuyen con las menores variabilidades.

Tabla 43

Análisis de regresión del modelo completo para humedad

relativa: y2 LN vs. x1 LN, x2 LN, x3 LN, x4 LN, x5 LN

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	5	0.958353	0.191671	364.32	0.000
x1 LN	1	0.006486	0.006486	12.33	0.002
x2 LN	1	0.010540	0.010540	20.03	0.000
x3 LN	1	0.000653	0.000653	1.24	0.280
x4 LN	1	0.000150	0.000150	0.28	0.600
x5 LN	1	0.010048	0.010048	19.10	0.000
Error	18	0.009470	0.000526		
Total	23	3.17403			

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	13.93	2.79	5.00	0.000	
x1 LN	0.0827	0.0236	3.51	0.002	12.16
x2 LN	0.3636	0.0812	4.48	0.000	41.10
x3 LN	-0.00925	0.00830	-1.11	0.280	2.08
x4 LN	-0.087	0.164	-0.53	0.600	5.36
x5 LN	34.84	7.97	4.37	0.000	25.27

Ecuación de regresión

$$y2 LN = 13.93 + 0.0827 x1 LN + 0.3636 x2 LN - 0.00925 x3$$

$$LN - 0.087 x4 LN + 34.84 x5 LN$$

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad.(pred)
0.0229369	99.02%	98.75%	98.02%

Fuente: Programa Minitab

Evaluando el ajuste del modelo a los datos experimentales obtenidos con el programa Minitab se muestra la ecuación de regresión del modelo completo para la humedad relativa interior del domo (H_{Ri}) definido por y₂.

$$\hat{y}_2 = 13.93 + 0.0827X_1 + 0.3636X_2 - 0.00925X_3 - 0.087X_4 + 34.84X_5 \dots (\theta_1)$$

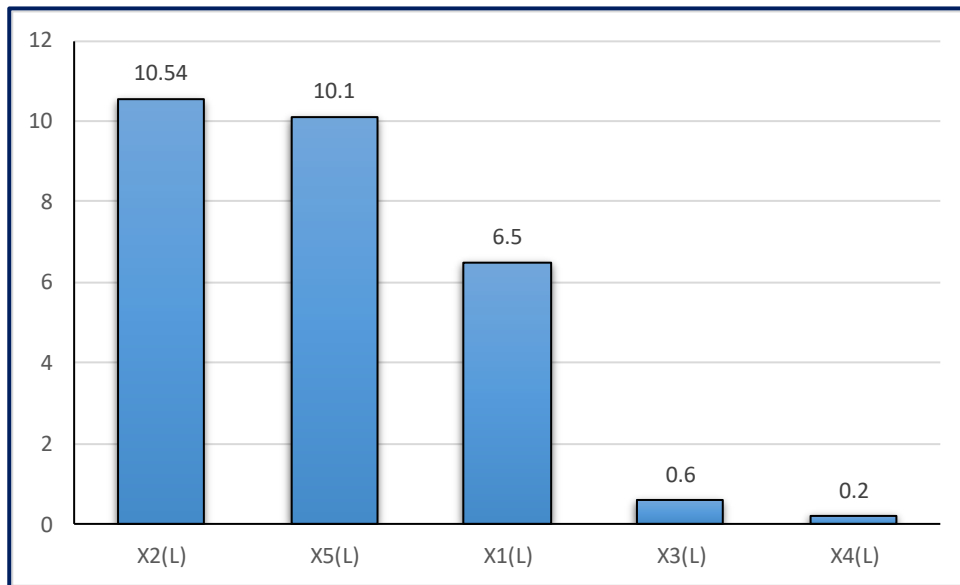


Figura 22. Varianza en función de las fuentes de variabilidad.

$\Sigma x_i = 0.027877$ (Regresión):	74.64%
Error = 0.009470	: <u>25.36%</u>
Total = 0.037347 (variab. total)	:
	100.00%
<hr/>	
$x_2+x_5+x_1 = 0.027074$	(72.49%)
$x_2 = 0.01054$	28.22%
$x_5 = 0.010048$	26.90%
$x_1 = 0.006486$	<u>17.37%</u>

Del ajuste realizado, elaboramos el resumen del análisis de varianza para la humedad relativa en el interior del domo para el modelo completo representada en la Tabla (43), donde constatamos que el modelo explica con el 99.02% de la variabilidad total y el error asume una desviación estándar de 0.02294.

Tabla 44

Resumen del análisis de varianza del ajuste realizado con el modelo completo para la humedad relativa interior del domo

FV	GL	SC	MC	F	P_value
Modelo	5	0.958353	0.191671	364.32	0.000
Error Puro	18	0.009470	0.000526		
TOTAL	23	0.967823	0.0420793		

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSe}{SS_T} = 0.9902 \dots\dots (\text{coeficiente de determinación})$$

$$R = 0.9951 \dots\dots\dots (\text{Coeficiente de correlación múltiple})$$

$$S = 0.02294 \dots\dots\dots (\text{Desviación estándar})$$

4.2.2.2. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático para el modelo simplificado de la HRi.

De los resultados obtenidos con el programa Minitab, se muestra la tabla del ANOVA para el modelo completo y la tabla t - Student de sus coeficientes de regresión individual, cuyos valores obtenidos tanto de la prueba F-Fisher de regresión grupal y la prueba t-Student de regresión individual indican que en ambas pruebas se rechaza la hipótesis nula H_0 (para un nivel de confianza del 95%, o $\alpha \leq 0.05$) para las variables X_1 , X_2 y X_5 que corresponde a la temperatura exterior (T_{ex}), Humedad Relativa exterior (HR_e) y la Presión Atmosférica local (P_{atm}). No se rechazan la hipótesis nula H_0 para las variables X_3 y X_4 que corresponden al tiempo (t) y la temperatura del acumulador PCM23 (T_{PCM}), con la cual estas 2 variables no se consideran en el modelo por no ser significativos. Resultando la ecuación de regresión simplificado que considera solo los términos significativos. Para lo cual se obtiene el ANOVA para el modelo simplificado con los términos significativos ($\alpha \leq 0.05$), que se indica en la tabla del modelo simplificado:

Tabla 45

Análisis de regresión para el modelo simplificado de la humedad relativa interior: y_2 LN vs. x_1 LN, x_2 LN, x_4 LN

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
Regresión	3	0.95644	0.318814	560.20	0.000
x1 LN	1	0.01441	0.014412	25.32	0.000
x2 LN	1	0.01288	0.012876	22.62	0.000
x5 LN	1	0.01199	0.011989	21.07	0.000
Error	20	0.01138	0.000569		
Total	23	3.17403			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad.(ajustado)	R-cuad.(pred)
0.0238560	98.82%	98.65%	98.13%

Fuente: Programa Minitab

Coefficientes

Término	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante	13.64	2.84	4.80	0.000	
x1 LN	0.0930	0.0185	5.03	0.000	6.92
x2 LN	0.3935	0.0827	4.76	0.000	39.41
x5 LN	35.18	7.66	4.59	0.000	21.60

Ecuación de regresión

$$y_2 \text{ LN} = 13.64 + 0.0930 x_1 \text{ LN} + 0.3935 x_2 \text{ LN} + 35.18 x_5 \text{ LN}$$

El modelo que se ajusta a los datos experimentales, considerando solo los términos significativos es la ecuación de regresión del modelo simplificado igual a:

$$\hat{y}_2 = 13.6388 + 0.093X_1 + 0.3935X_2 + 35.179X_5 \quad \dots (\theta_3)$$

Esta ecuación representada en variables naturales corresponde a:

$$HR_i = 13.6388 + 0.093T_{ex} + 0.3935HR_e + 35.179P_{atm} \quad \dots (\theta_4)$$

La tabla (45) muestra el resumen de los resultados del ANOVA para la humedad relativa interior del domo (y_2) del modelo simplificado, el cual considera solo los términos significativos descrito por la ecuación (θ_4), el cual explica con el 98.8% de la variabilidad total y el error asume una desviación estándar de solo 0.0229 verificándose casi el mismo valor alcanzado por el modelo completo.

Tabla 46

Resumen de los resultados del ANOVA del modelo simplificado para la humedad relativa interior del domo.

FV	GL	SC	MC	F _{cal}	P_value
Modelo	5	0.95836	0.19167	364.41	1.997 e ⁻¹⁷
Error Puro	18	0.0094677	0.00052598		
TOTAL	23	0.96782	0.042079		

$$R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSe}{SS_T} = 0.988 \quad \dots \text{(coeficiente de determinación)}$$

$$R = 0.994 \quad \dots \text{(Coeficiente de correlación múltiple)}$$

$$S = 0.0229 \quad \dots \text{(Desviación estándar)}$$

4.2.2.3. Análisis y discusión de la verificación gráfica del residuo y parámetros estadísticos para adecuabilidad del modelo de la HRI.

El comportamiento de la distribución del residuo generado por el ajuste se muestra en la prueba grafica del residuo en el cual hay cuatro gráficas de residuales de la Humedad relativa (y_2) obtenidas para su evaluación. En la figura se muestra la prueba de normalidad gráfica del residuo, en la cual todos

los puntos están formando una línea recta. Esto indica que la distribución de los datos es normal, cumpliéndose el supuesto de normalidad. Igualmente, la figura muestra los residuales en función de los valores ajustados de y_2 . Aquí hay aleatoriedad en la distribución de los puntos (casi con la misma cantidad de puntos negativos y positivos), lo que indica que no hay correlación de los datos, cumpliéndose el supuesto de independencia. La figura también muestra los residuales versus los valores predichos. Igualmente muestra los residuos en función de la variable ajustadas. También aquí hay aleatoriedad con casi igual números de puntos positivos y negativos, lo que sugiere que no hay problema de multicolinealidad o correlación serie de la información suministrada.

Concluyéndose, por tanto, la prueba de normalidad gráfica ya que los datos están normalmente distribuidos dentro de la banda de confianza, aunque con pequeño sesgo positivo y negativo en la parte central. Las gráficas tanto de los residuales versus valores ajustados y residuales versus las variables ajustadas muestran que hay aleatoriedad o independencia, que indica que no hay problemas de heterocedasticidad, ya que indica que se cumple: el supuesto de igualdad de varianza de los errores, así como del supuesto de independencia. La prueba t-student, obtenida con el programa Minitab indican que son significativas con el modelo simplificado, las variables: X_1 , X_2 y X_5 que corresponden a la temperatura exterior (T_e), Humedad relativa exterior (H_{Re}) y presión atmosférica (P_{atm}), los cuales indican que no presentan problemas de Multicolinealidad. El valor del Durbin Watson (DW) es relativamente bajo (0.853045), cercano a 1, que podría tener problema de Auto correlación; sin embargo, aquí esto se puede ignorar porque el problema no involucra series de tiempo. Por otro lado, la estadística de prueba t-Student para los datos obtenidos se cumple, respaldado por las pruebas de normalidad de las observaciones y la homogeneidad de varianzas. Respecto a este último se está utilizando hoy en día: “El coeficiente de variación (CV)” como instrumento para validar que los datos son homogéneos, resultando un CV bajo (2.39%) obtenido anteriormente lo que garantiza el Modelo obtenido.

Por lo tanto, de las pruebas gráficas del residuo y del análisis realizado, nos permite determinar que el modelo de regresión lineal simplificado obtenido

para la humedad relativa interior del domo (y_2) es confiable, respaldado por las pruebas correspondientes.

4.2.2.4. Gráfica de la superficie de respuesta y curvas de nivel del modelo simplificado de la HRi.

A partir del modelo lineal ajustado y validado por las pruebas del residuo, y parámetros estadísticos, construimos la gráfica para la humedad relativa interior del domo (\hat{y}_2), para lo cual la ecuación simplificada está dada por:

$$\hat{y}_2 = 13.6388 + 0.093X_1 + 0.3935X_2 + 35.179X_5$$

Expresando esta ecuación en variables originales, resulta:

$$HR_i = e^{13.6388} \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935} \cdot P_{atm}^{35.179}$$

$$HR_i = 838,022.31 \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935} \cdot P_{atm}^{35.179}$$

Considerando la presión atmosférica aproximadamente constante como promedio trimestral de: $P_{atm} = 0.721056$ bar, resulta la humedad relativa interior simplificado igual a:

$$HR_i = 838,022.31 \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935} \cdot (0.721056)^{35.179}$$

$$HR_i = 8.447863 \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935} \cong 8.45 \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935}$$

Cuya ecuación linealizada, está dado por:

$$HR_i = 2.134 + 0.093T_{ex} + 0.3935HR_e \quad \dots (\Delta 1)$$

Estos resultados de los modelos simplificados nos permitieron analizar el comportamiento de la humedad relativa interior del domo (HR_i), como promedio trimestral, durante las 24 horas del día, para lo cual se conoce la temperatura exterior (T_{ex}), Humedad Relativa exterior (HR_e) y la presión atmosférica (P_{atm}) que fueron

medidos. Las gráficas correspondientes se indican en el anexo. Fue posible también desarrollar como modelo alternativo el ajuste vía Fourier, cuyos valores óptimos de temperatura (T_i) y humedad relativa fueron validados con la primera y segunda derivada.

Se desarrolló también para la gráfica en 3D, con el programa Matlab para el modelo linealizado simplificado dado por la ecuación ($\Delta 1$).

```
>> %Programa en Matlab para gráfica en 3D de la HRi.  
>> x1=[1.732245 1.651219 ..... 1.925707 1.824549]';  
>> x2=[4.044279 4.083733 ..... 3.953037 4.003933]';  
>> y2 = 2.134 + 0.093.*X1 + 0.3935.*X2;  
>> y2=[3.88653.8945 ..... 3.8686 3.8792]';  
>> X=[ones(size(x1)) x1 x2];  
>> b = regress (y2, X)  
b = 2.1340  
0.0930  
0.3935  
>> Scatter 3(x1, x2, y2, 'filled')  
>> hold on  
>> x1 fit = min (x1): 0.02: max(x1);  
>> x2 fit = min (x2): 0.02: max(x2);  
>> [x1Fit, X2Fit]= meshgrid (x1fit, x2fit);  
>> YFit = b(1) + b(2). * x1Fit + b(3). * x2Fit;  
>> mesh (x1Fit, x2Fit, YFit)  
>> contour (x1Fit, x2Fit, YFit)  
>> meshc (x1Fit, x2Fit, YFit)  
>> title ('Gráfica de la superficie respuesta y curva de Nivel de la HRi')  
>> Xlabel ('x1: Temperatura exterior')  
>> Ylabel ('x2: Humedad Relativa exterior')  
>> Zlabel ('y2: Humedad Relativa interior del domo')  
>> view (60,10)  
>> hold off.  
>> grid.
```

4.2.2.5. Cálculo del intervalo de confianza de los coeficientes de regresión y residuales y parámetros estadísticos del Modelo Simplificado

Se utilizó el programa Matlab para validar los resultados obtenidos con el programa Minitab, así mismo obtener los intervalos de confianza de: los coeficientes de regresión, los residuales y los parámetros estadísticos (R^2 , F y P) para 95% de confianza (significancia: $\alpha=0.05$) utilizando el comando: [b, bint, r, rint, stats]=regress($y_2, X, 0.05$). Resultando los intervalos de confianza y los parámetros estadísticos que se indican en la tabla (47).

Tabla 47

Intervalos de confianza de los coeficientes de regresión, residuales y parámetros estadísticos de la humedad relativa interior (HRI) para el modelo linealizado simplificado

b_i (coeficientes de regresión)	b_{int} (intervalos de confianza de los coeficientes de Regresión)
b ₀ = 13.64	b ₀ : 7.7125 - 19.5650
b ₁ = 0.093	b ₁ : 0.0545 - 0.1316
b ₂ = 0.3935	b ₂ : 0.2210 - 0.5661
b ₅ = 35.18	b ₅ : 19.1937 - 51.1643
r (residual)	r_{int} (intervalo de confianza de los residuos)
r ₁ = -0.0186	r ₁ : -0.0654 - 0.0281
r ₂ = -0.0011	r ₂ : -0.0496 - 0.0474
⋮	⋮
r ₂₃ = -0.0256	r ₂₃ : -0.0720 - 0.0207
r ₂₄ = -0.0251	r ₂₄ : -0.0714 - 0.0213
PARÁMETROS ESTADÍSTICOS (R^2, F, P)	
Stats =	
$R^2 = 98.82 \%$	F = 560.364 P = 0.0000, 0.0006

4.2.2.6. Cálculo del valor óptimo de la humedad relativa interior del domo para el modelo simplificado (y_{2opt})

Se determinó el valor óptimo del modelo simplificado Linealizado (con términos significativos) de la humedad relativa interior del domo (y_{2opt}) sujeto a las restricciones indicadas por las variables independientes (desde el valor mínimo hasta su valor máximo o para un valor fijo para un caso puntual),

utilizando el programa de Matlab, vía programación lineal por el método Simplex para el cálculo de la humedad relativa interior mínimo y máxima en el domo.

4.2.2.6.1. Cálculo de la humedad relativa interior mínimo (\hat{y}_{2min})

$$\begin{aligned} \text{Min } \hat{y}_2 &= 13.64 + 0.093x_1 + 0.3935x_2 + 35.18x_5 \text{ s.a.} \\ x_2 &\leq 4.226362 \quad (1) \\ x_5 &\leq -0.322863 \quad (2) \\ x_2 &\geq 3.090254 \quad (3) \\ x_5 &\geq -0.332359 \quad (4) \\ x_1 &= 3.477438 \quad (5) \end{aligned}$$

>> % Cálculo con el programa Matlab del valor mínimo de la humedad relativa interior del domo (y_2 , mín)

$$\begin{aligned} >> A = [1 \ 0 \ 0 \\ &\quad 0 \ 0 \ 1 \\ &\quad 0 \ -1 \ 0 \\ &\quad 0 \ 0 \ -1] \end{aligned} \Rightarrow A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$>> b = [4.226362 \ -0.322863 \ -3.090254 \ 0.332359]$$

$$>> f = [0.093 \ 0.3935 \ 35.18];$$

$$>> Aeq = [1 \ 0 \ 0];$$

$$>> beq = [3.477438];$$

$$>> x = \text{linprog}(f,A,b,Aeq,beq) \downarrow$$

Optimal solution found

$$x = 3.4774 \rightarrow x_1 = 3.4774 \rightarrow T_{ex} = e^{3.4774} = 32.37^\circ\text{C}$$

$$3.0903 \rightarrow x_2 = 3.0903 \rightarrow HR_e = e^{3.0903} = 21.98\%$$

$$-0.3324 \rightarrow x_5 = -0.3324 \rightarrow P_{atm} = e^{-0.3324} = 0.7179 \text{ bar}$$

- Reemplazando estos valores en la ecuación de regresión, se obtiene el valor mínimo de la Humedad Relativa interior del domo.

$$\text{Min } \hat{y}_2 = 13.64 + 0.093(3.477438) + 0.3935(3.09025) + 35.18(-0.332359)$$

$$\text{Min } \hat{y}_2 = \underline{3.4870} \Rightarrow \text{HR}_{i, \text{mín}} = e^{3.4870}$$

$\text{HR}_{i, \text{mín}} = 32.68\%$

Por lo tanto:

Este valor se verifica con los datos experimentales obtenidos (32%), Resultando la humedad relativa interior mínima de 33% con el modelo simplificado para una temperatura exterior de 32.37°C (con un desfase térmico de 2 hrs.), humedad relativa exterior de 21.98% (con un desfase térmico de 1 hr.) y para la presión atmosférica de 0.7175 bar (con un desfase térmico de 1 hr), lográndose un salto térmico respecto a la humedad relativa exterior de aproximadamente 10% que ocurre a las 3 p.m.

4.2.2.6.2. Cálculo de la humedad relativa interior máximo del domo ($\hat{y}_{2 \text{max}}$)

$$\text{Max } \hat{y}_2 = 13.64 + 0.093x_1 + 0.3935x_2 + 35.18x_5$$

s.a.

$$x_2 \leq 4.226362 \quad (1)$$

$$x_5 \leq -0.322863 \quad (2)$$

$$x_2 \geq 3.090254 \quad (3)$$

$$x_5 \geq -0.332359 \quad (4)$$

$$x_1 = 1.666448 \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \gg A &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \\ \Rightarrow A &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\gg b = [4.226362 \quad -0.322863 \quad -3.090254 \quad 0.332359]$$

$$\gg f = [0.093 \quad 0.3935 \quad 35.18];$$

$$\gg A_{\text{eq}} = [1 \quad 0 \quad 0];$$

```
>> beq = [1.666448];  
>> x = linprog(f,A,b,Aeq,beq);
```

Optimal solution found

$$\begin{aligned}x = 1.6664 &\rightarrow T_{ex} = e^{1.6664} = 5.29^{\circ}\text{C} \\4.2264 &\rightarrow HR_e = e^{4.2264} = 68.47\% \\-0.322863 &\rightarrow P_{atm} = e^{-0.322863} = 0.7241\text{bar}\end{aligned}$$

- Reemplazando estos valores en la ecuación de regresión, se obtiene el valor máximo de la Humedad Relativa interior del domo.

$$\text{Max } \hat{y}_2 = 13.64 + 0.093(1.6664) + 0.3935(4.2264) + 35.18(-0.322865)$$

$$\text{Max } \hat{y}_2 = \underline{4.0996729} \Rightarrow HR_{i, \max} = e^{4.0996729}$$

$HR_{i, \max} = 60.32\%$

Por lo tanto:

Este valor se verifica con los datos experimentales obtenidos (60.98%), resultando la Humedad relativa exterior máxima de 60.32% para el modelo simplificado, para una temperatura exterior de 5.39°C (con un desfase térmico de 2 hrs.), humedad relativa exterior de 68.47% (con un desfase térmico de 1 hr.) y para una presión atmosférica de 0.724 bar (sin desfase térmico, lográndose un salto térmico respecto a la Humedad Relativa exterior de 7.4% que ocurre a las 8 am.

4.3. Análisis del diseño factorial compuesto 2^3 de la temperatura (t_i) y humedad relativa (r_{hi}) en el interior del domo.

4.3.1. Análisis del diseño factorial compuesto 2^3 de la temperatura de la interior del domo (T_i)

4.3.1.1. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático del diseño factorial compuesto 2^3 del modelo completo de la T_i .

En el análisis de la varianza obtenido con el programa diseño experto para la temperatura interior del Domo (T_i) es hallada determinándose el coeficiente global (U) para cada ensayo con base al planeamiento del diseño factorial compuesto. En la columna de la izquierda tenemos las fuentes de variabilidad con los términos independientes: lineales, cuadráticos, interacciones y errores.

Los términos considerados significativos (nivel de significancia inferior a 5%) están indicados en las tablas (48) y (49) y sus variaciones están colocadas gráficamente en orden de tamaño en la figura (23) los términos más significativos son las lineales relativos a X_1 seguidos por X_3 demostrando que la cantidad de bloques de PCM23 (X_1) junto al espesor de aislamiento térmico del PER (X_3) ejercen una influencia predominante en la temperatura interior del Domo (Y_1). El tercero más influyente, es el término de interacción $X_1.X_3$ (cantidad de PCM23 y aislamiento térmico).

Considerando los tres primeros términos dependientes exclusivamente de X_1 y X_3 (los términos lineales de X_1 y X_3 y el de interacción X_1 y X_3 en ese orden), podemos decir que ellos se responsabilizan por el 99.84% de la variabilidad total. El término que contribuye con menor variabilidad es la lineal de X_2 .

Tabla 48

Análisis de varianza obtenida para la temperatura interior del Domo del modelo completo

Fuente	La suma de Cuadrados	df	Media Cuadrado	Valor - F	Valor-P	
Modelo	152.83	6	25.27	800.53	<0.0001	Significant
A- X_1	80.78	1	80.78	2538.77	<0.0001	
B- X_2	0.2190	1	0.2190	6.88	0.0210	
C- X_3	68.00	1	68.00	2137.00	<0.0001	
AB	0.0144	1	0.0144	0.4541	0.5122	
AC	3.81	1	3.81	119.70	<0.0001	
BC	0,0112	1	0.0112	0.3536	0.5623	
Residual	0.4136	13	0.0318			
Falta de ajuste	0.0112	8	0.0014	0.0173	1.0000	Not significant
Error puro	0.4025	5	0.0805			
Cor Total	153.25	19				

Tabla 49

Resúmen del ANOVA del ajuste para el modelo completo

Fuente de variabilidad	SC	GL	MC	F	P
Modelo	152.83	6	25.27	800.53	20.000
Falta de ajuste	0.0112	8	0.0014	0.0173	1.00
Error puro	0.4025	5	0.0805		
Total	153.25	19			

$R^2=0.9973$
 $R=0.998$
Desviación estándar del error total = 0.1784
CV= 1.15%

De esta forma podemos constatar que la temperatura interior del domo, dentro de los límites establecidos, dependen principalmente de la cantidad de PCM23 y del espesor de aislamiento térmico del PER, concluyéndose prácticamente que estos controlan la temperatura interior del domo. Considerando el modelo matemático completo es necesario indicar que la variable X2 correspondiente al ancho de la cámara de aire, influye con menor significancia en la temperatura interior del domo, Esto indica que su ancho puede ser menor a lo establecido (10 cm), teniendo en cuenta que esto solo no afecte el recorrido del flujo del aire caliente por el interior del domo.

Atendiéndose ahora para un ajuste polinomial de los datos obtenidos, se planteó inicialmente a un modelo cuadrático considerando la presencia de la curvatura. La ecuación que sigue presenta un polinomio completo de segundo orden para 3 variables.

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + B_{12} X_1 X_2 + B_{13} X_1 X_3 + B_{23} X_2 X_3 + B_{11} X_1^2 + B_{22} X_2^2 + B_{33} X_3^2 \quad (\alpha)$$

Los coeficientes del polinomio (β_i) son obtenidos simplemente dividiendo los valores de los efectos (localizados en la columna de la derecha) por dos, referentes a los 2 niveles que son tomados en cuenta en el cálculo de los efectos. De esta forma obtenemos la ecuación del ajuste hecho para un modelo completo en variables codificadas de la temperatura interior del domo (\hat{y}_1).

$$\hat{y}_1 = 15.52 + 2.43X_1 - 0.13X_2 + 2.23X_3 + 0.013X_1^2 + 0.0046X_2^2 - 0.02X_3^2 - 0.043X_1X_2 + 0.68X_1X_3 - 0.04X_2X_3$$

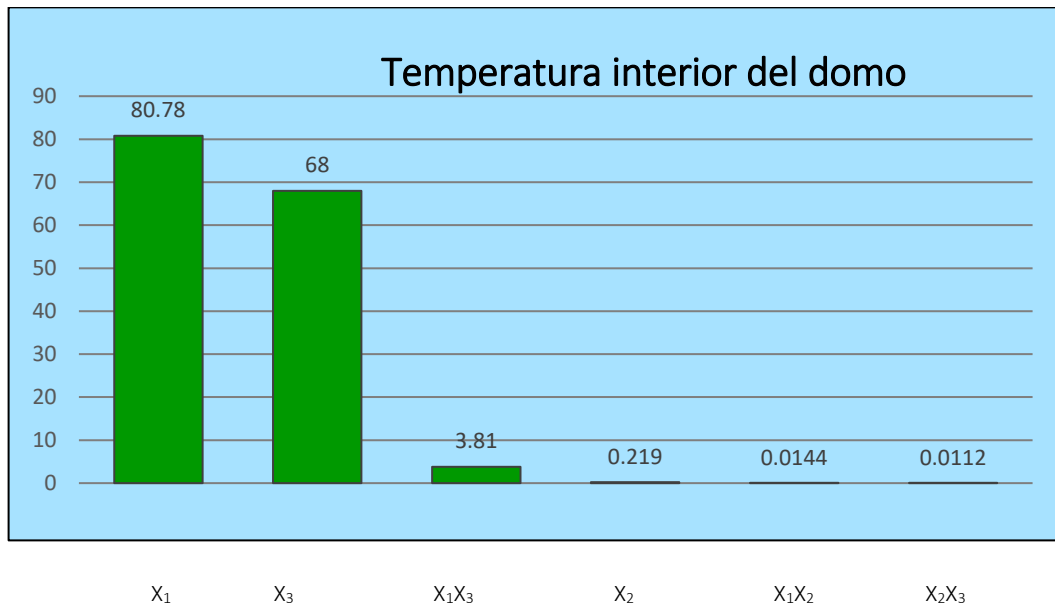


Figura 23. Valor de la varianza en función de las fuentes de la variabilidad relativa a la temperatura interior del Domo.

4.3.1.2. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático del diseño factorial compuesto 2^3 del modelo simplificado del Ti.

La tabla (50) muestra los valores del análisis de varianza hecha para el ajuste considerando el modelo de la ecuación simplificada, donde verificamos que la variabilidad explicada es del 99.71% (revelada por el índice R^2) y el error asume una desviación estándar igual a 0.28. Podemos verificar también los valores de la variabilidad del error, subdividida en error puro que se aproxima al error experimental y el error por falta de ajuste que está ligado al desvío entre los entre los datos obtenidos y el polinomio ajustado.

Este último puede ser reducido en la en la medida que se va sofisticado el modelo matemático usado para el ajuste que en este caso corresponde a un error no significativo por falta de ajuste de 0.99.

Tabla 50

ANOVA del diseño factorial compuesto 23 del Modelo Simplificado del Ti

Fuente	La suma de Cuadrados	df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	152.83	4	38.20	1304.26	<0.0001	Significant
A- X_1	80.78	1	80.78	2758.00	<0.0001	
B- X_2	0.2190	1	0.2190	7.48	0.0154	
C- X_3	68.00	1	68.00	2321.53	<0.0001	
AC	3.81	1	3.81	130.04	<0.0001	
Residual	0.4393	15	0.0293			
Falta de ajuste	0.0369	10	0.0037	0.0458	1.0000	Not significant
Error puro	0.4025	5	0.0805			
Total(Corr)	153.25	19				

Entre tanto, si consideramos un modelo sólo con los términos más significativos indicados en la tabla (49), tenemos:

$$\hat{y} = 15.52 + 2.43X_1 - 0.13X_2 + 2.23X_3 + 0.68X_1X_3$$

Del ajuste polinomial de los datos obtenidos, constatamos de la ecuación que el modelo matemático de la temperatura es lineal con interacción, no siendo significativos los factores cuadráticos debido a la no existencia de curvatura.

La tabla (51) muestra el análisis de varianza del ajuste considerando el modelo simplificado, el cual explica con el 99.6% de la variabilidad total, manteniendo prácticamente el mismo valor alcanzado por el modelo completo. Analizando el error estándar (en variable codificada) constatamos que ello pasó de 0.28 obteniendo en el modelo completo a 0.24 en el modelo significado, con una diferencia de aproximadamente 14.5%. Respecto al error promedio de los residuos (MAE), pasó de 0.066 obtenido en el modelo completo a 0.137 en el modelo significado una diferencia aproximadamente de 51.7%. El estadístico de Durbin-Watson (DW) para la prueba de los residuos si hay alguna correlación significativa basada en el orden en que se presentan los datos indican que en el modelo completo es de $DW = 2.44$ ($P = 0.69$) y el modelo significativo es de $DW = 2.27$ ($P = 0.82$). Ambas están alrededor de 2, siendo más cercano

y menos significativo el modelo simplificado. Puesto que el valor de “P” y (probabilidad) Es mayor que 5% no hay indicación de auto correlación serial en los residuos con un nivel de significancia de 5%.

4.3.1.3. Análisis y discusión de la verificación gráfica del residuo y parámetros estadísticos para la adecuabilidad del modelo matemático de la Ti

Observando el residuo producido por el modelo simplificado, presentado en los gráficos de los residuos (similar a la figura (21)), verificamos una distribución bastante satisfactoria, demostrando que la simplificación prácticamente no incurre en ningún perjuicio para el ajuste. Del Análisis del residuo, verificamos el supuesto de normalidad (gráfica de probabilidad normal versus residuos) en el cual los puntos se apegan a la línea con P - valor mayor a 5% (no significativo) que prueba que la normalidad no es rechazada. La prueba gráfica de supuesto de independencia (gráfica de residuos versus el tiempo u orden de corridas) se muestra que no se observa ninguna tendencia en los puntos (que suban o bajen) siendo esta aleatorio, concluyéndose que la prueba gráfica de la independencia de los errores no se rechaza. El supuesto de varianza constante (gráfica de residuales contra los valores predichos o contra los variables X_1 y X_2) se muestra que los puntos caen aleatoriamente en el sentido vertical dentro de una banda horizontal, donde se observa una varianza relativamente constante, que indican que la prueba gráfica de varianza constante no es rechazada.

Concluyéndose entonces que el residuo asume características deseadas, las cuáles son la base para todo y cualquier análisis relacionado al modelo matemático desarrollado.

Tabla 51

Análisis de varianza de ajuste realizado con el modelo simplificado

Fuente de variabilidad	SC	GL	MC	F	P
Modelo	152.83	4	38.20	1304.26	0.0001
Falta de ajuste	0.0369	10	0.0037	0.0458	1.000
Error puro	0.4025	5	0.0805		

Total	153.25	19
-------	--------	----

R²=0.9971

R=0.9985

Desviación estándar del error total = 0.1711

CV= 1.1%

4.3.1.4. Gráficas de la superficie de respuesta y curvas de nivel del modelo matemático obtenida del diseño factorial compuesto 2³ de la temperatura interior del domo (T_i)

Después de verificada la adecuabilidad del modelo por la aprobación del residuo, analizaremos el comportamiento de los variables de estudio.

Partiendo ahora con base en el modelo empírico hallado, iniciamos hallando la superficie de respuesta de la temperatura interior del Domo (\hat{y}_1) en función de dos variables independientes (X₁ y X₃) según el modelo simplificado, que se indica a continuación:

$$\hat{y} = 15.52 + 2.43 \left(\frac{N - 60}{10} \right) - 0.13 \left(\frac{E - 75}{2.5} \right) + 0.68 \left(\frac{N - 60}{10} \right) \left(\frac{E - 75}{2.5} \right)$$

Construyendo la superficie respuesta a través del modelo ajustado con base a la ecuación anterior obtenemos las gráficas y sus curvas de nivel correspondientes, en el cual verificamos que la superficie de respuesta corresponde a un plano inclinado de los valores de temperatura interior (T_i) generados por las diferentes combinaciones de cantidad de PCM23 (N) y espesor de PER (E). Las curvas de nivel muestran las líneas de contorno para las respuestas constantes (T_i) en el plano determinado por N y E, observando que como la superficie respuesta es un plano, la gráfica de contorno contiene líneas rectas paralelas con ligera inclinación indicando que la contribución de la interacción en el experimento es insignificante, es decir el coeficiente β_{13} (0.68) es pequeño.

4.3.2. Análisis del diseño factorial Compuesto 2^3 de la humedad relativa interior del domo (HRi)

4.3.2.1. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático del diseño factorial compuesto 2^3 , del modelo completo de la HRI

La tabla (52) muestra los resultados del análisis de varianza obtenido con el programa diseño experto para la humedad relativa interior del Domo (HR_i), que fue hallado a partir de los datos obtenidos de la temperatura interior (T_i) y las condiciones ambientales de la temperatura exterior (T_{ex}) y humedad relativa exterior (HR_e) utilizando la herramienta calculadora de la humedad (<http://www.lente.es>) indicado para cada ensayo en base al planteamiento del diseño factorial compuesto 2^3 .

Tabla 52

Análisis de varianza obtenidos para la humedad relativa interior del Domo del modelo completo.

Fuente	La suma de Cuadrados	df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	985.84	9	109.54	298.68	<0.0001	Significant
A-X ₁	518.23	1	518.23	1413.08	<0.0001	
B-X ₂	0.7734	1	0.7734	2.11	0.1771	
C-X ₃	456.19	1	456.19	1243.93	<0.0001	
AB	0.245 0	1	0.2450	0.6681	0.4328	
AC	5.44	1	5.44	14.85	0.0032	
BC	0,0450	1	0.0450	0.1227	0.7334	
A ²	2.69	1	2.69	7.33	0.0221	
B ²	0.0298	1	0.0298	0.0813	0.7814	
C ²	2.47	1	2.47	6.74	0.0267	
Residual	3.67	10	0.3667			
Falta de ajuste	0.9990	5	0.1998	0.3744	0.8476	Not significant
Error Puro	2.67	5	0.5337			
Cor Total	989.51	19				

Resultando los términos más significativos indicados en la tabla del ANOVA que son representados de color rojo en la que constatamos que los 5 términos más significativos son vinculados a X1 y X3 referidos a la cantidad del

acumulador PCM23 (N) y el espesor del aislamiento térmico del PER (E), que se responsabilizan con el mayor porcentaje de la variabilidad total respecto a la humedad interior del Domo (HRi). La mayor influencia es proveniente de los términos lineales X_1 y X_3 seguido de la interacción $X_1 \cdot X_3$, y en menor proporción por los efectos de los cuadráticos puros X_1^2 y X_3^2 , como se muestra en la figura (24). Observando los signos del modelo matemático de los términos lineales y de interacción de X_1 y X_3 son negativos, indicando una disminución de la humedad relativa interior (HRi) a medida que estos factores aumentan, lo que sucede en lo contrario con la temperatura interior (T_i) que aumenta. Comportándose por tanto en forma inversa mientras uno aumenta la otra disminuye.

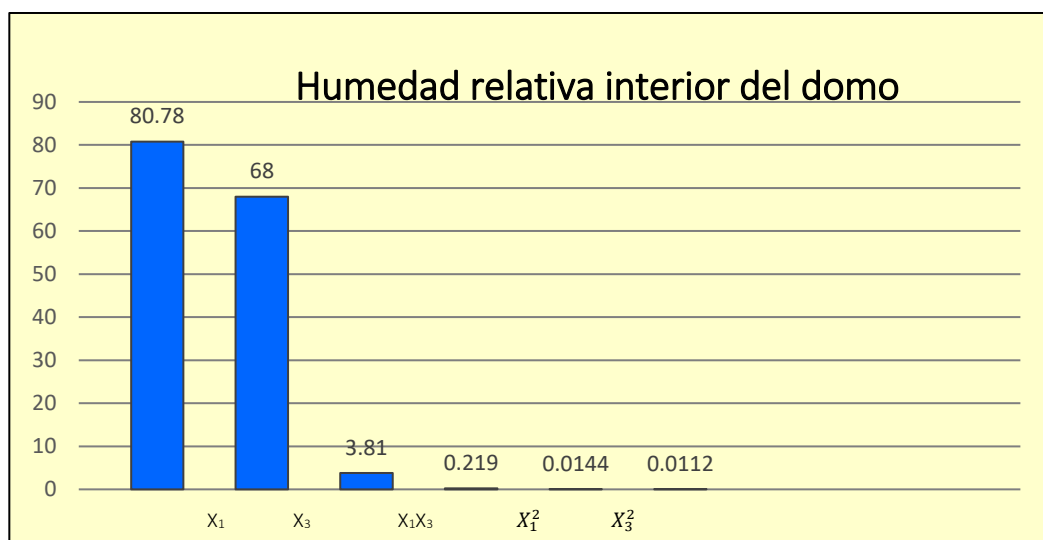


Figura 24. Valor de la varianza en función de las fuentes de la variabilidad con relación a la humedad relativa interior del domo.

4.3.2.2. Análisis y discusión del ANOVA y modelamiento matemático del diseño factorial compuesto 2^3 , del modelo simplificado de la HRi

Efectuando el ajuste de los datos a partir del modelo de la ecuación (α) y despreciando los términos no significativos obteniendo el modelo matemático ajustado de la humedad relativa interior del domo (Y_2) en variables codificadas que se indica en la siguiente ecuación.

$$y_2 = 41.55 - 6.16X_1 - 5.78X_3 - 0.825X_1X_3 + 0.4362X_1^2 + 0.4186X_3^2$$

Sustituyendo la transformación de variables codificadas a variables naturales se tiene la humedad relativa interior en variables naturales indicadas en la siguiente ecuación.

$$y_2 = 41.55 - 6.16\left(\frac{N-60}{10}\right) - 5.78\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) - 0.825\left(\frac{N-60}{10}\right)\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) + 0.4362\left(\frac{N-60}{10}\right)^2 + 0.4186\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right)^2$$

Evaluando el ajuste obtenido elaboramos el análisis de varianza representada en las tablas (53) y (54) donde constatamos que el 99.52 % de la variabilidad total es explicada por el modelo compuesto, con una desviación estándar del error igual 0.58%. Podemos verificar también los valores de la variabilidad del error, subdividida en error puro y error por falta de ajuste, siendo este último no significativo. Tales resultados son considerados con niveles aceptables.

Tabla 53

Análisis de varianza del modelo ajustado significativo para la humedad relativa interior del Domo

Fuente	La suma de Cuadrados	Df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	984.74	5	196.95	579.19	<0.0001	Significant
A- X_1	518.23	1	518.23	1524.00	<0.0001	
C- X_3	456.19	1	456.19	1341.58	<0.0001	
AC	5.45	1	5.45	16.01	0.0013	
A^2	2.77	1	2.77	8.15	0.0127	
C^2	2.55	1	2.55	7.50	0.0160	
Residual	4.76	14	0.3400			
Falta de ajuste	2.09	9	0.2325	0.4356	0.8683	Not significant
Error Puro	2.67	5	0.5337			
Cor Total	989.51	19				

Tabla 54

Resumen del ANOVA del modelo ajustado significativo para la humedad relativa interior del Domo.

Fuente de variabilidad	SC	GL	MC	F	P
-Modelo	984.74	5	196.95	579.19	<0.0001
-Falta de ajuste	2.09	9	0.2325	0.4356	0.8683
-Error Puro	2.67	5	0.5337		
Total	989.51	19			

R2 = 0.995

Desviación del error estándar total = 0.583%

4.3.2.3. Análisis y discusión de la verificación gráfica del residuo y parámetros estadísticos para adecuabilidad del modelo matemático del HRi.

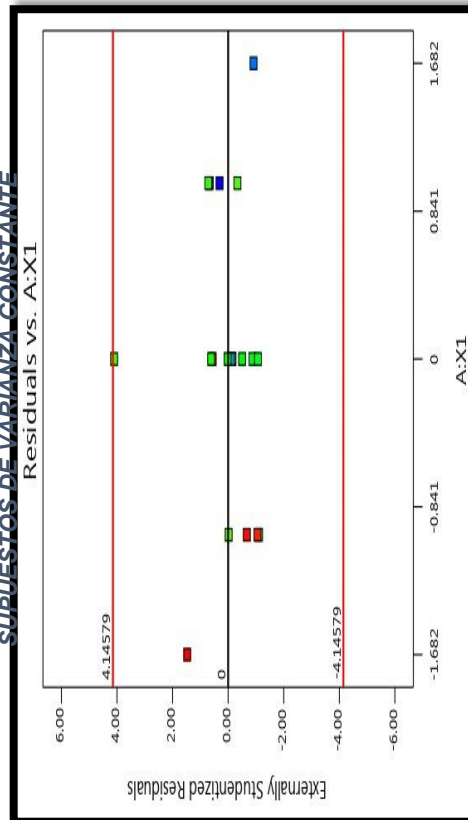
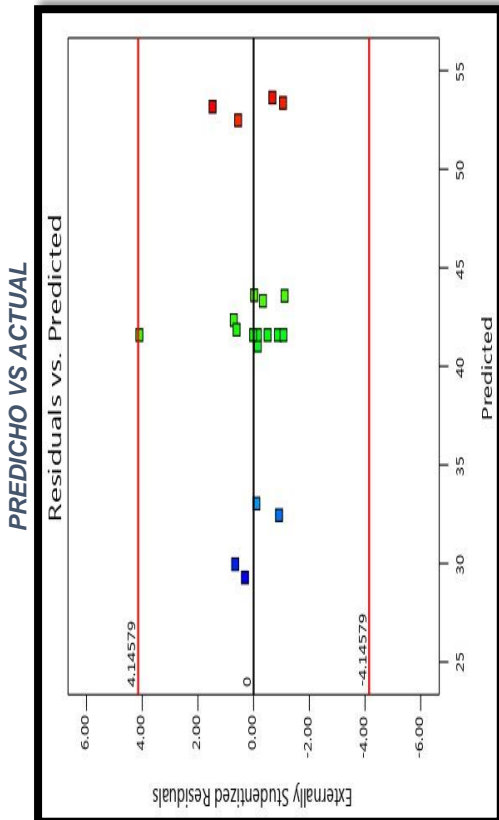
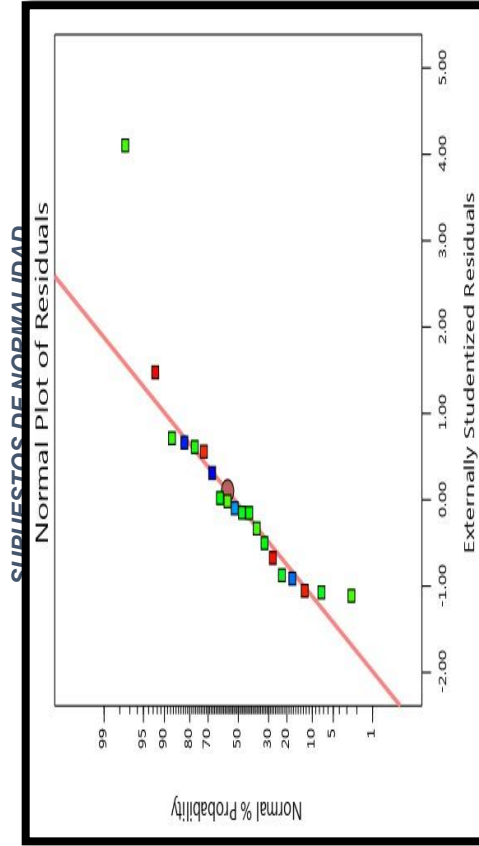
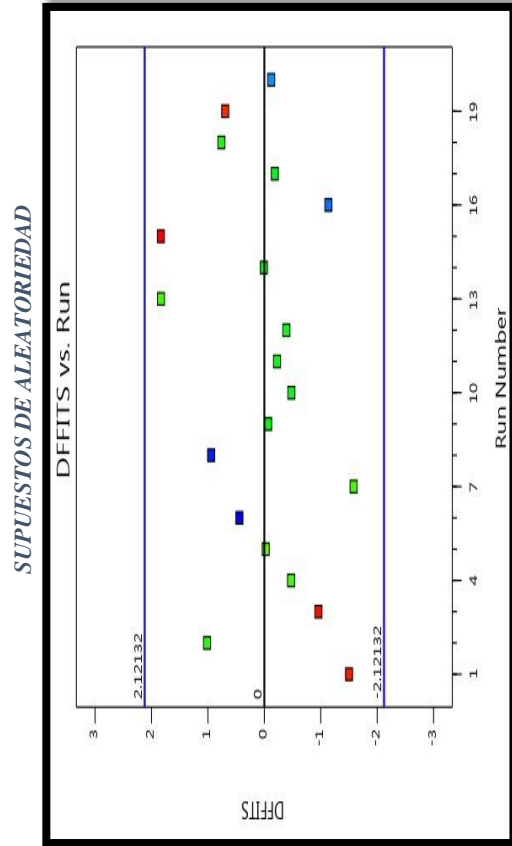


Figura 25. Gráfico de residuos de la humedad relativa

Fuente: Programa experto

Consideramos importante la verificación gráfica del residuo que confirme sus características deseadas, como ser independientes e idénticamente distribuido (supuesto de Independencia o aleatorio) como se muestra en la gráfica de residuos, luego los puntos asumen una distribución bien próxima de una distribución normal. La representación gráfica de los valores normalizados de residuo (supuesto de normalidad) obtenido por el ajuste de la humedad relativa, utilizando el modelo simplificado se muestra, donde la proximidad de los puntos a la línea (recta normal) demuestra su normalidad; finalmente el supuesto de varianza constante (gráfica de residuales contra los valores predichos) se muestran en la figura (25) gráfica de residuos, en la cual los puntos caen en forma relativamente vertical dentro de una línea horizontal concluyéndose por lo tanto la adecuabilidad del modelo para la aprobación de la verificación gráfica del residuo. Demostrándose en todos los casos que la hipótesis nula para los residuos no es rechazada (no siendo significativo sus valores). Con la base de estos resultados se verifica la adecuabilidad del modelo por la aprobación gráfica del residuo, considerando estos completamente satisfactorio.

4.3.2.4. Gráficas de la superficie de respuesta y curvas de nivel del modelo matemático obtenido del diseño factorial compuesto 2^3 de la humedad relativa interior del domo.

A partir del modelo ajustado y validado por el análisis del residuo, se construye la superficie de respuestas presentada en la figura (28) por las gráficas de superficie y sus respectivos curvas de nivel, en la que se revela el comportamiento de la cantidad de placas de PCM23 y el espesor de aislamiento térmico del PER (E) ante la variable respuesta que es la humedad relativa (Y_2), manifestándose constante el ancho de la cámara de aire (C) en su valor intermedio que se muestra prácticamente poco influyente. Adicionalmente se muestran los gráficos de comportamiento de la humedad relativa (Y_2) según la variación de la cantidad de PCM23 (N) y el ancho de la cámara del aire (C), manteniéndose constante en su valor intermedio el espesor del aislamiento térmico del PER (E).

Analizando la superficie de respuesta de figura (28) del comportamiento de la humedad relativa (Y_2) se puede concluir que es muy importante la influencia de la cantidad de PCM23 luego espesor del aislamiento térmico del PER (E) y en menor proporción del ancho de la cámara del aire (C), por lo que ambos gráficos resultan el mayor interés para el estudio; pudiéndose completarse también el efecto que tiene la influencia de E y C en Y_2 manteniéndose constante N en su valor intermedio.

Complementariamente mediante el programa diseño experto que se indican en las tablas (65), (66) y (67), nos permitió seleccionar el tipo de modelo matemático a utilizar considerando el desarrollo del ANOVA en cada uno de los tres aspectos siguientes suma de cuadrados del modelo secuencial que permite seleccionar el polinomio de orden más alto cuando los términos adicionales son significativos, la prueba por falta de ajuste que se requiere, que el modelo seleccionado no tenga falta de ajuste significativo y el resumen de parámetros estadísticos del modelo de modo que minimiza el PRESS o de manera equivalente que maximiza el R^2 de predicción, resultando como sugerencia de los 3 ANOVAS analizadas seleccionar el modelo cuadrático sugerido.

4.3.3. Resultados del modelo completo y simplificado utilizando el programa de diseño experto

Primero. Se selecciona el tipo de modelo a utilizarse, considerando 3 aspectos: la suma de cuadrados según el modelo secuencial, el resumen estadístico del modelo y la prueba de falta de ajuste. Del primer aspecto se selecciona el polinomio de orden superior con términos adicionales significativos, del segundo aspecto se selecciona el modelo que tenga mayor R^2 ajustado y predictivo y del tercer aspecto se selecciona el modelo cuyo error por falta de ajuste no es significativo.

Segundo. Para el tipo de modelo seleccionado, se obtiene el análisis de varianza (ANOVA) en variables codificadas para el Modelo Completo, obteniéndose también el resumen del ANOVA para el modelo completo y la ecuación de regresión del modelo completo en variables codificadas y los parámetros estadísticos del modelo completo.

Tercero. Igual al segundo caso se obtiene el ANOVA para el Modelo Simplificado, considerando solo los términos significativos obtenidos del ANOVA del modelo completo, obteniéndose también la ecuación de regresión con términos significativos en variables codificadas y variables naturales y sus parámetros estadísticos del modelo simplificado.

Cuarto. Se determinaron los valores óptimos sujeto a las restricciones indicadas en variables codificadas y naturales del modelo simplificado.

Quinto. Se presentan las pruebas gráficas del residuo que consideran los supuestos de normalidad, igualdad de varianzas aleatoriedad e histograma de la distribución de frecuencias (mostrado anteriormente).

Sexto. Finalmente se presenta las gráficas de las superficies de respuestas y sus respectivas curvas de nivel del modelo simplificado que nos permite analizar su comportamiento de las variables dependientes en función de las variables independientes más significativas. Se complementa en el anexo con el cálculo del Durbin Watson (DW) que nos permite identificar la presencia de auto correlación.

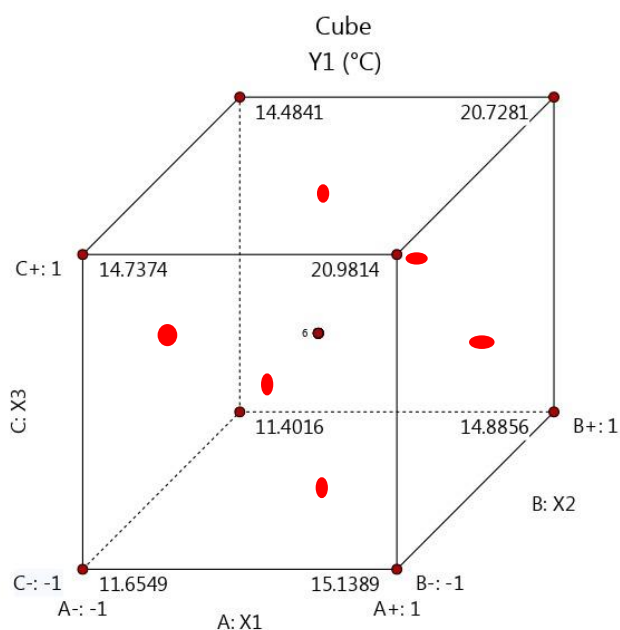
A continuación, se muestra los resultados obtenidos con el programa diseño experto para la temperatura (y_1) y humedad relativa (y_2) según los pasos indicados.

Tabla 55

Datos en variables codificadas y variable respuesta de la temperatura y 1

N°	VARIABLES CODIFICADAS			VARIABLES DE RESPUESTA
	X1	X2	X3	Y1 (°C)
1	-1	-1	-1	11.6
2	1	-1	-1	15.12
3	-1	1	-1	11.48
4	1	1	-1	14.87
5	-1	-1	1	14.74
6	1	-1	1	21.06
7	-1	1	1	14.51
8	1	1	1	20.62
9	0	0	0	15.54
10	0	0	0	15.72

11	0	0	0	15.6
12	0	0	0	15.7
13	0	0	0	14.95
14	0	0	0	15.5
15	-1.682	0	0	11.41
16	1.682	0	0	19.66
17	0	-1.682	0	15.72
18	0	1.682	0	15.31
19	0	0	-1.682	11.71
20	0	0	1.682	19.21



4.3.3.1. Análisis de variables codificadas de la temperatura interior del domo (Y1)

4.3.3.1.1. Para la selección del tipo de modelo a utilizar

Tabla 56

Suma de cuadrados del modelo secuencial

	La suma de Cuadrados	Media Df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Media vs total	4805.98	1	4805.98			
Lineal vs media	149.00	3	49.67	187.06	<0.0001	
2 Ft vs lineal	3.83	3	1.28	40.17	<0.0001	Suggested
Cuadrático vs 2Ft	0.0060	3	0.0020	0.0493	0.9847	

Cúbico	vs	0.0051	4	0.0013	0.0190	0.9991	Aliased
cuadrático							
Residual		0.4025	6	0.0671			
total		4959.18	20	247.96			

Suma de cuadrados del modelo secuencial. - Se selecciona el polinomio de orden superior donde los términos adicionales son significativos y el modelo no tiene alias.

Tabla 57

Resumen de parámetros estadísticos del modelo

Fuente	Std Dev.	R ²	Ajuste R ²	Predicho R ²	Press	
Lineal	0.5153	0.9723	0.9671	0.9500	7.65	
2FI	0.1784	0.9973	0.9961	0.9969	0.4821	Suggested
Cuadrático	0.2019	0.9973	0.9949	0.9960	0.6194	
Cubico	0.2590	0.9974	0.9917	0.9962	0.5874	Aliased

Elaboración propia

Estadísticos de resumen del modelo. - Se enfocan en el modelo que minimiza “PRESS” o de manera equivalente que maximiza R² de predicción.

Tabla 58

Prueba por falta de ajuste

Fuente	La suma de Cuadrados	Media Df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Lineal	3.85	11	0.3496	4.34	0.0586	
2Ft	0.0112	8	0.0014	0.0173	1.0000	Suggested
Cuadrático	0.0051	5	0.0010	0.0128	0.9999	
Cubico	0.0000	1	0.0000'	0.0005	0.9836	Aliased
Error puro	0.4025	5	0.0805			

Pruebas por falta de ajuste. - se requiere que el modelo seleccionado no tenga falta de ajuste significativo.

4.3.3.1.2. Análisis de varianza en variables codificadas del modelo completo de la temperatura interior (Y₁)

Tabla 59

Análisis de varianza de la temperatura interior del domo para el modelo completo

Fuente	La suma de Cuadrados	df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	152.83	6	25.27	800.53	<0.0001	Significant
A- X_1	80.78	1	80.78	2538.77	<0.0001	
B- X_2	0.2190	1	0.2190	6.88	0.0210	
C- X_3	68.00	1	68.00	2137.00	<0.0001	
AB	0.0144	1	0.0144	0.4541	0.5122	
AC	3.81	1	3.81	119.70	<0.0001	
BC	0,0112	1	0.0112	0.3536	0.5623	
Residual	0.4136	13	0.0318			
Falta de ajuste	0.0112	8	0.0014	0.0173	1.0000	Not significant
Error puro	0.4025	5	0.0805			
Cor Total	153.25	19				

4.3.3.1.3. Ecuación de regresión completa en terminos de factores codificados

$$Y = 15.50 + 2.43X_1 - 0.1266X_2 + 2.23X_3 - 0.0425X_1X_2 + 0.6900X_1X_3 - 0.0375X_2X_3$$

4.3.3.1.4. Parámetros estadísticos de modelo completo

Tabla 60

Parámetros estadísticos del modelo completo

Std. Dev.	0.1784	R^2	0.9973
Media	15.50	R^2 Ajustado	0.9961
c.v.%	1.15	R^2 Predicho	0.9969
		Precision Adec.	91.4460

4.3.3.1.5. Análisis de varianza para Y_1 en variables codificadas del modelo simplificado.

Tabla 61

Análisis de varianza para la temperatura del modelo simplificado

Fuente	La suma de Cuadrados	df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	152.83	4	38.20	1304.26	<0.0001	Significant
A- X_1	80.78	1	80.78	2758.00	<0.0001	
B- X_2	0.2190	1	0.2190	7.48	0.0154	
C- X_3	68.00	1	68.00	2321.53	<0.0001	
AC	3.81	1	3.81	130.04	<0.0001	
Residual	0.4393	15	0.0293			
Falta de ajuste	0.0369	10	0.0037	0.0458	1.0000	Not significant
Error puro	0.4025	5	0.0805			
Total (Corr)	153.25	19				

4.3.3.1.6. Ecuación de regresión ajustada con términos significativos

$$Y_1 = 15.50 + 2.43X_1 - 0.1266X_2 + 2.23X_3 + 0.68X_1X_3$$

4.3.3.1.7. Parámetros estadísticos del modelo simplificado

Tabla 62

Parámetros estadísticos de la temperatura del modelo simplificado

Std. Dev.	0.1711	R^2	0.9971
Media	15.50	R^2 Ajustado	0.9964
c.v.%	1.10	R^2 Predicho	0.9965
		Precisión Adec.	111.4499

4.3.3.1.8. Valores óptimos en variables codificadas y naturales

Tabla 63

Valores óptimos en variables codificadas y naturales de la temperatura interior

factor	nombre	tipo	mínimo	máximo	Bajo codificado	Alto codificado	media	Std. Dev.
A	X_1	numérico	-1.68	1.68	-1 ↔ -1.00	+1 ↔ 1.00	0.0000	0.8479
B	X_2	numérico	-1.68	1.68	-1 ↔ -1.00	+1 ↔ 1.00	0.0000	0.8479

C	X_3	numérico	-1.68	1.68	-1↔-1.00	+1↔1.00	0.0000	0.8479
---	-------	----------	-------	------	----------	---------	--------	--------

Respuestas

R	Nombre	Unid.	OBS.	Análisis	Min.	Max.	Media	Dev. Std	Prop.	Transf.	Modelo
R1	Y1	°C	20	polinomial	11.41	21.06	15.50	2.84	1.85	ninguna	Reducido 2FI

CRITERIOS PARA Y1

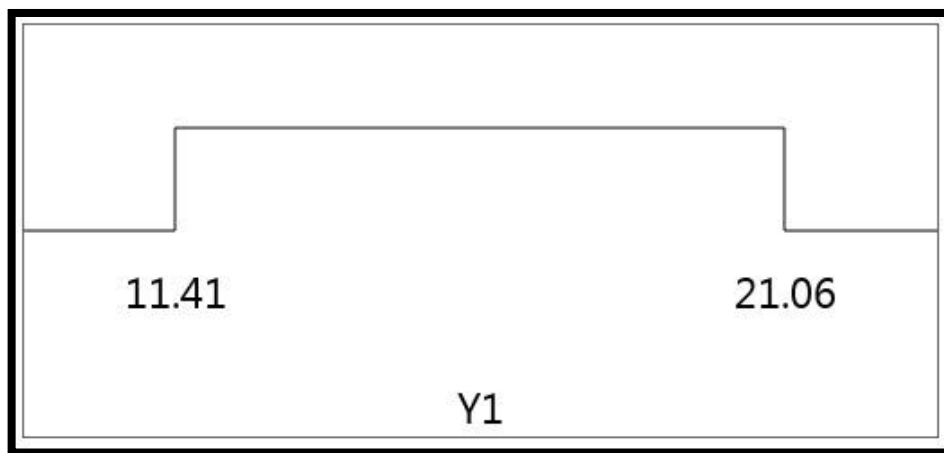


Figura 26. Criterios para y1

GRÁFICA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA TEMPERATURA INTERIOR T_i
GRAFICAS DE SUPERFICIE **GRAFICAS DE CURVA DE NIVEL**

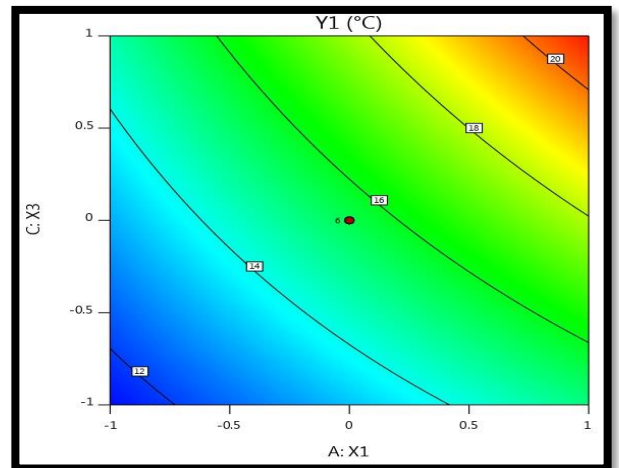
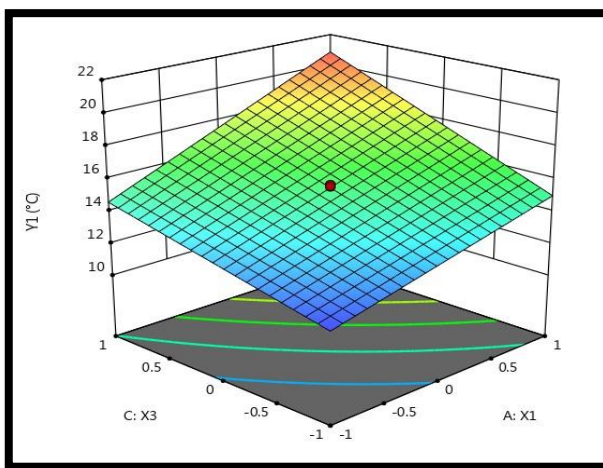
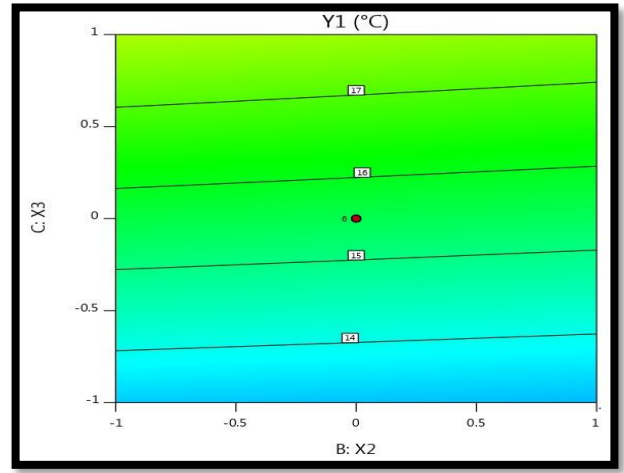
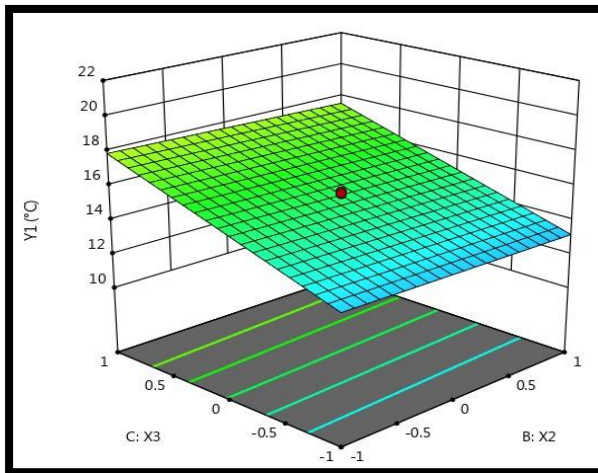
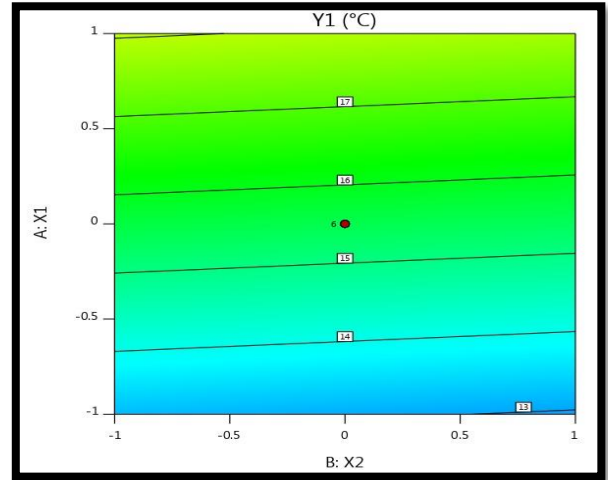
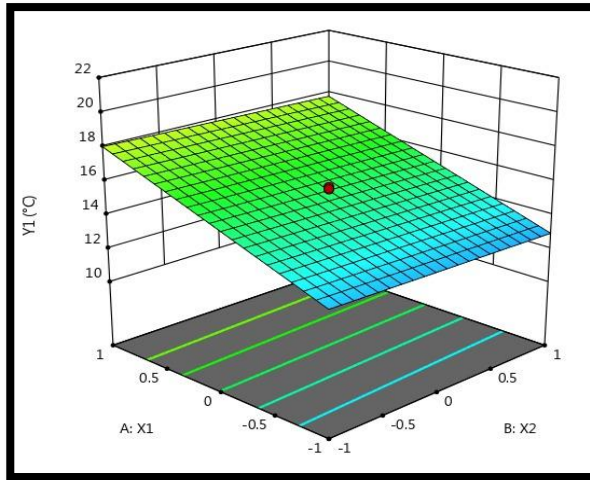
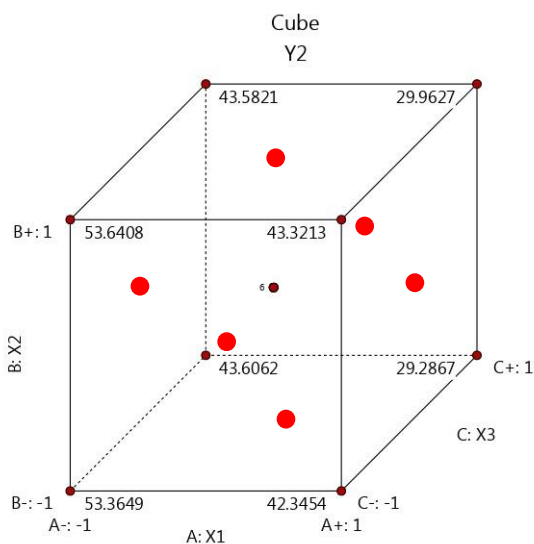


Tabla 64

Datos en variables codificadas y variable respuesta de la humedad relativa y2

N°	VARIABLES CODIFICADAS			VARIABLES DE RESPUESTA
	X1	X2	X3	Y2 (%)
1	-1	-1	-1	53
2	1	-1	-1	42.6
3	-1	1	-1	53.4
4	1	1	-1	43.2
5	-1	-1	1	43.6
6	1	-1	1	29.4
7	-1	1	1	43.2
8	1	1	1	30.2
9	0	0	0	41.5
10	0	0	0	41
11	0	0	0	41.3
12	0	0	0	41.1
13	0	0	0	43
14	0	0	0	41.6
15	-1.682	0	0	53.7
16	1.682	0	0	32.1
17	0	-1.682	0	41
18	0	1.682	0	42.1
19	0	0	-1.682	52.7
20	0	0	1.682	33



4.3.3.2. Análisis de variables codificadas de la humedad relativa interior del domo (Y2)

4.3.3.2.1. Para la selección del tipo de modelo a utilizar

Tabla 65

Suma de cuadrados del modelo secuencial

Fuente	La suma de Cuadrados	Df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	Fuente
Media vs total	35507.16	1	35507.16			
Lineal vs media	975.19	3	325.06	363.38	<0.0001	
2 Ft vs lineal	5.74	3	1.91	2.90	<0.0754	
Cuadrático vs 2Ft	4.91	3	1.64	4.46	0.0310	Suggested
Cúbico vs cuadrático	0.9176	4	0.2294	0.5005	0.7379	Aliased
Residual	2.75	6	0.4583			
total	36496.67	20	1824.83			

Suma de cuadrados del modelo secuencial. - Se selecciona el polinomio de orden superior donde los términos adicionales son significativos y el modelo no tiene aliased

Tabla 66

Resumen de parámetros estadísticos del modelo

Fuente	Std Dev.	R^2	Ajuste R^2	Predicho R^2	Press	
Lineal	0.9458	0.9855	0.9828	0.9766	23.18	
2FI	0.8123	0.9913	0.9873	0.9829	16.91	
Cuadrático	0.6056	0.9963	0.9930	0.9883	11.62	Suggested
Cubico	0.6770	0.9972	0.9912	0.9780	21.79	Aliased

Estadísticos de resumen del modelo. - se enfocan en el modelo que minimiza “PRESS” o de manera equivalente que maximiza R^2 de predicción.

Tabla 67

Prueba por falta de ajuste

Fuente	La suma de Cuadrados	Df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Lineal	11.64	11	1.06	1.98	0.2324	
2Ft	5.91	8	0.7387	1.38	0.3748	
Cuadrático	0.9990	5	0.1998	0.3744	0.8476	Suggested
Cubico	0.0815	1	0.0815	0.1526	0.7121	Aliased
Error puro	2.67	5	0.5337			

Pruebas por falta de ajuste. - se requiere que el modelo seleccionado no tenga falta de ajuste significativo.

4.3.3.2.2. Análisis de varianza en variables codificadas del modelo completo de la humedad relativa interior (Y2)

Tabla 68

Análisis de varianza de la humedad relativa para el modelo completo

Fuente	La suma de Cuadrados	df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	985.84	9	109.54	298.68	<0.0001	Significant
A- X_1	518.23	1	518.23	1413.08	<0.0001	
B- X_2	0.7734	1	0.7734	2.11	0.1771	
C- X_3	456.19	1	456.19	1243.93	<0.0001	
AB	0.2450	1	0.2450	0.6681	0.4328	
AC	5.44	1	5.44	14.85	0.0032	
BC	0,0450	1	0.0450	0.1227	0.7334	
A^2	2.69	1	2.69	7.33	0.0221	
B^2	0.0298	1	0.0298	0.0813	0.7814	
C^2	2.47	1	2.47	6.74	0.0267	
Residual	3.67	10	0.3667			
Falta de ajuste	0.9990	5	0.1998	0.3744	0.8476	Not significant
Error Puro	2.67	5	0.5337			
Cor Total	989.51	19				

4.3.3.2.3. Ecuación de regresión ajustada con términos significativos

$$Y = 41.59 - 6.16X_1 + 0.2380X_2 - 5.78X_3 + 0.4317X_1^2 - 0.0455X_2^2 + 0.4140X_3^2 + 0.175X_1X_2 - 0.8250X_1X_3 - 0.075X_2X_3$$

4.3.3.2.4. Parámetros estadísticos de modelo completo

Std. Dev.	0.6056	R²	0.9963
Mean	42.14	Adjusted R²	0.9930
c.v.%	1.44	Predicted R²	0.9883
		Adeq Precision	56.8734

4.3.3.2.5. Análisis de varianza para Y₂ en variables codificadas del modelo simplificado.

Tabla 69

Análisis de varianza de la humedad relativa del modelo simplificado

Fuente	La suma de Cuadrados	Df	Media Cuadrado	Valor -F	Valor- P	
Modelo	984.74	5	196.95	579.19	<0.0001	Significant
A-X ₁	518.23	1	518.23	1524.00	<0.0001	
C-X ₃	456.19	1	456.19	1341.58	<0.0001	
AC	5.45	1	5.45	16.01	0.0013	
A ²	2.77	1	2.77	8.15	0.0127	
C ²	2.55	1	2.55	7.50	0.0160	
Residual	4.76	14	0.3400			
Falta de ajuste	2.09	9	0.2325	0.4356	0.8683	Not significant
Error Puro	2.67	5	0.5337			
Cor Total	989.51	19				

4.3.3.2.6. Ecuación de regresión ajustada con términos significativos

$$Y_2 = 41.55 - 6.16X_1 - 5.78X_3 + 0.4362X_1^2 + 0.4186X_3^2 - 0.8250X_1X_3$$

4.3.3.2.7. Parámetros estadísticos del modelo simplificado

Tabla 70

Parámetros estadísticos de la humedad relativa del modelo simplificado

Std. Dev.	0.5831	R^2	0.9952
Mean	42.14	R^2 Ajustado	0.9935
c.v.%	1.38	R^2 predicho	0.9906
		Precision adec.	74,7606

4.3.3.2.8. Valores óptimos en variables codificadas y naturales de la humedad relativa

Tabla 71

Valores óptimos en variables codificadas y naturales de la humedad relativa

Factor	nombre	tipo	mínimo	máximo	Bajo codificado	Alto codificado	media	Std. Dev.
A	X_1	numérico	-1.68	1.68	-1 ↔ -1.00	+1 ↔ 1.00	0.0000	0.8479
B	X_2	numérico	-1.68	1.68	-1 ↔ -1.00	+1 ↔ 1.00	0.0000	0.8479
C	X_3	numérico	-1.68	1.68	-1 ↔ -1.00	+1 ↔ 1.00	0.0000	0.8479

Respuestas

R	Nombre	Unid.	OBS	Análisis	Min	Max	Mediana	Dev. Std	Prop	Transf.	Modelo
R1	Y1		20	polinomial	29.4	53.7	42.14	7.22	1.83	ninguna	Reducción cuadrática

CRITERIOS PARA Y2

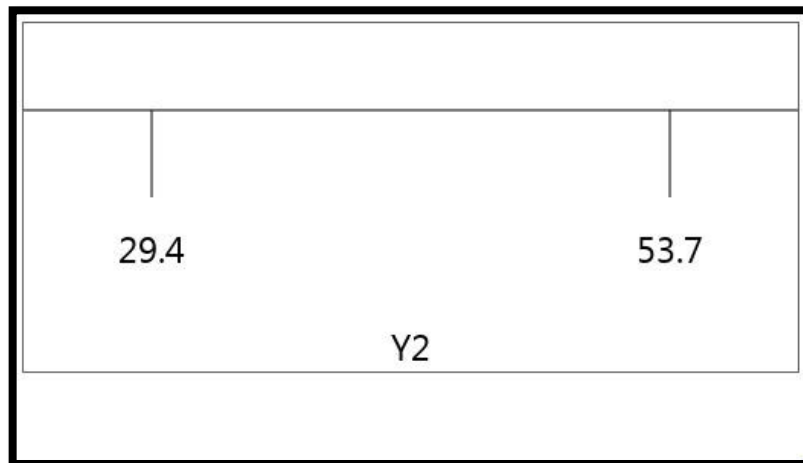


Figura 27. Criterios para y2

GRÁFICA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA DE LA HRI
GRÁFICAS DE SUPERFICIE GRÁFICAS DE CURVA DE NIVEL

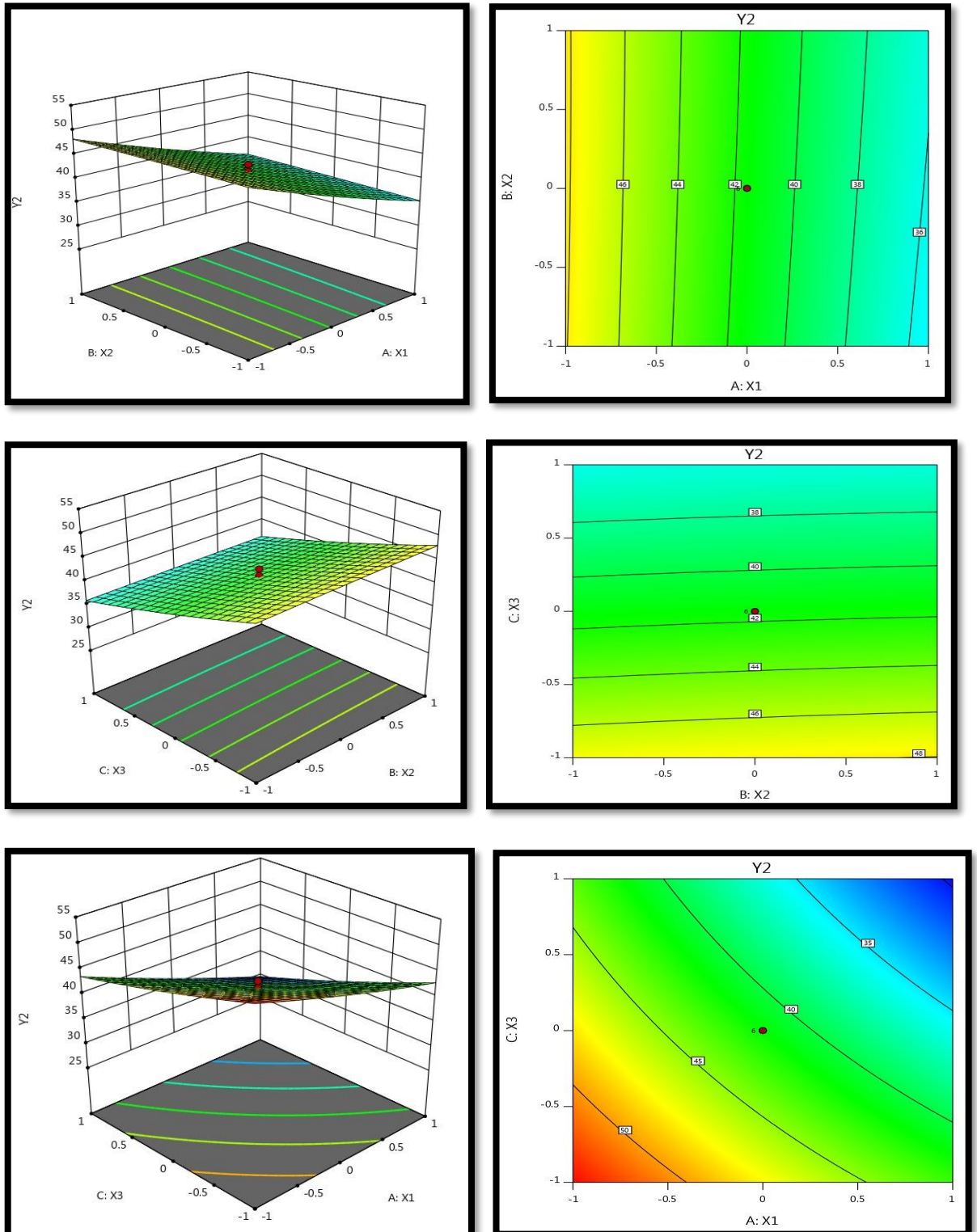


Figura 28. Gráfica de superficie de respuesta de la humedad relativa HRI

4.4. Análisis y discusión del estudio económico y reducción del impacto ambiental.

4.4.1. Cálculo del espesor óptimo económico del aislamiento térmico del polietileno reticulado ($E_{PER,opt}$):

El costo total, está determinado por la siguiente fórmula matemática:

$$C_T = C_I + C_P$$

Donde

C_I : Conto de inversión en el aislamiento del PER.

C_P : Costo de pérdidas de calor actualizado.

C_T : costo total, definido como la suma de las dos anteriores.

4.4.1.1. El costo de inversión del aislante térmico del PER (CI)

El costo de inversión aumenta, conforme aumenta el espesor del PER, el cual se traduce en el precio de compra del aislante PER del fabricante (€/m²), cuyos precios promedios cotizados según el espesor del PER, para los primeros meses del año 2015 (Enero a Marzo) se indican a continuación:

Tabla 72

Costo de Inversión del aislante térmico del PER (CI)

e_{PER}	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09	0.1
€/m ²	6.69	13.38	20.07	26.76	33.45	40.14	46.83	53.52	60.21	66.1
S/m ²	30.29	60.58	90.87	121.16	151.45	181.74	212.03	242.32	272.61	299.27
e_{PER}	0.11	0.12	0.13	0.14	0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2
€/m ²	73.27	79.92	86.56	93.21	99.86	106.50	113.15	119.79	126.44	133.09
S/m ²	331.74	361.83	391.92	422.01	452.11	482.20	512.29	542.38	572.47	602.57

Para hallar el precio en soles por m² para un determinado espesor del PER, puesto en la ciudad de Urubamba - Cusco donde se instaló el domo, resulta de considerar ciertos factores. Es así por ejemplo considerando un espesor del PER de $e_{PER} = 5$ cm adquiridos en Europa a 33.45 €/m², el precio en soles será:

Precio del espesor de 5 cm por m^2 en Europa	33.45 €
Relación Euro € a dólares (\$)	1.1 (Tasa de cambio)
Factor estimado puesto en Lima (FOB).....	1.4 (Costo de transporte 40 %)
Relación de Dólares (\$) a Soles (S/.)	2.8 Tasa de cambio
Factor estimado puesto en Urubamba Cusco	<u>1.05 (Costo del transporte 5%)</u>

$$Factor\ Total\ (F) = 11.1 \times 1.4 \times 2.8 \times 1.05$$

$$F = 4.5276$$

El precio del PER en Soles/ m^2 puesto en Urubamba – Cusco, para un espesor de 5 cm será:

$$P = 151.45 \text{ soles}/m^2$$

De igual forma los precios para los otros espesores del PER, se obtiene directamente multiplicando los precios cotizados en Europa por el factor $F = 4.5276$

4.4.1.2. El Costo de pérdidas de calor actualizado (Cp)

El costo de pérdidas de energía, disminuyen conforme aumenta el espesor del PER, el cual se calcula siguiente los siguientes pasos:

4.4.1.3. Características técnicas del PER: Aislamiento para forro

Empresa: SALVADOR ESCODA S.A.

Provincia: Barcelona

Aislamiento de espuma de polietileno reticulado (PER)

- Resistencia Térmica λ : (-20°C) (Declarado) = 0.033 W/ m^2 °K – (0°C) (Declarado) = 0.035 W/ m -°K – (+20°C) (Declarado) = 0.040 W/ m -°K
- Temperatura de empleo: -80 a 100°C
- Color: Gris claro
- Densidad: 30 Kg/ m^3
- Factor M > 7000

- Euroclase: BS2,do

Tabla 73

Tarifa de precios: PER

Código	Artículo	€/m ²
	Rollos	
	50 metros × 1.5 m (75 m ²)	
A101911	Espesor 5 mm UNE 23727-M1 sobre chapa	3.33
A101912	Espesor 10 mm UNE 23727-M1 sobre chapa	6.48
	Suministro solo rollo completo	

Fuente: Catálogo de Fabricante

Considerando la necesidad de utilizar por planchas para el forrado del domo, se seleccionó el de espesor de 10 mm (1 cm), debiendo unirse para 10 cm, con 10 planchas de 1 cm de espesor, requiriéndose realizar un trabajo adicional, por lo que su precio de compra para un espesor de 1 cm fue fijado en:

$$P = 6,69 \text{ €/m}^2$$

Dicho precio debió aumentar proporcionalmente, según los espesores requeridos como **Nota.-** Para el caso en el que el aislamiento térmico PER (Polietileno Reticulado Expandido) sea de mejor calidad para evitar las pérdidas térmicas, cuyo precio es para un espesor de 10 mm (1 cm) aproximado es el doble de lo indicado: $P = 6.69 \times 2 = 13.48$ €/m², el costo de inversión (I) será el doble de los indicados en la tabla para cada uno.

4.4.1.3.1. Valor de la Perdida de Energía (qp)

Para cada espesor de aislamiento térmico ($e_{i,PER}$) le corresponden unas pérdidas energéticas por unidad de superficie, el cual se determina por la siguiente fórmula matemática:

$$q_p = \frac{Q}{A} = (T_i - T_e) \frac{K_{PER}}{e_{i,PER}}$$

Donde:

$T_i = 13.568^{\circ}\text{C}$ (Temperatura interior promedio para los 3 meses de friaje)

$T_e = 6.7116^{\circ}\text{C}$ (Temperatura exterior promedio para los 3 meses de friaje)

$K_{PER} = 0.035 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}$ (Coeficiente de conductividad del PER)

$e_{i,PER} = [0.01 - 0.2] \text{ m}$ (Espesor considerado en un rango de 1 cm a 20 cm)

Reemplazando estos valores, se obtiene el valor de pérdida de energía (q_p) en función al espesor del PER ($e_{i,PER}$), el cual se determina para cada espesor que se indica en la columna (2) de la Tabla (), según la fórmula:

$$q_p = \frac{(13.568 - 6.7116)^{\circ}\text{C} \times 0.035 \text{ W/m}^{\circ}\text{C}}{e_{i,PER} \text{ (m)}}$$

$$q_p = \frac{0.239974}{e_{i,PER}} \left[\text{W/m}^2 \right]$$

Considerando para un espesor de: $e_{i,PER} = 0.05 \text{ m}$ (5 cm), se tiene:

$$q_p = \frac{0.239974}{0.05} = \underline{4.79948 \text{ W/m}^2}$$

Las características técnicas del PER utilizado, se indican a continuación:

4.4.1.3.2. Costo de las pérdidas por Año (C_p)

Para las pérdidas de energía obtenidas (q_p), se determina el costo de pérdida de Energía, considerando la tarifa eléctrica del periodo: E (costo de la Energía, del año 2015), y el número de horas de funcionamiento al año Z, según la fórmula matemática:

$$C_p = q_p \times Z \times E$$

Donde:

$Z = 8760 \text{ Hr/año}$ (Número de horas de funcionamiento al año)

$E = 0.5622 \text{ S/KWH}$(Costo de la energía: periodo 2015, ciudad de Urubamba – Cusco)

$$q_p = \frac{0.239974}{e_{i,PER}} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \dots(\text{valor de la pérdida de energía})$$

Reemplazando valores, se tiene:

$$C_p = \frac{q_p \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \times 8760 \frac{\text{Hr}}{\text{año}} \times 0.5622 \frac{\text{S/}}{\text{KwH}}}{1000 \text{ W/Kw}}$$

$$C_p = 4.924872 q_p = \frac{1.18184123}{e_{i,PER}} \left[\frac{\text{S/}}{\text{m}^2 \text{-año}} \right]$$

Si consideramos para un espesor de: $e_{i,PER} = 0.05 \text{ m}$, se tiene: $q_p = 4.79948 \text{ W/m}^2$; entonces el costo de energía por año será:

$$C_p = 4.924872 \times 4.79948 = \underline{23.6368246 \text{ W/m}^2 \text{-año}}$$

También se puede calcular directamente conociendo el espesor del PER:

$$C_p = \frac{1.18184123}{0.05} = \underline{23.6368246 \text{ W/m}^2 \text{-año}}$$

Para espesor del PER de 10 cm (0.1 m) se tiene:

$$C_p = \frac{1.18184123}{0.1} = \underline{11.8184123 \frac{\text{S/}}{\text{m}^2 \text{-año}}}$$

De igual forma, se han calculado para los otros espesores como se indica en la columna (3) de la tabla.

4.4.1.3.3. Valor de pérdidas en el periodo de Estudio ($C_{p,pe}$)

El valor del costo de pérdidas en el periodo de estudio, consiste en determinar el coeficiente del valor actual neto (VAN) a las pérdidas energéticas anuales por unidad de superficie (C_p) definido por la ecuación:

$$C_{p,pe} = C_p \times Coef.VAN$$

El coeficiente VAN o coeficiente multiplicador está

$$Coef.VAN = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1}$$

Siendo:

$$t = \frac{1 + 0.01b}{1 + 0.01r}$$

Donde:

$n = 20$ (Número de años de amortización para proyecto de energía térmica solar)

$b = 5\%/año$ (Incremento del costo de la energía por año)

$r = 4\%$ (Tasa de actualización neta)

Reemplazando valores, se determinará: el coeficiente para el cálculo del VAN (t) y el coeficiente VAN (coef. VAN), resultando:

$$t = \frac{1 + 0.01 \times b}{1 + 0.01 \times r} = \frac{1 + 0.01 \times 0.05}{1 + 0.01 \times 0.04} = \frac{1.0005}{1.0004} = 1.00009996$$

$$Coef.VAN = \frac{t(t^n - 1)}{t - 1} = \frac{1.00009996 [1.00009996^{20} - 1]}{[1.00009996 - 1]} = 20.0210049$$

Por lo tanto, el costo de pérdidas en el periodo de estudio quedará definido por la fórmula:

$$C_{p,pe} = C_p \times Coef.VAN = 20.0210049 \times C_p$$

Para el espesor del PER de 10 cm (0.1 m), se tiene:

$$C_{p,pe} = 20.0210049 \times 11.8184123 = 236.6164912 \frac{S/}{m^2}$$

De igual forma, se han calculado para los otros espesores como se indican en la columna (4) de la tabla.

4.4.1.3.4. Incrementos del ahorro (IA) y de la inversión de Aislamiento (IIA)

Si consideramos dos espesores consecutivos de aislamiento, la diferencia de pérdidas energéticas en periodos (I_A) tendrá un valor económico que actualiza con el coeficiente del VAN (Coef.VAN) para el periodo considerado, a su vez, existirá una diferencia de inversión de aislamiento (I_I).

El procedimiento consiste en determinar, para cada inversión en aislamiento, el Valor Actual Neto de los ahorros energéticos aportados y compararlo con los incrementos que supone la inversión. Esto permite realizar la siguiente comparación:

$$(I_A) \times (\text{Coef.VAN}) \geq I_I$$

Dónde: $I_A = (4)_i - (4)_{i+1}$ (Incremento del ahorro: Diferencia de Pérdida energética por periodos de la columna cuatro (4))

$I_I = (8)_{i+1} - (8)_i$ (Incremento de la inversión de aislamiento: Diferencia de costo de inversión o precio del PER de la columna ocho (8))

También los incrementos de ahorro y de inversión se definen como:

- **Inversión de ahorro (IA).**- Es el valor económico ($S./m^2$) de las pérdidas para un espesor dado menos el valor económico de las pérdidas energéticas para el espesor siguiente.
- **Incremento de inversión de aislamiento (II).**- Es el valor de la inversión ($S./m^2$) para un espesor dado menos el valor de la inversión para el espesor inmediatamente inferior disponible.

Si de la inecuación anterior propuesta para comparación resulta:

$(I_A) \times (\text{Coef.VAN}) > I_I$ (Indica que el incremento de ahorro es mayor que la inversión necesaria para obtenerlo).

$(I_A) \times (\text{Coef.VAN}) < I_I$ (Indica que el incremento del ahorro obtenido requiere una inversión superior. Esta inversión no es rentable y debe disminuirse el espesor de aislamiento).

En la tabla (75): en las columnas (5), (6) y (7) se indican los incrementos de: ahorro, inversión y su diferencia (de estos incrementos) respectivamente. Es así que para un espesor del PER de 5 cm (0.05 m) se tiene:

$$I_A = (4)_i - (4)_{i+1} = 591.541228 - 473.2329824 = \underline{118.3082456} \text{ S./m}^2$$

$$I_I = (8)_{i+1} - (8)_i = 149.04 - 120.5 = \underline{28.54} \text{ S./m}^2$$

$$\text{Diferencia} = (5) - (6) = I_A - I_I = 118.3082456 - 28.54 = \underline{89.376824561} \text{ S./m}^2.$$

De igual forma se calculan para los otros espesores del PER, cuyos resultados se indican en la tabla.

4.4.1.4. Costo total

El costo total del aislamiento térmico PER (Polietileno Reticulado) en la suma de los costos de inversión (C_I) y el costo de pérdidas de calor (C_P) que dependen del espesor del PER (e_{PER}). Al mínimo de la función Costo total ($C_{T\min}$), le corresponde el espesor denominado óptimo económico ($e_{PER,opt}$), tal y como se observa en la gráfica correspondiente. Resultando por lo tanto para los datos indicados en la tabla, el espesor óptimo económico del PER de: 90 m, siendo más comercial para fines prácticos se puede considerar:

$$e_{PER,opt} \cong 10 \text{ cm}$$

A continuación, se detalla el método aplicado para hallar el espesor óptimo económico.

Tabla 74

Cálculo del espesor económico del PER

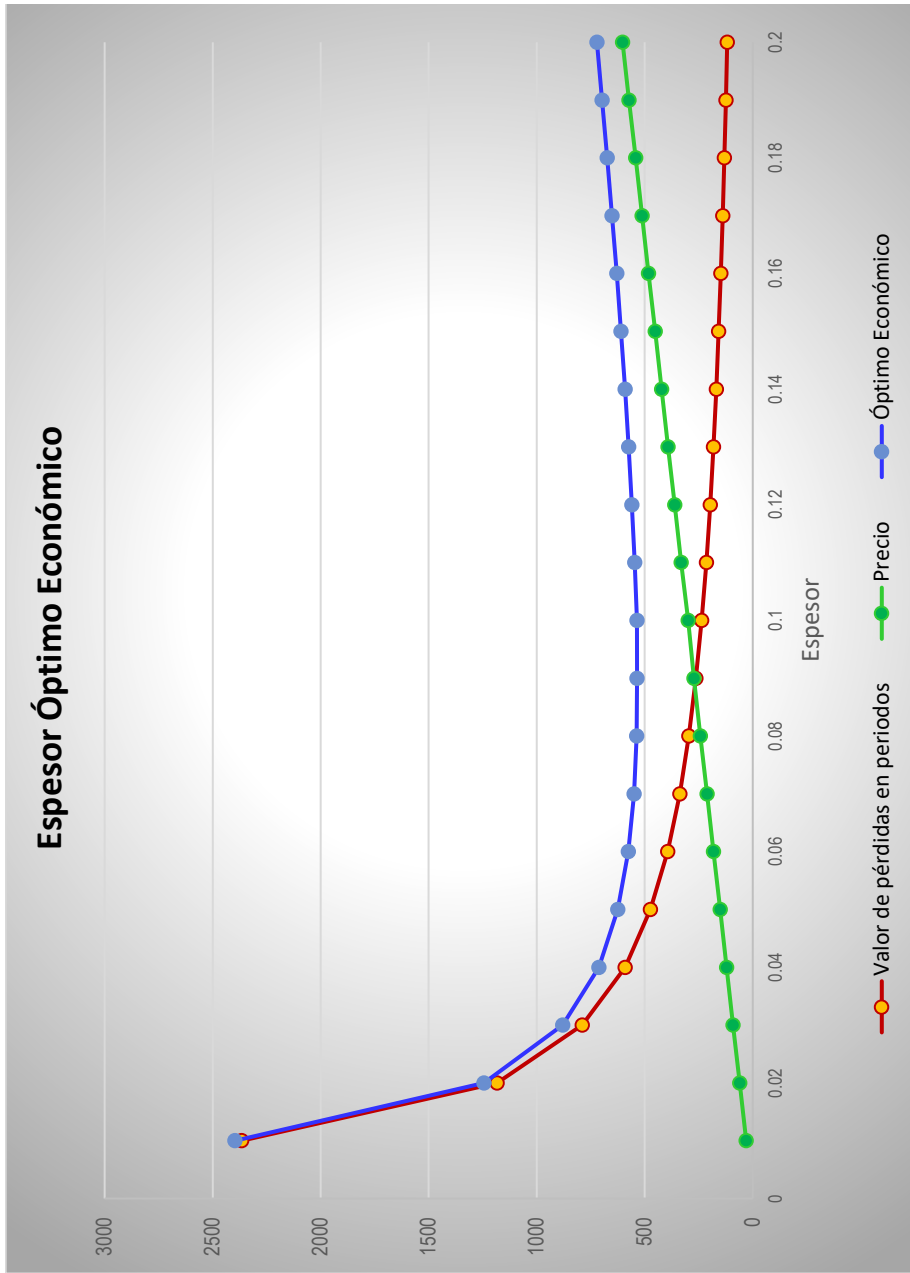
Componente	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura Interior	T_i	13.568	°C
Temperatura Exterior	T_e	6.7116	°C
conductividad térmica PER	K_{PER}	0.035	W/m°C
Número de horas por año	Z	8760	H
	E	0.5622	S/. / KWH
Incremento del costo de la energía por año	b	5	%
Tasa de actualización	r	4	%
	t	1.00009996	
Valor actual neto	VAN	20.0210049	I

Tabla 75
Resumen del espesor óptimo de PER

Espesor (m)	Pérdida de energía (W/m ²)	Costo de las pérdidas por m ² (S./ .m ² año)	Valor de pérdidas en periodos (S./ .m ²)	Incremento de ahorro (S./ .m ² año)	Incremento de la inversión (S./ .m ²)	Diferencia de espesor	Precio (S./ .m ²)	Óptimo Económico (S.)	Incremento de inversión (S./ .m ²)	Precio
0.01	23.9974	118.1841233	2366.164912				30.29	2396.45491	30.29	38.8
0.02	11.9987	59.09206167	1183.082456	1183.08246	30.29	1152.792456	60.58	1243.66246	60.58	66.62
0.03	7.99913333	39.39470778	788.7216374	394.360819	30.29	364.0708187	90.87	879.591637	90.87	91.96
0.04	5.99935	29.54603083	591.541228	197.180409	30.29	166.8904093	121.16	712.701228	121.16	120.5
0.05	4.79948	23.63682467	473.2329824	118.308246	30.29	88.01824561	151.45	624.682982	151.45	149.04
0.06	3.99956667	19.69735389	394.3608187	78.8721637	30.29	48.58216374	181.74	576.100819	181.74	175.242
0.07	3.4282	16.88344619	338.0235589	56.3372598	30.29	26.04725981	212.03	550.053559	212.03	201.44
0.08	2.999675	14.77301542	295.770614	42.2529449	30.29	11.96294486	242.32	538.090614	242.32	227.64
0.09	2.66637778	13.13156926	262.9072125	32.8634016	30.29	2.573401558	272.61	535.517212	272.61	253.84
0.1	2.39974	11.81841233	236.6164912	26.2907212	26.66	-0.369278753	299.27	535.866491	299.27	280.04
0.11	2.18158182	10.74401121	215.1059011	21.5105901	32.468	-10.95740989	331.738	546.843901	331.738	308.1496
0.12	1.99978333	9.848676944	197.1804093	17.9254918	30.092	-12.16650824	361.83	559.010409	361.83	334.992764
0.13	1.84595385	9.09108641	182.0126856	15.1677238	30.092	-14.9242762	391.922	573.934686	391.922	361.835927
0.14	1.7141	8.441723095	169.0117794	13.0009061	30.092	-17.09109389	422.014	591.025779	422.014	388.679091
0.15	1.59982667	7.878941556	157.7443275	11.267452	30.092	-18.82454804	452.106	609.850327	452.106	415.522255
0.16	1.4998375	7.386507708	147.885307	9.85902047	30.092	-20.23297953	482.198	630.083307	482.198	442.365418
0.17	1.41161176	6.952007255	139.1861713	8.69913571	30.092	-21.39286429	512.29	651.476171	512.29	469.208582
0.18	1.33318889	6.56578463	131.4536062	7.73256507	30.092	-22.35943493	542.382	673.835606	542.382	496.051745
0.19	1.26302105	6.220217018	124.5349954	6.91861085	30.092	-23.17338915	572.474	697.008995	572.474	522.894909
0.2	1.19987	5.909206167	118.3082456	6.22674977	30.092	-23.86525023	602.566	720.874246	602.566	549.738073

CÁLCULO ECONÓMICO AJUSTADO

Componente	Símbolo	Valor	Unidad
Temperatura Interior	T _i	13.568	°C
Temperatura Exterior	T _e	6.7116	°C
conductividad térmica PER	K _{PER}	0.035	W/m°C
Número de horas por año	Z	8760	H
Incremento del costo de la energía por año	E	0.5622	S./ KWH
	b	5	%



2396.45	546.84
1243.66	559.01
879.59	573.93
712.70	591.03
624.68	609.85
576.10	630.08
550.05	651.48
538.09	673.84
	697.01
	720.87

Figura 29. Gráfica de Costos versus espesor del PER

4.4.2. Estudio económico de la rentabilidad del material de cambio de fase PCM23

4.4.2.1. Introducción

En este capítulo se realiza el estudio de la rentabilidad del material de cambio de fase PCM23 para luego analizar la viabilidad del proyecto. Para ello primero se calcula la inversión inicial que comprende el costo total de las 60 placas del acumulador solar PCM23 incluyendo su instalación y mano de obra, luego se calcula el flujo anual de la fuente alternativa eléctrica comercial (costo de la energía producido por año de las 60 placas PCM23) que comprende la carga térmica inicial disponible para calefacción durante la noche de las 60 placas según la tarifa vigente del costo de la energía a esa fecha (año 205). Finalmente se calcula el periodo de pago de la amortización aplicando el método de Payback, determinándose el tiempo de pago que se tarda en recuperar (amortizarse la inversión inicial).

4.4.2.2. Cálculo del costo inicial de la inversión del almacenamiento de las 60 placas de PCM23 (CI)

Precio unitario del PCM23 puesto en Europa ($P_u, PCM23, E$)

$$\text{Precio del PCM23 en Europa} = 5000 \frac{\text{€}}{\text{m}^3} = 5 \frac{\text{€}}{\text{kgr}}$$

$$\text{Precio del PCM23 de 3 kgr en Europa} = 5 \frac{\text{€} \times 3 \text{ kgr}}{\text{kgr}} = 15 \text{ €}$$

$$\text{Precio del contenedor (recipiente) de una placa de PCM23} = 15 \text{ €}$$

$$P_{u, PCM23, E} = \text{Precio de una placa de PCM23 puesto en Europa} = 20 \text{ €} / \text{placa de PCM23}$$

Precio unitario del PCM23 puesto en lima

$$\text{Relación: Euros (€) a dólares ($) = 1.1 (tasa de cambio en el 2015)}$$

$$\text{Factor estimado FOB puesto en lima} = 1.40 (\text{transporte } 40\%)$$

lima

$C_u, PCM23, L$ = costo unitario de = 30.8 \$/placa PCM23
1 placa de PCM23, puesto en
lima

Costo de inversión de las 60 placas de PCM23 puesto en lima (CI)

$$CI = \frac{30.8\$}{\text{placas PCM23}} \times 60 \text{ placas PCM23}$$

$CI = 1848 \$$(A)
----------------	----------

**4.4.2.3. Cálculo del flujo anual de la fuente alternativa eléctrica domestica
($C_E, A, PCM23$)**

Para hallar el costo de la energía por año disponible para cada noche por las 60 placas de PCM23, según la tarifa vigente a esa fecha (2015) se obtiene calcula la carga térmica:

Carga térmica de las 60 las placas del PCM23 disponible para calefacción durante la noche por un año (ET).

La energía disponible por las 60 placas de PCM23 para una noche (ET, N).

$$ET, N = 60 \text{ placas de PCM23} \times 43 \frac{\text{Kcal}}{\text{kgr}} \times \frac{3\text{kgr}}{\text{placas de PCM23}} = 7740 \frac{\text{Kcal}}{\text{dia}}$$

$$ET, N = \frac{7740 \text{ Kwh}}{860 \text{ dia}} = 9 \frac{\text{Kwh}}{\text{dia}}$$

También se puede obtener directamente:

$$ET, N = 0.15 \frac{\text{Kwh}}{\text{PCM23}} \times 60 \frac{\text{PCM23}}{\text{dia}} = 9 \frac{\text{Kwh}}{\text{dia}}$$

La energía disponible por las 60 placas para un año (ET, A)

$$ET, A = 9 \frac{\text{Kwh}}{\text{dia}} \times 365 \frac{\text{Dias}}{\text{Año}}$$

$ET, A = 3285 \frac{\text{Kwh}}{\text{Año}}$
--

Tarifa de la energía eléctrica en el periodo (T)

El costo de la energía eléctrica en el periodo de helada (mayo junio julio) tenía una temperatura promedio de:

$$T = 0.448 \frac{\text{s/.}}{\text{Kwh}}$$

Considerando una tasa de cambio de: 1\$ = 2.80 S/. Se tiene una tarifa en dólares de:

$$T = \frac{0.448}{2.8} \times \frac{\$}{\text{Kwh}} = 0.16 \frac{\$}{\text{Kwh}}$$

El flujo anual de la fuente alternativa eléctrica doméstica

Disponible por el PCM23, será:

$$C_{E, A; PCM23} = ET, A \times T$$

$$C_{E, A; PCM23} = 3285 \times \frac{\text{Kwh}}{\text{Año}} \times 0.16 \frac{\$}{\text{Kwh}}$$

$$C_{E, A; PCM23} = 525.6 \frac{\$}{\text{Año}} \dots\dots\dots (B)$$

4.4.2.4. Periodo pago de amortización: método de Pay-Back

La amortización es un término económico y contable que nos da la información de la rentabilidad del material de cambio de fase PCM23. El periodo de pago de amortización (P) es el tiempo que tarda la inversión en ser rentable.

El método de Payback, denominada también plazo o periodo de recuperación, es uno de los llamados métodos de selección estático. Es una técnica que nos

permite determinar el tiempo en que se tarda en recuperar (amortizarse) la inversión inicial. Dicho cálculo se realiza mediante la fórmula:

$$P = \text{Pay - Back} = \frac{A}{B} = \frac{CI}{CE, A, PCM23} \times \frac{\$}{\left(\frac{\$}{\text{Año}}\right)}$$

Donde:

$$A = CI = 1848 \$ \quad \dots\dots\dots \text{(Costo de inversión inicial)}$$

$$B = CE, A, PCM23 = 525.6 \frac{\$}{\text{Año}} \quad \dots\dots\dots \text{(Costo de la energía anual disponible p
noche por las 60 placas de PCM23)}$$

Remplazando valore, se tiene:

$$P = \text{Pay - Back} = \frac{1848}{525.6} \times \frac{\$}{\frac{\$}{\text{Año}}} = 3.515982 \text{ Años}$$

$$P \approx 3.52 \text{ Años} = 3 \text{ Años y medio}$$

Por lo tanto: Se concluye que la inversión inicial se va recuperar en tres años y medio ($P = 3.5$ Años) siendo el resto del año el beneficio económico ($B = 21.5$ Años) si solo se considera el periodo de vida del acumulador PCM23 de 25 Años resultando por tanto rentable el acumulador PCM23 cuyo esquema representativo se indica a continuación.

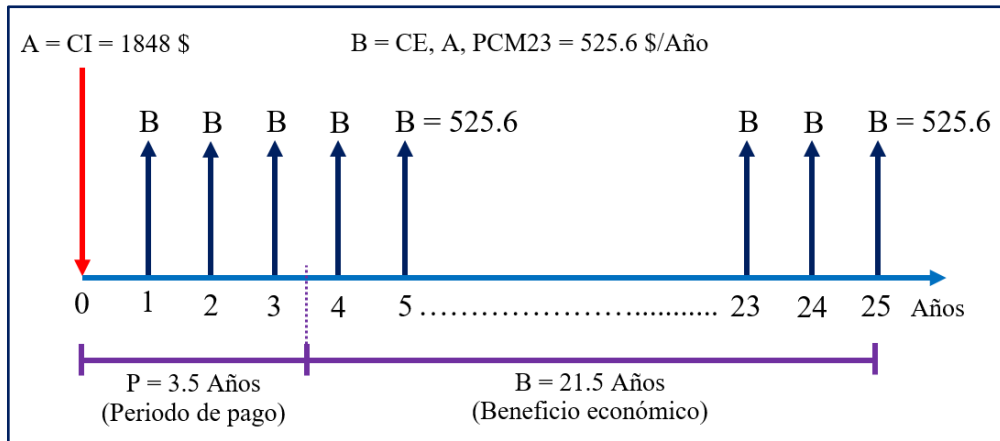


Figura 30. Periodo de pago de amortización y beneficio económico

Tabla 76

Costo de los equipos de Generación fotovoltaica

Ítem	Equipo	Descripción	Capacidad	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo total
1	Paneles	Monocristalino clase "A" 12V/85W	84	W	6	\$ 486 (441.85 €)	\$ 2,916
2	Baterías	Kaise - 12 V KBL 12650	12 - 65	V - Ah	8	\$ 170	\$ 1,360
3	Inversor	Victron Energy Phoenix (12 V - 1200 VA)	12/24 - 110/220 1000	V _{CC} - V _{CA} W	1	\$ 142,417 (129,47 €)	\$ 142,417
4	Regularador	Controlador de carga solar con Display LCD. Phocos Serie CX (10-40 ^a) CC: 24V - 40 A	Voltaje del sistema: 12/24 V Corriente de carga: 10-20-40 A	V A	1	\$ 1,459	\$ 1,459
5	Porta panel	Soporte panel base Acero laminado inoxidable	6	Unid.	6	\$ 60	\$ 360
6	Conectores y accesorios	Cables (AWG), tomacorrientes e interruptores	Según norma y cantidad	Unid.	-	\$ 100	\$ 100
						COSTO TOTAL	\$ 6,337.417

(5) y (6) incluye instalación y costo *in situ*.

Tasa de cambio: 1 \$ = 3 soles, 1 € = 1.1 \$

Tabla 77

Costos principales del sistema de generación fotovoltaica

Ítem	Equipos	Descripción	Capacidad	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Paneles	Mono Cristalino clase "A"	85	W	6	\$ 486.00	\$ 2916.00
2	Baterías	KAISE	12, 65	V-Ah	8	\$ 170.00	\$ 1360.00
3	Inversor	VICTRON ENERGY	24/220-1000	V-KW	1	\$ 142.417	\$ 142.417
4	Regulador	Phocos – Controlador solar de carga con display LCD Serie CX (10-40°)	CC 24-40	V – A	1	\$ 1,459.00	\$ 1459.00
5	Porta Panel	Acero laminado inoxidable	6	Unid.	6	\$ 60.00	\$ 360.00
6	Conectores	Cables, tomacorrientes e interruptores para conexión	Según nominas (mm ²)	AWG	1	\$ 100.00	\$ 6337.417
						COSTO TOTAL	\$. 6337.417

Tabla 78

Costos principales de la antena satelital

Ítem	Equipos	Descripción	Capacidad	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Total
1	Antena	LNB SINGLE	2300	Mhz	1	\$ 2330.00	\$ 2330.00
2	Soporte	Aluminio	150	Kg	1	\$ 133.33	\$ 133.33
3	LNB	Satélite Clase 360° ^a	360°	1 Mhz	1	\$ 125.00	\$ 125.00
4	Receptor	AZFOX255	SU-360 ELITE	PVR	1	\$ 85.00	\$ 85.00
5	Conectores f	VR7500	-	-	1	\$ 46.67	\$ 46.67
6	Cable coaxial	THICK	50	10 Hm/los	10m	\$ 10.00	\$ 100.00
						COSTO TOTAL	\$ 2820.00

4.4.3. Análisis y discusión del ahorro energético y reducción del impacto ambiental

4.4.3.1. Introducción

El uso de la energía renovable destinada al autoconsumo como es el proceso de calefacción mediante acumuladores de energía térmica (TES) a través de materiales de cambio de fase (PCM) presentan muchos beneficios: energéticos, económico y medio ambientales.

Por un lado al utilizar TES con PCM, repercute directamente en una reducción del consumo energético de la red eléctrica general y/o de combustibles fósiles y su consecuente ahorro económico al dejar de utilizar energía eléctrica para el uso del aire acondicionado y/o gas natural para calefacción y/o reserva. Por otro lado reduce la contaminación atmosférica, al contribuir al calentamiento natural del domo y reducción del efecto invernadero (CO₂) y su consecuente calentamiento global de la atmósfera, reduciéndose el cambio climático (deshielo, inundaciones, etc.) así mismo es muy importante considerar el confort térmico que proporciona a los usuarios del domo que permita mejorar su calidad de vida en un ambiente saludable y no tóxico.

Por lo que en el presente proyecto se planteó para evitar su repercusión en el cambio climático, en el proceso de calefacción utilizar energía limpia como la solar y el uso de materiales pasivos que no necesitan cuidados especiales y no son dañinos para el entorno.

Contribuyendo positivamente a la sociedad a través del proyecto piloto a tomar conciencia para evitar y disminuir los riesgos antes indicados.

4.4.3.2. Distribución de temperatura y demanda térmica para los meses de friaje (mayo, junio y julio) y promedio trimestral.

Para el cálculo del ahorro energético, económico y emisiones previamente se resumen en la siguiente tabla la distribución de temperatura y demanda térmica promedio diario mensual y trimestral, durante la noche para los meses de friaje de mayo, junio y julio del periodo 2015. Del balance térmico se obtiene la

fórmula para el cálculo de la demanda térmica de diseño requerido, definido por:

$$Q_d = 1.1172(15 - T_{amb}) \quad [\text{KWH}]$$

Donde:

T_{amb} = Es la temperatura ambiente promedio diario mensual y trimestral de la noche para cada mes de friaje (mayo, junio y julio), expresado en [°C].

Resultando la siguiente tabla que se indica a continuación:

Tabla 79

Resumen de la distribución de temperatura y demanda térmica promedio diario mensual y trimestral de la noche para los meses de friaje (mayo, junio y julio) del periodo 2015.

Distribución de temperatura y demanda térmica	Promedio diario de temperatura y demanda térmica de los meses de friaje			Promedio diario trimestral
	Mayo	Junio	Julio	
Temperatura ambiente exterior promedio diario mensual y trimestral durante la noche: (T_{amb}): [°C]	7.451	6.889	5.795	6.71
Demanda Térmica promedio diario mensual y trimestral durante la Noche: (Q_d): [KWH]	8.434	9.062	10.284	9.26

De la tabla se observa que disminuye la temperatura diario exterior mensual de mayo a julio, siendo el mes bajo en el mes de julio, alcanzando una temperatura promedio de 5.8°C, mientras que la demanda térmica diario mensual requerida aumenta, alcanzando en el mes de julio 10.3 KWH; teniendo una temperatura ambiental exterior promedio de 6.71°C y la demanda térmica requerida de 9.26 KWH.

4.4.3.3. Cálculo del ahorro energético y económico obtenido.

De la tabla del balance térmico visto anteriormente, se obtiene la siguiente tabla que muestra la demanda térmica sin y con PCM para porcentaje de Licuación del PCM23 de 100% y 74.44%.

Se indica el ahorro energético y económico obtenido diario y trimestralmente para los 3 meses de friaje: mayo, junio y julio que permita satisfacer la demanda térmica requerida. Se indica además como el ahorro energético coincide con la capacidad de almacenamiento del PCM23, para porcentajes de licuación del 100% y 74.44% que muestran que el PCM23 está cargada completamente (100%) encontrándose en estado líquido y cargada parcialmente con (74.44%) en promedio que fue analizado anteriormente, encontrándose en estado de cambio de fase sólido-líquido faltando un 25.56% para cargarse completamente.

Tabla 80

Demanda térmica de los 3 meses de friaje sin y con PCM, ahorro energético y económico promedio diario y trimestral para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.

	% L = 100%		%L = 74.44%	
	Diario	Trimestral	Diario	Trimestral
Demanda térmica promedio diario trimestral sin PCM [KWH]	9.26	851.92	9.26	851.92
Demanda térmica promedio diario trimestral total con PCM [KWH]	0.26	23.92	2.56	235.52
Ahorro energético promedio diario trimestral total [KWH]	9.0	828	6.70	616.40
Ahorro económico promedio diario trimestral total [\$/ S/.]	1.44/4.032	132.48/370.94	1.072/3.0	98.624/276.15
Capacidad total de almacenamiento [KWH]	9.0	828	6.70	616.4

Para el cálculo del ahorro energético que se indica en la tabla, se debe calcular la carga térmica de las 60 placas de PCM23 que debe ser almacenado y estar disponible para calefacción durante la noche para un %L de 100% y 74.44%, está dado por la fórmula matemática:

$$\boxed{\text{Carga térmica de 60 placas dispnibles, Noche} = N^{\circ} \text{PCM} \times \text{CT} \times \text{PN} \times \% \text{L}}$$

Donde:

$N^{\circ} \text{PCM} = 60$ (Cantidad de placas de PCM23 en domo de 50 m²)

$\text{CT} = 43 \text{ Kcal/Kg}$ (Carga térmica del PCM23)

$\text{PN} = 3 \text{ Kg/placa PCM23}$ (Peso neto de una placa PCM23)

$\% \text{L} = 100\% (74.44\%)$ (Porcentaje del acumulador que se licúa)

Reemplazando valores, se tiene:

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Noche}} = 60 \text{ placas PCM23} \times 43 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}} \times 3 \frac{\text{Kg}}{\text{Placa PCM23}} \times 1$$

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Noche}} = 7740 \text{ KCal/día}$$

Considerando que 1KWH = 860 Kcal, la carga térmica será:

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Noche}} = \frac{7740}{860} = 9 \text{ KWH/día}$$

Este valor se puede verificar multiplicando directamente por el factor: 0.15 KWH/placa PCM23:

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Noche}} = 60 \text{ placas PCM23} \times 0.15 \frac{\text{KWH}}{\text{placa PCM23}}$$

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Noche}} = 9 \text{ KWH/día}$$

Para un $\% \text{L} = 74.44\%$ en promedio obtenido en el ensayo, se tiene una carga térmica de las 60 placas de PCM23 de:

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Noche}} = 9 \times 0.7444 \cong 6.7 \text{ KWH/día}$$

Como la carga térmica o capacidad de almacenamiento del PCM23 coincide con el ahorro energético, se tiene para los 3 meses de friaje: Mayo (31 días), junio (30 días) y julio (31 días), la carga térmica o ahorro energético para los $\% \text{L}$ de 100% y 74.44% de:

$$\text{CT}_{60 \text{ placas, Trimestral}} = 9 \frac{\text{KWH}}{\text{día}} \times 92 \text{ días} = 828 \text{ KWH (para \%L = 100\%)}$$

$$CT_{60 \text{ placas, Trimestral}} = 6.7 \frac{\text{KWH}}{\text{día}} \times 92 \text{ días} = 616.4 \text{ KWH (para \%L = 74.44\%)}$$

Para el cálculo del ahorro económico, se multiplica el ahorro energético obtenido por la tarifa eléctrica promedio aplicado en la ciudad de Urubamba – Cusco cuya tarifa promedio para el periodo fue de: $T = 0.448 \text{ S/. /KWH} = 0.16 \text{ \$/KWH}$ para una tasa de cambio de: $1\text{\$}=2.8 \text{ soles}$, obteniéndose un ahorro económico diario y trimestral en el caso de utilizar aire acondicionado con energía eléctrica para calefacción para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% de:

- Ahorro Económico, diario = $9 \frac{\text{KWH}}{\text{día}} \times 0.16 \frac{\%}{\text{KWH}} = 1.44 \frac{\$}{\text{día}}$ (Para %L = 100%)
- Ahorro Económico, diario = $6.7 \frac{\text{KWH}}{\text{día}} \times 0.16 \frac{\%}{\text{KWH}} = 1.072 \frac{\$}{\text{día}}$ (Para %L = 74.44%)

Resultando un ahorro económico trimestral para los meses de friaje de:

- Ahorro Económico, Trimestral = $1.44 \frac{\$}{\text{día}} \times 92 \frac{\text{días}}{\text{trimestre}} = 132.48 \frac{\$}{\text{trimestre}}$ (Para %L = 100%)
- Ahorro Económico, Trimestral = $1.072 \frac{\$}{\text{día}} \times 92 \frac{\text{días}}{\text{trimestre}} = 98.624 \frac{\$}{\text{trimestre}}$ (Para %L = 74.44%)

Estos resultados significan que se dejaría de pagar: 44.16 \$ dólares mensual (123.65 soles) para un % L del PCM23 del 100% y 32.875 \$ dólares mensual (92.05 soles) para un % L del PCM23 del 74.44%.

Es necesario indicar que van existir días que alcanzan ahorros mayores. Aquellos días son los que han conseguido almacenar el máximo que permite el PCM23. La siguiente tabla resume las demandas totales del friaje del 2015 y el ahorro energético y económico de dicho periodo para el proceso de calefacción del domo instalado en la ciudad de Urubamba – Cusco, para porcentajes de licuación del 100% y 74.44%.

Tabla 81

Demanda térmica sin y con PCM, ahorro energético y económico obtenido durante el friaje del 2015.

	% L = 100%	%L = 74.44%
Demanda térmica durante el friaje sin PCM [KWH]	851.92	851.92

Demanda térmica durante el friaje con PCM [KWH]	23.92	235.52
Ahorro energético durante el friaje con PCM [KWH]	828	616.40
Ahorro económico durante el friaje [\$/ S/.]	132.48/370.94	98.624/276.15

Elaboración propia.

De la tabla (81) se observa que la demanda térmica para los 3 meses de friaje (851.92 KWH) es cubierto por las 60 placas de PCM23 (828 KWH) teniendo un ahorro económico de 132.48\$ (370.94 soles) cuando los PCM23 están cargados completamente (%L = 100%). Cuando los PCM23 están cargados parcialmente con %L = 74.44%, las 60 placas cubren con 616.4 KWH y los restantes (235.52 KWH) lo cubren los aportes de calor por artefactos eléctricos e iluminación (0.7 KWH/día) y las personas ocupantes del domo (3.78 KWH/día), haciendo un aporte diario de 4.48 KWH/día y un trimestral de 412.16 KWH que supera la demanda restante de 235.52 KWH. Con lo que se garantiza satisfacer la demanda térmica total de los 3 meses de friaje requerido.

A continuación, en las siguientes tablas (82), (83) y (84), similarmente se resumen para cada mes de friaje (mayo, junio y julio), las demandas térmicas, ahorro energético y económico promedio diario y mensual durante la noche para porcentaje de licuación de 100% y 74.44%.

Tabla 82

Demanda térmica del mes de mayo, sin y con PCM, ahorro energético y económico, promedio diario y mensual para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.

	% L = 100%		%L = 74.44%	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Demanda térmica promedio diario trimestral de mayo sin PCM [KWH]	8.434	261.454	8.434	261.454
Demanda térmica promedio diario mensual de mayo con PCM [KWH]	0.0	0.0	1.734	53.754
Ahorro energético promedio diario mensual de mayo [KWH]	8.434	261.454	6.7	207.7

Ahorro económico promedio diario mensual de mayo [\$/ S/.]	1.35/3.78	41.83/117.13	1.072/3.0	33.23/93.05
Capacidad total de almacenamiento térmico del mes de mayo [KWH]	9.0	279	6.7	207.7

Elaboración propia.

Tabla 83

Demanda térmica del mes de junio, sin y con PCM, ahorro energético y económico, promedio diario y mensual para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.

Demanda y ahorro	% L = 100%		%L = 74.44%	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Demanda térmica promedio diario trimestral de junio sin PCM [KWH]	9.062	271.86	9.062	271.86
Demanda térmica promedio diario mensual de junio con PCM [KWH]	0.062	1.86	2.362	70.86
Ahorro energético promedio diario mensual de junio [KWH]	9.0	270	6.7	201
Ahorro económico promedio diario mensual de junio [\$/ S/.]	1.44/4.032	43.2/120.96	1.072/3	32.16/90.05
Capacidad total de almacenamiento térmico del mes de junio [KWH]	9.0	270	6.7	201

Tabla 84

Demanda térmica del mes de julio, sin y con PCM, ahorro energético y económico, promedio diario y mensual para porcentajes de licuación de 100% y 74.44% del periodo 2015.

Demanda y ahorro	% L = 100%		%L = 74.44%	
	Diario	Mensual	Diario	Mensual
Demanda térmica promedio diario trimestral de julio sin PCM [KWH]	10.287	318.897	10.287	318.897
Demanda térmica promedio diario mensual de julio con PCM [KWH]	1.287	39.897	3.587	111.197
Ahorro energético promedio diario mensual de julio [KWH]	9.0	279	6.7	207.7
Ahorro económico promedio diario mensual de julio [\$/ S/.]	1.44/4.032	44.64/125	1.072/3	33.23/93.05
Capacidad total de almacenamiento térmico del mes de julio [KWH]	9.0	279	6.7	207.7

4.4.3.4. Cálculo de emisiones y reducción del impacto ambiental.

El uso del PCM reduce la carga térmica del domo, pero aun así es necesario el uso de un equipo auxiliar como reserva para compensar la carga cuando no hay sol.

Los equipos auxiliares previstos consumen electricidad o gas natural que a su vez contribuyen a emitir dióxido de carbono (CO₂) y otros componentes (gases diversos) a la atmósfera, aumentando la contaminación global atmosférica.

Haciendo uso de los factores de emisión como referencia del mix eléctrico español tabla (85), al no existir para el caso peruano, es posible calcular las emisiones de gases contaminantes en el caso de usar equipos de aire acondicionado instalado en el domo.

Tabla 85

Factores de emisión referencial del mix eléctrico español del periodo 2010

CO ₂ eq. [Kg/KWH]	SO _x [gr/KWH]	NO _x [gr/KWH]	PM 2.5 [gr/KWH]	PM 10 [gr/KWH]	RAA [jg/KWH]	COV [gr/KWH]	RMA [cm ³ /KWH]
0.215	0.980	0.428	0.013	0.024	0.288	0.012	0.0023

4.4.3.5. Cálculo del ahorro de emisiones con PCM respecto al uso de aire acondicionado con energía eléctrica

Para calcular las emisiones debidas al consumo de electricidad del domo, se multiplica la energía eléctrica consumida de la red en el caso de utilizar aire acondicionado durante los meses de friaje (mayo, junio y julio) por el factor de emisión del gas (considerado como referencia del mix eléctrico español), determinándose previamente el ahorro energético como la diferencia de la demanda térmica sin y con PCM y luego multiplicar por los factores de emisiones para obtener el ahorro de emisiones de los diversos gases y partículas contaminantes como se muestra en la tabla (86).

Tabla 86

Ahorro de emisiones de diversos gases contaminantes del domo experimental de los meses de friaje del periodo 2015, para %L de: 100% y 74.44%.

Meses de Friaje	CO ₂ eq. [Kg/KWH]	SO _x [gr/KWH]	NO _x [gr/KWH]	PM 2.5 [gr/KWH]	PM 10 [gr/KWH]	RAA [jg/KWH]	COV [gr/KWH]	RMA [cm ³ /KW H]	
Mayo	%L=100	56.21	256.20	111.9	3.4	6.27	75.3	3.14	0.617
	%L=74.44	44.65	203.55	88.89	2.7	4.98	59.82	2.49	0.49
Junio	%L=100	58.05	264.60	115.56	3.51	6.48	77.76	3.24	0.64
	%L=74.44	43.22	196.98	86.03	2.61	4.82	57.88	2.41	0.47
Julio	%L=100	59.98	273.42	119.41	3.63	6.69	80.35	3.35	0.66
	%L=74.44	44.65	203.55	88.89	2.70	4.98	59.82	2.49	0.49
Total	%L=100	174.29	794.22	346.87	10.54	19.44	233.41	9.73	1.917
	%L=74.44	132.52	604.08	263.81	8.01	14.78	177.52	7.39	1.45

Las emisiones de CO₂ por efecto invernadero que producen el calentamiento global están representadas para los meses de friaje, comparando las emisiones producidos con PCM y sin PCM en el domo experimental. En la gráfica de barras se puede observar una reducción del % cuando se incorpora PCM en el domo.

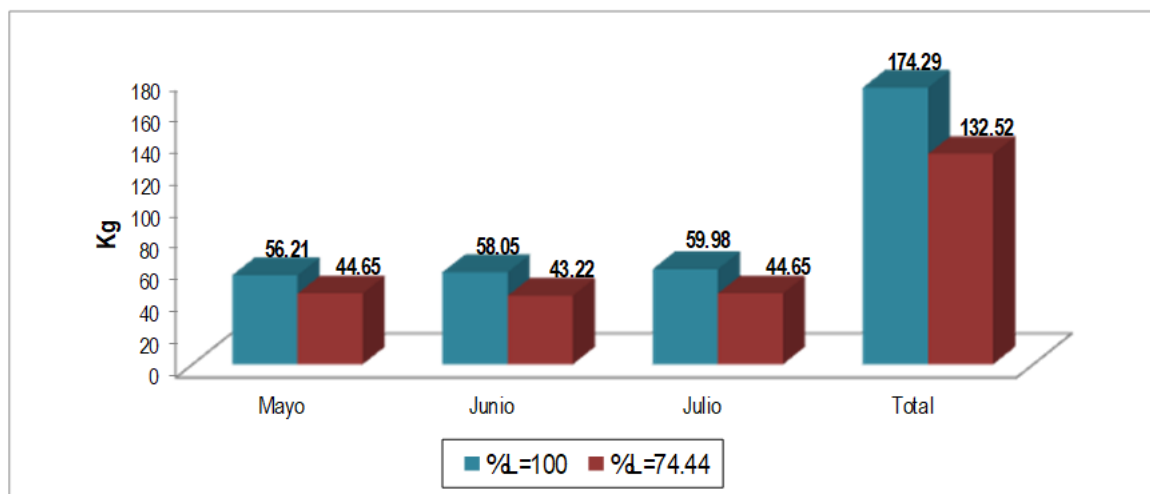


Figura 31. Ahorro de emisiones de CO₂

En las tablas 87 y 88 se indican las emisiones antes y después de incorporar el PCM para los meses de friaje: mayo, junio y julio, en el cual se muestran el total de emisiones de los diversos gases y partículas contaminantes.

Tabla 87

Emisiones de gases y partículas contaminantes sin el uso de PCM para porcentajes de licuación de 100% y 74.44%.

Meses de Friaje		CO ₂ eq. [Kg/KWH]	SO _x [gr/KWH]	NO _x [gr/KWH]	PM 2.5 [gr/KWH]	PM 10 [gr/KWH]	RAA [jg/KWH]	COV [gr/KWH]	RMA [cm ³ /KWH]
Mayo	%L=100	56.21	256.20	111.9	3.4	6.27	75.3	3.14	0.617
	%L=74.44	56.21	256.20	111.9	3.4	6.27	75.3	3.14	0.617
Junio	%L=100	58.45	266.42	116.4	3.5	6.52	78.3	3.26	0.642
	%L=74.44	58.45	266.42	116.4	3.5	6.52	78.3	3.26	0.642
Julio	%L=100	68.56	312.52	136.5	4.2	7.65	91.8	3.83	0.753
	%L=74.44	68.56	312.52	136.5	4.2	7.65	91.8	3.83	0.753
Total	%L=100	183.22	835.14	364.8	11.1	20.44	245.4	10.23	2.012
	%L=74.44	183.22	835.14	364.8	11.1	20.44	245.4	10.23	2.012

Tabla 88

Ahorro de emisiones de diversos gases contaminantes del domo experimental de los meses de friaje del periodo 2015 para porcentajes de licuación del 100% y 74.44%.

Meses de Friaje		CO ₂ eq. [Kg/KWH]	SO _x [gr/KWH]	NO _x [gr/KWH]	PM 2.5 [gr/KWH]	PM 10 [gr/KWH]	RAA [jg/KWH]	COV [gr/KWH]	RMA [cm ³ /KWH]
Mayo	%L=100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	%L=74.44	11.56	52.68	23.0	0.7	1.29	15.5	0.65	0.127
Junio	%L=100	0.40	1.82	0.8	0.024	0.045	0.54	0.022	0.0044
	%L=74.44	15.24	69.44	30.33	0.92	1.701	20.41	0.85	0.1672
Julio	%L=100	8.58	39.1	17.07	0.52	0.96	11.49	0.48	0.0942
	%L=74.44	23.91	108.97	47.59	1.45	2.67	32.03	1.334	0.2624
Total	%L=100	8.98	40.92	17.87	0.54	1.005	12.03	0.502	0.0986
	%L=74.44	50.71	231.09	100.92	3.07	5.661	67.94	2.834	0.5566

4.4.3.6. Calculo del ahorro de emisiones de CO₂ con PCM respecto al uso de gas natural para calefacción.

El domo experimental tiene una necesidad térmica de calefacción total para los 3 meses de friaje de 851.92 KWH/trimestre (los cuales inicialmente se pueden cubrir con una caldera de gas natural). Luego considerando la instalación en el domo de los TES con PCM23 para calefacción durante la noche, éste produce 828 KWH/trimestre.

Para obtener la reducción de emisión de CO₂, se debe efectuar los cálculos siguientes indicados en la tabla (89).

Tabla 89

Calculo del ahorro de emisiones de CO₂ con PCM respecto al uso de gas natural para calefacción.

INICIALMENTE	FINALMENTE
CONSUMO ENERGÉTICO (CE):	CONSUMO ENERGÉTICO (CE)
$CE = 851.92 \frac{\text{KWH}}{\text{Trimestre}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10.7 \text{ KWH}}$ $CE = 79.62 \frac{\text{m}^3 \text{ de gas natural}}{\text{Trimestre}}$	$CE = (851.92 \text{ KWH} - 828 \text{ KWH})/\text{Trimestre}$ $CE = 23.92 \frac{\text{KWH}}{\text{Trim}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{10.7 \text{ KWH}}$ $CE = 2.235 \text{ m}^3 \text{ de gas natural}/\text{Trimestre}$
EMISIONES DE CO₂ (E_{CO₂})	EMISIONES DE CO₂ (E_{CO₂})
$E_{\text{CO}_2} = 79.62 \frac{\text{m}^3 \text{ de gas nat.}}{\text{Trimestre}} \times 2.15 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{m}^3}$ $E_{\text{CO}_2} = 171.2 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Trimestre}}$	$E_{\text{CO}_2} = 2.235 \frac{\text{m}^3 \text{ de gas nat.}}{\text{Trimestre}} \times 2.15 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{m}^3}$ $E_{\text{CO}_2} = 4.81 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Trimestre}}$
AHORRO DE EMISIONES DE CO₂ (E_{CO₂})	
Por lo tanto, el ahorro de emisiones es de:	
$AE_{\text{CO}_2} = 171.2 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Trimestre}} - 4.81 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Trimestre}} = 166.4 \frac{\text{Kg CO}_2}{\text{Trimestre}}$	

4.5. Resumen de resultados

4.5.1. Resumen de resultados del balance energético

4.5.1.1. Resumen de balance térmico resultante

En la tabla (90) se resume el Balance Térmico promedio diario mensual durante la noche de cada mes del friaje (mayo, junio y julio) del periodo 2015 del sistema de calefacción del domo experimental instalado en la ciudad de Urubamba – Cusco, para porcentajes de licuación de 100% y 74.44%.

Tabla 90

Balance térmico del sistema de calefacción promedio diario, mensual y trimestral durante la noche de los meses de mayo, junio y julio del periodo 2015.

	Mayo		Junio		Julio		Promedio Diario Trimestral	
	%L=100%	%L=74.44%	%L=100%	%L=74.44%	%L=100%	%L=74.44%	%L=100%	%L=74.44%
Aporte de calor de Artefactos eléctricos [KwH]	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.7	0.7
Aporte de calor de las personas durante la noche [KwH]	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Aporte de calor del acumulador PCM23[KwH]	9.0	6.70	9.0	6.7	9.0	6.7	9.0	6.7
Total aporte de calor promedio diario mensual y trimestral [KwH]	13.48	11.18	13.48	11.18	13.48	11.18	13.48	11.18
Demanda térmica de calor promedio diario mensual y trimestral [KwH]	8.434	8.434	9.062	9.062	10.287	10287	9.26	9.26
Acumulación térmica de calor promedio diaria, mensual y trimestral [KwH]	5.046	2.746	4.418	2.118	3.193	0.893	4.22	1.92
Autonomía promedio diario mensual y trimestral [KwH]	0.60	0.33	0.50	0.23	0.31	0.1	0.5	0.21

Para obtener el Balance Térmico promedio mensual y trimestral, se multiplica los valores indicados en la tabla (promedio diario) por: 31,30 y 31 días respectivamente que tiene los meses de: mayo, junio y julio y por 92 días para el caso del promedio trimestral, lo que significa que su variación es proporcional. Teniendo en ambos casos un saldo positivo que se muestra en los

valores de la **Acumulación Térmica de Calor**, que para el caso del equilibrio térmico este debió ser como mínimo cero (0), por lo que se tiene una autonomía mayor que cero.

Respecto a los meses de Friaje el balance térmico va disminuyendo de mayo a julio siendo menor en el mes de julio, lo que significa que en este mes hay mayor demanda térmica (10.2871 Kwh) debido a que hay mayor friaje por lo que se tiene una acumulación mínima de solo 0.893 Kwh para porcentaje de Licuación del 74.44% y 3.193 KWH para porcentaje de licuación del 100%, teniendo un promedio diario trimestral de 1.92 KWH (para %L = 74.44) y 4.22 Kwh (para %L = 100%), logrando tener una autonomía de 0.21 y 0.50 para %L de 74.44% y 100% respectivamente.

4.5.1.2. Resumen de balance térmico para el caso de turismo

Similarmente se puede analizar en la tabla (91), el balance térmico promedio calculándose la carga térmica diario mensual y trimestral durante la noche de cada mes de friaje (mayo, junio y julio) del periodo 2015 del sistema de calefacción del domo experimental instalado en la ciudad de Urubamba – Cusco en la cual se logra tener hasta una temperatura interior (T_i) de 26.2°C y humedad relativa interior (HRi) de 21.93% para 80 placas de PCM23, espesor del PER (E) 10 cm y espesor de la cámara de aire (c) entre 3 y 10 cm alcanzando una temperatura efectiva (TE) de 14°C y encontrándose en la zona de confort (como confortable) según el ábaco de ASHRAE; determinándose similar a la tabla anterior la acumulación térmica de calor que nos indica el equilibrio del Balance Térmico para porcentajes de licuación de 100% y 74.44%.

Tabla 91

Balance térmico para el caso de turismo del sistema de calefacción promedio diario, mensual y trimestral durante la noche de los meses de friaje periodo 2015.

	Mayo		Junio		Julio		Promedio Diario Trimestral	
	%L=100%	%L=74.44%	%L=100%	%L=74.44%	%L=100%	%L=74.44%	%L=100%	%L=74.44%
Aporte de calor de Artefactos eléctricos [KwH]	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
Aporte de calor de las personas durante la noche [KwH]	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78	3.78
Aporte de calor del acumulador PCM23[KwH]	12.0	8.93	12.0	8.93	12.0	8.93	12.0	8.93
Total aporte de calor promedio diario mensual y trimestral [KwH]	16.48	13.41	16.48	13.41	16.48	13.41	16.48	13.41
Demanda térmica de calor promedio diario mensual y trimestral [KwH]	12.91	12.91	13.29	13.29	14.06	14.06	13.42	13.42
Acumulación térmica de calor (promedio diario, mensual y trimestral)[KwH]	3.57	0.5	3.19	0.12	2.42	(-0.65)	3.06	(-0.01)
Autonomía (promedio diario mensual y trimestral)[KwH]	0.28	0.04	0.24	0.01	0.17	(-0.05)	0.23	0.0007

4.5.2. Resumen de resultados obtenidos del diseño de regresión lineal múltiple

4.5.2.1. Resumen de resultados obtenidos para cada variable respuesta en variables originales

4.5.2.1.1. Modelo matemático completo para la temperatura interior del domo (T_i)

$$T_i = 7.1 \frac{T_{ex}^{0.2794} \cdot t^{0.00132} \cdot T_{PCM}^{1.2587} \cdot P_{atm}^{4.6771}}{HR_e^{0.4611}} \dots\dots\dots (K_1)$$

Cuyos parámetros estadísticos que validan el Modelo de la Temperatura interior (Ti) en variables originales son:

- Desviación estándar: $S_{y_1/\bar{x}} = 0.5351$
- Desviación estándar Normalizado: $\frac{S_{y_1/\bar{x}}}{\Delta y_1} = 0.001234$
- Coeficiente de variación: $CV_1 = 3.1\%$
- Coeficiente de correlación: $r_1 = 0.9975$
- El Durbin Watson: $DW_1 = 1.26$

4.5.2.1.2. Modelo Matemático completo para la humedad relativa interior del domo (HRi)

$$HR_i = 1'116,377.92 \frac{T_{ex}^{0.0827} \cdot HR_e^{0.3636} \cdot P_{atm}^{34.8354}}{t^{0.00925} \cdot T_{PCM}^{0.0875}} \dots\dots\dots (K_2)$$

Cuyos parámetros estadísticos que validan el Modelo de la Humedad Relativa interior (HRi) en variables originales son:

- Desviación estándar: $S_{y_2/\bar{x}} = 1.151$
- Desviación estándar Normalizado: $\frac{S_{y_2/\bar{x}}}{\Delta y_2} = 0.03648$
- Coeficiente de variación: $CV_2 = 2.39\%$
- Coeficiente de correlación: $r_2 = 0.99952$
- El Durbin Watson: $DW_2 = 1.033$

4.5.2.1.3. Modelo matemático simplificado para la temperatura interior del domo (Ti)

Después de haber sido linealizado y hallado sus términos significativos, la Ecuación de Regresión en variables originales de la temperatura interior resulta:

$$\hat{T}_i = 1.288 \frac{T_{ex}^{0.2867} \cdot T_{PCM}^{1.2532}}{HR_e^{0.4158}} \dots\dots\dots (E_1)$$

Como la temperatura del Acumulador PCM23, se mantiene casi en promedio constante $T_{PCM} = 15.492917^\circ\text{C}$, la ecuación de regresión se simplifica aún más, resultando en variables originales igual a:

$$\hat{T}_i = 39.94 \frac{T_{ex}^{0.2867}}{HR_e^{0.4158}} \dots\dots\dots (E_2)$$

4.5.2.1.4. Modelo matemático simplificado para la humedad relativa interior del domo (HRi)

Similarmente, después de haber sido linealizado y hallado sus términos significativos, la Ecuación de Regresión en variables originales de la Humedad Relativa interior resulta:

$$HR_i = 838,022.31 \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935} \cdot P_{atm}^{35.179} \dots\dots\dots (E_4)$$

Como la presión atmosférica se mantiene aproximadamente constante $P_{atm} = 0.721056$ bar, la ecuación de regresión se simplifica aún más, resultando:

$$HR_i = 8.45 \cdot T_{ex}^{0.093} \cdot HR_e^{0.3935} \dots\dots\dots (E_5)$$

Por lo tanto:

Estas simplificaciones de la temperatura interior (T_i) y Humedad Relativa interior (HRi), tienden a aproximarse su comportamiento al modelo completo, obviamente con ciertas diferencias debido a las aproximaciones realizadas.

4.5.2.2. Resultados en términos significativos de cada variable respuesta

Los resultados obtenidos de los análisis realizados en las secciones anteriores están resumidos en la tabla (92) para el diseño de regresión múltiple. Los términos más significativos de variabilidad, con base a un nivel de significancia de 5%, para cada una de las variables respuestas están relacionados. Las variables independientes en la forma codificada componen cada uno de los términos que son factores lineales principales. En estos casos tenemos términos lineales indicados por la letra “L” entre paréntesis localizada a su derecha y de bajo del porcentaje que está representado, en la cual cada termino revela su contribución porcentual en la variabilidad total de la variable respuesta. En base a estos valores fue establecido el orden decreciente de izquierda a derecha con que los términos fueron posicionados según su influencia en la variable respuesta. Para la temperatura interior (Ti) influye más X1 que corresponde a la temperatura exterior (Tex) luego X4 que corresponde a la temperatura del acumulador PCM23 y finalmente con menor porcentaje X2 que corresponde a la humedad relativa exterior (HRe). Para la humedad relativa interior (HRi) influye más X2 que corresponde a la humedad relativa exterior (HRe), luego X5 con casi igual porcentaje que corresponde a la presión atmosférica (Patm) y finalmente X1 que corresponde a la temperatura exterior (Tex). Concluyéndose que estos tres términos lineales X1, X4 y X2 influyen en la temperatura interior (Ti), con el 92.6% mientras que los tres términos lineales X2, X5 y X1 influyen con el 72.49% en la humedad relativa del Domo (HRi)

Tabla 92

Términos más significativos de variabilidad de cada variable respuesta obtenida del Diseño de regresión Lineal Múltiple

Variable Respuesta	Términos más significativos (significancia < 5%)		
Temperatura Interior del Domo (Ti)	X1 (L) (56.2%)	X4 (L) (23.53%)	X2 (L) (12.87%)
Humedad Relativa Interior del Domo (HRi)	X2 (L) (28.22%)	X5 (L) (26.9%)	X1 (L) (17.37%)

4.5.2.3. Resultados de los ajustes realizados para cada variable respuesta del modelo linealizado

Relacionando los resultados obtenidos para los ajustes realizados a partir de los modelos propuestos se construyó la tabla (93). En ella tenemos los porcentajes de las variabilidades explicadas por los respectivos modelos, residuos y desviación estándar. Los modelos propuestos para la temperatura interior (T_i) y humedad relativa interior (HR_i) de los modelos simplificados obtenidos son altos que permite mayor porcentaje de correlación de la variabilidad (R^2) con 99.7% y 99.02% respectivamente, juntamente con una baja desviación estándar del orden, de 0.022 para la temperatura interior (T_i) y 0.023 para la humedad relativa interior (HR_i).

Tabla 93

Resumen de los resultados obtenidos para los ajustes realizados para cada variable respuesta del modelo de regresión Múltiple linealizado.

Variable Respuesta	Modelo (%)	Error	
		Error total (%)	Desviación estándar (%)
Temperatura (T_i) [°C]	99.7	0.31	0.022
Humedad Relativa (HR_i) [%]	99.02	0.98	0.023

4.5.2.4. Resultados de los modelos matemáticos obtenidos para cada variable respuesta del modelo Linealizado

4.5.2.4.1. Modelos matemáticos para la temperatura interior del modo (T_i)

A continuación, se muestra las ecuaciones de regresión para el modelo completo y simplificado de las variables dependientes \hat{y}_1 y \hat{y}_2 que corresponden a la temperatura (T_i) y Humedad Relativa interior (HR_i) del domo, siendo las variables independientes: X_1 , temperatura exterior (T_{ex}), X_2 humedad relativa exterior (HR_e), X_3 , es el tiempo en horas, X_4 la temperatura del acumulador PCM23 y X_5 , es la presión atmosférica local (P_{atm}).

A. Para el modelo completo

A.1. En variables codificadas:

$$\hat{y}_1 = 1.95 + 0.2794X_1 - 0.4611X_2 + 0.00132X_3 + 1.259X_4 + 4.68X_5 \quad \dots\dots\dots (L_1)$$

A.2. En variables naturales:

$$T_i = 1.95 + 0.2794T_{ex} - 0.4611HR_e + 0.00132t + 1.259T_{PCM} + 4.68P_{atm}$$

B. Para el modelo simplificado

B.1. En variables codificadas:

$$\hat{y}_1 = 0.2531 + 0.2867X_1 - 0.4158X_2 + 1.2532X_4 \quad \dots\dots\dots (L_2)$$

B.2. En variables naturales:

$$\hat{T}_i = 0.2531 + 0.2867T_{ex} - 0.4158HR_e + 1.2532T_{PCM}$$

4.5.2.4.2. Modelos matemáticos para la humedad relativa interior del domo (HRi)

A. Para el modelo completo

A.1. En variables codificadas:

$$\hat{y}_2 = 13.93 + 0.0827X_1 + 0.3636X_2 - 0.00925X_3 - 0.087X_4 + 34.84X_5 \quad \dots\dots\dots (L_3)$$

A.2. En variables naturales:

$$HR_i = 13.93 + 0.0827T_{ex} + 0.3636HR_e - 0.00925t - 0.087T_{PCM} + 34.84P_{atm}$$

B. Para el modelo simplificado

B.1. En variables codificadas:

$\hat{y}_2 = 13.6388 + 0.093X_1 + 0.3935X_2 + 35.179X_5$ (L4)
--	------------

B.2. En variables naturales:

$HR_i = 13.6388 + 0.093T_{ex} + 0.3935HR_e + 35.179P_{atm}$

4.5.2.5. Resultados de los valores óptimos obtenidos para cada variable respuesta del modelo Linealizado

Se determinó los valores óptimos (Máximos y Mínimos) de la Temperatura Interior (Ti) y Humedad relativa interior del domo, para los modelos simplificados.

4.5.2.5.1. Valores óptimos de la temperatura interior del domo (TiOPT)

Temperatura interior mínima: $T_{i,min} = 10.42^{\circ}\text{C}$
Temperatura interior máxima: $T_{i,max} = 28.4^{\circ}\text{C}$

4.5.2.5.2. Valores óptimos de la Humedad Relativa interior del domo (HRi,opt)

Humedad Relativa interior mínima: $HR_{i,min} = 32.68\%$
Humedad Relativa interior máxima: $HR_{i,max} = 60.32\%$

4.5.3. Resumen de resultados obtenidos del diseño factorial compuesto 2^3

4.5.3.1. Resultados y discusión de términos significativos de cada variable respuesta

Los resultados obtenidos en los análisis realizados anteriormente están resumidos en la tabla (94) para el diseño factorial compuesto 2^3 . Se muestran los términos más significativos de variabilidad, con base a un nivel de significancia de 5% para cada una de las variables respuesta, los mismos que están relacionados. Las variables independientes en la forma codificada que componen cada uno de los términos son factores de interacción (I) o principales. En este último caso tenemos términos lineales o cuadráticos indicados por las letras “L” o “Q”, entre paréntesis localizado a su derecha.

Tabla 94

Términos más significativos de variabilidad de cada variable respuesta obtenido del diseño factorial compuesto 2^3 .

Variable respuesta	Términos más Significativos (significancia < 5%)				
	Temperatura interior del domo (Ti) [%]	X ₁ (L) (52.71)	X ₃ (L) (44.37)	X ₁ X ₃ (I) (2.49)	X ₂ (L) (0.14)
Humedad Relativa interior del domo (HRi) [%]	X ₁ (L) (52.37)	X ₃ (L) (46.1)	X ₁ X ₃ (I) (0.55)	X ₁ (L) (0.28)	X ₃ (Q) (0.26)

L: Lineal, Q: Cuadrático

Los números colocados entre paréntesis debajo de cada término revela su contribución porcentual en la variabilidad total de la variable respuesta o con base a este valor fue establecida el orden decreciente de izquierda a derecha y con que los términos fueron posicionados. Observando la tabla (T) constatamos que si relacionamos los términos más influyentes en las variables respuestas tenemos. Para la temperatura interior (T_i), influye más X₁, que corresponde a la cantidad del acumulador PCM23 (N), seguido por X₃, que corresponde al espesor del aislamiento térmico del PER (E) y luego por la interacción X₁X₃, que corresponde al producto del número de PCM por el espesor del aislamiento térmico (N.E) y finalmente X₂, que corresponde al espesor de la cámara de aire (C). Concluyéndose que la temperatura interior del domo, depende principalmente de la cantidad de PCM23 (N) y del espesor del aislamiento térmico del PER (E), influyendo entre estos 3 términos con 99.57%. Para la

Humedad Relativa interior del domo (HRi), influye más X_1 que corresponde a la temperatura exterior (Tex), seguido por X_3 , que corresponde al espesor del aislamiento térmico del PER (E), luego por la interacción X_1X_3 , que corresponde al producto de la cantidad de placas de PCM23 por el espesor del aislamiento térmico del PER ($N \cdot E$), finalmente en menor porcentaje los términos cuadráticos $X_1(Q)$ y $X_3(Q)$ que corresponde a los términos cuadráticos de la temperatura exterior (X_1^2) y espesor del PER (X_3^2) con solo 0.28% y 0.26% respectivamente.

Concluyéndose que la Humedad Relativa interior (HRi) depende principalmente de los términos lineales de la cantidad del acumulador PCM23 (N) y el espesor del aislamiento térmico del PER (E), influyendo entre estos dos con un 98.47%.

4.5.3.2. Resultados y discusión de los ajustes realizado para cada variable respuesta

Relacionando los resultados obtenidos para los ajustes realizados a partir de los modelos propuestos, se construyó la tabla (R_1). En ella tenemos los porcentajes de las variables explicados por los respectivos modelos, residuos y desviación estándar. el error total es subdividido en error por falta de ajuste y error puro. Los modelos propuestos para la temperatura interior y humedad relativa interior (HRi) de los modelos simplificados obtenidos son altos, cuyos porcentajes de correlación de la variabilidad (R^2) son 99.71% y 99.52% respectivamente, junto con una desviación estándar bajo del orden de 0.17% para la temperatura interior (Ti) y 0.5831% para la humedad relativa interior (HRi).

El error total es bajo siendo 0.29% para la temperatura interior y 0.48% para la humedad relativa interior que asociado junto a sus respectivos coeficientes de correlación (R^2) dan el 100%. El error por falta de ajuste es bajo para ambos casos, siendo más bajo para la temperatura (0.0241%) y en el ANOVA ambos son no significativos, lo que indica que ambos modelos tienen un buen ajuste.

Tabla 95

Resumen de Resultados obtenidos para los ajustes realizados para cada variable respuesta del diseño factorial compuesto 23 del modelo simplificado.

Variable respuesta	Modelo [%]	Error			Desviación estándar [%]
		Error total [%]	Falta de ajuste [%]	Error Puro [%]	
Temperatura interior del domo (Ti)	99.71	0.29	0.0241	0.263	0.1711
Humedad Relativa interior del domo (HRi)	99.52	0.48	0.21	0.27	0.5831

4.5.3.3. Resultados y discusión del modelo matemático obtenido para calcular variable respuesta del diseño factorial compuesto 2^3

A continuación, se muestra las ecuaciones de regresión para los modelos completo y simplificado de las variables dependientes \hat{y}_1 y \hat{y}_2 que corresponden a la temperatura interior (Ti) y humedad relativa interior (HRi) del domo, siendo las variables independientes: X_1 , cantidad del acumulador PCM23 (N), X_2 , espesor de la cámara de aire (C) y X_3 , espesor del aislamiento térmico del PER (E).

4.5.3.3.1. Modelos matemáticos obtenidos para la temperatura interior del domo (Ti)

A. Para el modelo completo

A.1. En variables codificadas:

$$y_1 = 15.50 + 2.43X_1 - 0.1266X_2 + 2.23X_3 - 0.0425X_1X_2 + 0.69X_1X_3$$

A.2. En variables naturales:

$$T_i = 15.5 + 2.43 \left(\frac{N-60}{10} \right) - 0.1266 \left(\frac{C-10}{5} \right) + 2.23 \left(\frac{E-7.5}{2.5} \right) - 0.0425 \left(\frac{N-60}{10} \right) \left(\frac{C-10}{5} \right) + 0.69 \left(\frac{N-60}{10} \right) \left(\frac{E-7.5}{2.5} \right)$$

B. Para el Modelo Simplificado

B.1. En variables codificadas:

$$y_1 = 15.5 + 2.43X_1 - 0.1266X_2 + 2.23X_3 + 0.69X_1X_3$$

B.2. En variables naturales:

$$T_i = 15.5 + 2.43\left(\frac{N-60}{10}\right) - 0.1266\left(\frac{C-10}{5}\right) + 2.23\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) + 0.69\left(\frac{N-60}{10}\right)\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right)$$

4.5.3.3.2. Modelos matemáticos obtenidos para la Humedad Relativa interior del domo (HR_i)

A. Para el modelo completo

A.1. En variables codificadas:

$$y_2 = 41.59 - 6.16X_1 + 0.238X_2 - 5.78X_3 + 0.4317X_1^2 - 0.0455X_2^2 + 0.414X_3^2 + 0.175X_1X_2 - 0.825X_1X_3 - 0.075X_2X_3 \quad \dots(R_1)$$

A.2. En variables naturales:

$$HR_i = 41.59 - 6.16\left(\frac{N-60}{10}\right) + 0.238\left(\frac{C-10}{5}\right) - 5.78\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) + 0.4317\left(\frac{N-60}{10}\right)^2 + 0.0455\left(\frac{C-10}{5}\right)^2 + 0.414\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right)^2 + 0.175\left(\frac{N-60}{10}\right)\left(\frac{C-10}{5}\right) - 0.825\left(\frac{N-60}{10}\right)\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) - 0.075\left(\frac{C-10}{5}\right)\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) \quad \dots(R_2)$$

B. Para el Modelo Simplificado

B.1. En variables codificadas:

$$y_2 = 41.59 - 6.16X_1 - 5.78X_3 + 0.4317X_1^2 + 0.414X_3^2 - 0.825X_1X_3 \quad \dots(R_3)$$

B.2. En variables naturales:

$$HR_i = 41.59 - 6.16\left(\frac{N-60}{10}\right) - 5.78\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) + 0.4362\left(\frac{N-60}{10}\right)^2 + 0.4186\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right)^2 - 0.825\left(\frac{N-60}{10}\right)\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) - 0.075\left(\frac{C-10}{5}\right)\left(\frac{E-7.5}{2.5}\right) \quad \dots(R_4)$$

4.5.3.4. Resultados de los valores óptimos obtenidos para cada variable respuesta del diseño factorial compuesto 2³

Se determinó los valores óptimos de diseño (máximos y mínimos) de la temperatura interior del domo (T_i) y humedad relativa interior del domo (HR_i) sujeto a restricciones para los modelos simplificados del diseño factorial compuesto 2^3 . Los modelos matemáticos simplificados para hallar los valores óptimos están dados por las siguientes ecuaciones de regresión sujeta a las restricciones:

Para la Temperatura Interior (y_{1opt})

$$y_{1,opt} = 15.50 + 2.43X_1 - 0.1266X_2 + 2.23X_3 + 0.69X_1X_3$$

s.a.

$$\begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 0 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 50 \leq N \leq 60 \\ 3 \leq C \leq 10 \\ 4 \leq E \leq 10 \end{cases}$$

Para la humedad relativa interior (y_{2opt})

$$y_2 = 41.59 - 6.16X_1 - 5.78X_3 + 0.4362X_1^2 + 0.4186X_3^2 - 0.825X_1X_3$$

s.a.

$$\begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 0 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 50 \leq N \leq 60 \\ 3 \leq C \leq 10 \\ 5 \leq E \leq 10 \end{cases}$$

4.5.3.4.1. Valores óptimos de diseño de temperatura interior del domo

($T_{i,opt}$)

Temperatura interior mínima: $T_{i,min} = 11.4^\circ\text{C}$ (para $N = 50$ placas, $C = 10$ cm, $E = 5$ cm)
Temperatura interior máxima: $T_{i,max} = 18^\circ\text{C}$ (para $N = 60$ placas, $C = 3$ cm, $E = 10$ cm)

4.5.3.4.2. Valores óptimos de la Humedad relativa interior del domo

($HR_{i,opt}$)

Humedad Relativa interior mínima: $HR_{i,min} = 36.2\%$ (para $N = 60$ placas, $C = 3$ cm, $E = 10$ cm)
Humedad Relativa interior máxima: $HR_{i,max} = 54.4\%$

(para $N = 50$ placas, $C = 10$ cm, $E = 5$ cm)

4.5.3.4.3. Valores óptimos de diseños relacionados entre la temperatura (Ti) y Humedad Relativa (HRi) en el interior del domo

Tabla 96

Valores relacionados entre la temperatura (Ti) y Humedad Relativa (HRi)

N°	Variables codificadas	Variables reales	Valores óptimos
1	$X_1 = -1$	$N = 50$ (placas de PCM23)	$T_{i,min} = 11.4^{\circ}C$
	$X_2 = 1$	$C = 10$ cm (espesor cámara de aire)	$HR_{i,máx} = 54.4\%$
	$X_3 = -1$	$E = 5$ cm (espesor del PER)	
2	$X_1 = 0$	$N = 60$ (placas de PCM23)	$T_{i,máx} = 17.6^{\circ}C$
	$X_2 = 1$	$C = 10$ cm (espesor cámara de aire)	$HR_{i,min} = 36.2\%$
	$X_3 = 1$	$E = 10$ cm (espesor del PER)	
3	$X_1 = 0$	$N = 60$ (placas de PCM23)	$T_{i,máx} = 17.86^{\circ}C$
	$X_2 = -1$	$C = 5$ cm (espesor cámara de aire)	$HR_{i,min} = 36.2\%$
	$X_3 = 1$	$E = 10$ cm (espesor del PER)	
4	$X_1 = 1$	$N = 70$ (placas de PCM23)	$T_{i,máx} = 21^{\circ}C$
	$X_2 = -1$	$C = 3$ cm (espesor cámara de aire)	$HR_{i,min} = 29\%$
	$X_3 = 1$	$E = 10$ cm (espesor del PER)	
5	$X_1 = 1.682$	$N = 77$ (placas de PCM23)	$T_{i,máx} = 26^{\circ}C$
	$X_2 = 1$	$C = 10$ cm (espesor cámara de aire)	$HR_{i,min} = 21.5\%$
	$X_3 = 1.682$	$E = 12$ cm (espesor del PER)	

Por lo tanto: Se comprueba que la temperatura (Ti) y Humedad Relativa (HRi) en el interior del domo están en una relación inversa, mientras que uno de ellos aumenta el otro disminuye. Se consideró el [2°] para el caso del diseño del domo.

4.5.4. Resumen de resultados y discusión del estudio económico, ahorro energético y reducción del impacto ambiental

En el proceso de calefacción los 2 elementos más importantes son el cerramiento o envoltura y el acumulador Solar Término.

En el primer caso juega un papel importante el aislante. Polietileno Reticulado (PER) que evita las pérdidas de calor al exterior y en el segundo caso el material de cambio de fase (PCM23) que entrega el calor latente mediante calefacción por aire al interior del domo. Si bien los resultados de utilizar estos materiales sostenibles son viables técnicamente, ya que al aumentar el espesor del PER(E) disminuye las pérdidas de calor al exterior, al aumentar la cantidad de acumuladores solares PCM23 aumenta la transferencia de calor al interior del domo; sin embargo dicho aumento ocasionan mayor costo que lo limitaría para su utilización ; por lo que para imponerse y tener soluciones efectivos , se consideró en el estudio, para las condiciones de diseño , determinar el espesor óptimo económico del PER (Eopt) y la cantidad óptimo de PCM23 requerido (N) que permitió tener las condiciones de confort deseado (T_i , HR_i).

$E_{PER, \text{ óptimo}} = 10 \text{ cm} \dots \dots \dots$ (Espesor óptimo de aislante térmica del PER)

$N_{opt.} = 60 \text{ placas de PCM 23} \dots \dots \dots$ (Cantidad de placas del a acumulador solar)

$C=10 \text{ cm} \dots \dots \dots$ (Ancho de la cámara de aire)

La viabilidad técnica económica de dichas soluciones nos permite ser competitivos con otras alternativas de soluciones impuestas.

Se calculó la tasa de rentabilidad económica del acumulador solar PCM 23 aplicando el método de PAYBACK. Resultando su periodo de recuperación de la inversión de 3 años y medio.

Para un mix eléctrico referencial de anhídrido carbónico (CO_2 de 0.215 Kg de CO_2 / KWH se tiene un ahorro de emisión trimestral de 174. 29 Kg de CO_2 para %L = 100% y de 132.52 Kg de CO_2 para %L = 74.44%.

Así mismo el ahorro de emisiones de anhídrido carbónico (CO_2) utilizando el material de cambio de fase (PCM23) respecto al uso del gas natural para calefacción es de 166.4 Kg de CO_2 / trimestre.

CONCLUSIONES

Con la alternativa tecnológica implementada “Prototipo domo experimental” para el proceso de calefacción y otros beneficios de confort se logró obtener un Balance Energético positivo. Para lograrlo se redujo las pérdidas de calor (en la transmisión) utilizando como envolvente el aislamiento térmico del PER de espesor óptimo $E = 10$ cm (previamente diseñado), luego se resulta la importancia del mayor aporte de calor la incorporación de $N = 60$ placas del acumulador solar PCM23, que cubre prácticamente toda la demanda térmica de calor, teniendo poca influencia dentro de estos materiales sostenibles la cámara de aire, cuyo espesor $C = 10$ cm, se determinó más para traslado de aire caliente al interior del domo (debiendo ser menor $C = 3$ cm).

Del análisis del Balance Térmico resulta que para una demanda térmica promedio diario trimestral de 9.26 Kwh, el acumulador solar aportaba con 60 placas 9 Kwh, para $\%L = 100\%$ y 6.7 Kwh para $\%L = 74.44\%$, teniendo una acumulación de energía adicional de 4.22 Kwh equivalente a una autonomía $A = 0.5$ días de superávit cuando no hay sol (durante la noche). Para el caso del turismo resultó para una demanda térmica promedio diario trimestral de 13.42 Kwh, el acumulador solar aportaba con 80 placas, 12 Kwh para un $\%L = 100\%$ y 8.93 Kwh para un $\%L = 74.44\%$ lográndose tener un balance energético en equilibrio (los aportes de calor cubren la demanda térmica).

Se consideró utilizar como reserva un generador a gas para calefacción en el supuesto que no haya sol uno o más. Comparativamente para el caso de tener una autonomía $A = 1$ día, con la alternativa propuesta se requeriría de $N = 94$ placas del acumulador solar PCM23 para $\%L = 100\%$ y $N = 126$ placas para $\%L = 74.44\%$, mientras que para una autonomía $A = 2$ días sin sol, se requeriría 155 placas de PCM23 para $\%L = 100\%$ y 209 placas para $\%L = 74.44\%$.

El diseño permitió analizar para el caso más crítico de los meses de friaje y durante la noche, considerándose para el cálculo de la demanda térmica la temperatura ambiental mínima de -3°C , con la que se garantiza la demanda térmica para el resto del año en el cual las temperaturas ambientales son mayores, previéndose con ello tener mayor autonomía para los días en que no hay sol.

Los resultados obtenidos fueron realizados para los meses más críticos de friaje (mayo, junio y julio) y durante la noche (6 pm a 6 am), en el cual los factores ambientales como

promedio diario trimestral fueron: Temperatura exterior (T_{ex}) 6.71°C , humedad relativa exterior (H_{Re}) 55.44% y presión atmosférica (P_{atm}) de 0.722 bar. Estos valores se encuentran dentro del rango de los registros meteorológicos del año 2015 de Senahmi y verificado por los registros de la marina mercante de los EE.UU. NOAAReady-Nasa.

Fue necesario considerar que el módulo piloto instalado para habitabilidad tenga otros beneficios de confort, para lo cual se instaló en el exterior del domo un generador FV con 6 paneles de 24 V conectados en paralelo, cuyo aporte de energía en el balance energético fue de 0.7 kWh para iluminación interior del domo, además de su utilización en corriente continua (24 V) y alterna (220 V) para funcionamiento de radio, TV, computadora, comunicación y artefactos electrodomésticos (el kit comprende: Generador FV, Regulador, Baterías e Inversor).

Se instaló tuberías de mangueras para calentamiento natural y obtener ACS para uso de ducha y cocina, planteándose mejorar con colectores solares. Fue importante la instalación de la antena parabólica para comunicación en tiempo real de los datos obtenidos *in situ*, además de su almacenamiento en una bitácora de la PC. Así mismo se instaló los servicios de agua y desagüe y de un acabado de peso confortable de área de 50 m² disponible para uso de turismo, distribuido para sala, comedor, dormitorio, cocina, baño y un pequeño depósito, con el cual se da la comodidad de bienestar y confort necesario para habitabilidad del domo experimental tipo una casa unifamiliar.

Conclusión 2

Se desarrolló los modelos matemáticos completo en variables originales y linealizado para analizar el efecto de la temperatura ambiental (X_1), humedad relativa ambiental (X_2) y tiempo (X_3), temperatura del acumulador solar PCM23 (X_4) y presión atmosférica local (X_5) en el comportamiento térmico interior del domo, determinado por la temperatura interior (y_1) y humedad relativa interior (y_2) para lo cual se aplica al diseño de regresión lineal múltiple con el programa Minitab, cuyos resultados se indican en las ecuaciones (K_1) y (K_2) en variables originales y (L_1), (L_3) en variables Linealizadas. Fue conveniente hacer el ajuste a este modelo para obtener sus respectivos modelos simplificados en la que estén presentes los términos más significativos ($\alpha = 0.05$) con un nivel de confianza del 95% , cuyos resultados se indican en las ecuaciones (E_1), (E_4) en variables originales y (L_2), (L_4) en variables linealizadas. Estos resultados nos indican que la temperatura

interior (y_1) es directamente proporcional a la temperatura exterior (X_1) y la temperatura del PCM (X_4) e inversa a la humedad relativa exterior (X_2), mientras que la humedad relativa interior (y_2) está en relación directa a la temperatura exterior (X_1), humedad relativa exterior (X_2) y presión atmosférica (X_5). Fue posible simplificar aún más para obtener los valores estimados de la temperatura (T_i) y humedad relativa interior (HRI) como se indican en las ecuaciones (E_2) y (E_5) para variables originales.

Finalmente con las respuestas de los modelos (y_1 y y_2) obtenidos, se halló los valores óptimos por el método de programación lineal sujeto a restricciones, utilizando el programa Matlab, obteniéndose una temperatura interior máxima de $T_{i,max} = 28.4^\circ\text{C}$ que ocurre a las 2 pm., para una temperatura exterior de $T_{ex} = 33.25^\circ\text{C}$ (con un desfase térmico de 2 horas), humedad relativa exterior de $HRe = 25.1\%$ (con un desfase térmico de 1 hora) y una temperatura del acumulador solar PCM23 de $T_{PCM} = 15.413^\circ\text{C}$ (con un desfase térmico de 1 hora). Para el caso de la temperatura interior mínima fue de $T_{i,min} = 10.42^\circ\text{C}$, que ocurre a las 6 am, para una temperatura exterior de $T_{ex} = 5.176^\circ\text{C}$, humedad relativa exterior de $HRe = 65.95\%$ y temperatura del acumulador PCM23 de $T_{PCM} = 14.62^\circ\text{C}$, para las mismas condiciones del desfase térmico indicado anteriormente.

De lo indicado para el caso de la $T_{i,max} = 28.4^\circ\text{C}$, se tendría que abrir los orificios del domo para refrigerar y disminuir para que este dentro del rango de confort. Así mismo, para la $T_{ex} = 5.176^\circ\text{C}$ tiene un salto térmico de 5.24°C , con la cual se obtiene $T_{i,min} = 10.42^\circ\text{C}$.

Conclusión 3

Se desarrolló los modelos matemáticos completos para analizar el efecto de la cantidad del acumulador PCM23 (N), espesor del aislamiento térmico del PER (E) y el ancho de la cámara de aire (C) en el estado de confort, determinado por la temperatura interior (T_i) y humedad relativa (HRI) en el interior del domo, para lo cual se aplicó el diseño factorial compuesto 2^3 , cuyos resultados se indican en variables codificados y naturales en las ecuaciones (T_1) y (T_2) para la temperatura interior (T_i) y en las ecuaciones (R_1) y (R_2) para la humedad relativa interior (HRI). Se realizó el ajuste para obtener sus respectivos modelos simplificados con términos significativos ($\alpha = 0.05$) nivel de confianza 95%, cuyos resultados en variables codificadas y naturales que se indican en la ecuación (T_3) y

(T_4) para la temperatura interior (T_i) y en las ecuaciones (R_3) y (R_4) para la humedad relativa interior.

Finalmente con las 2 respuestas obtenidas (y_1 y y_2), se halló los valores óptimos por el método de programación lineal sujeto a restricciones de sus parámetros de diseño, obteniéndose: $N = 60$ placas del Acumulador PCM23, $E = 10$ cm de espesor del aislamiento del PER y $C = 10$ cm de espesor de la cámara de aire, con las cuales se obtuvo aproximadamente una temperatura interior máxima de $T_{i,máx} = 18^\circ\text{C}$ y Humedad Relativa interior mínima de $HR_{i,mín} = 36\%$, para una temperatura exterior $T_{ex} = 7.71^\circ\text{C}$ y humedad relativa exterior $HRe = 67.6\%$ (obtenido con la herramienta calculadora de humedad), lográndose tener un salto térmico de 10°C y una reducción de la humedad de 31.6% respecto al exterior.

Es importante resaltar que si se aumenta la cantidad de acumuladores de 77 placas, se tendría: $T_{i,máx} = 26.1^\circ\text{C}$ y $HR_{i,mín} = 21\%$, en este caso se logra tener un salto térmico de 18.39°C y una reducción de la humedad de 46.1% respecto al exterior, que es muy prometedor para el proceso de calefacción que se reduciría durante los meses más críticos de friaje y durante la noche (6 pm a 6 am); sin embargo, los valores de diseño obtenidos obedecen al comportamiento de los parámetros ambientales, analizados con el modelo de regresión lineal múltiple.

Conclusión 4

Del estudio económico realizado durante los meses de friaje (mayo, junio y julio), se tiene un ahorro energético como promedio trimestral de 828 kWh para un $\%L = 100\%$ y 616.4 kWh para un $\%L = 74.44\%$ cuyos correspondientes ahorro económico son de 132.48\$ y 98.624\$ respectivamente, cuyo ahorro de emisiones de algunos gases contaminantes principales son para CO_2 fue de 174,29 Kg para $\%L = 100\%$ y 132.52 Kg para $\%L = 74.44\%$, para SO_x fue de 794.22 g para $\%L = 100\%$ y 604.8 g para $\%L = 74.44\%$, para NO_x fue de 346.87 g para $\%L = 100\%$ y 263.81 g para $\%L = 74.44\%$. Así mismo, el ahorro de emisiones de CO_2 al utilizar el acumulador PCM23 respecto al uso de gas natural (reserva) para calefacción se tiene un ahorro de 166.4 Kg CO_2 /trimestre.

El periodo de recuperación de la inversión inicial, utilizando el método de Pay-Back fue de 3 años y medio, siendo el resto de los años beneficio económico (21.5 años).

Estos valores indican la importancia del presente proyecto respecto a su utilización como proyecto piloto modelo y su consecuente ahorro y beneficio económico y de reducción del impacto ambiental, como propuesta de desarrollo para uso a escala industrial.

Es importante resaltar el uso de los materiales sostenibles: acumulador solar PCM23 como aporte de calor importante y el uso de la envolvente aislamiento térmico del polietileno reticulado PER. Respecto a este último se determina su valor óptimo, resultando un espesor de $E = 10$ cm.

El costo para un área base de 50 m^2 del domo, para un espesor del PER: $E = 10$ cm y $N = 60$ placas de PCM23, es de 6,690 €.

De los resultados obtenidos, se puede indicar que dentro de los tipos de almacenamiento térmico, el acumulador solar PCM23 mediante calor latente tiene mayores ventajas que los sistemas de almacenamiento convencionales como calor sensible y por reacción termoquímica. Como cambio de fase se seleccionó de sólido a líquido, por tener menor variación de volumen que el de sólido a gas. Resultando para el proceso de calefacción pasivo dentro de las sustancias para almacenamiento térmico los compuestos orgánicos como los parafínicos, con calor latente de 180 KJ/Kg, temperatura de fusión 23°C , densidad (sólido) 1000 Kg/m^3 , calor específico (sólido) $2.1 \text{ KJ/Kg-}^\circ\text{C}$, calor específico (líquido) $2.5 \text{ KJ/Kg-}^\circ\text{C}$, conductividad térmica (sólido) $0.58 \text{ W/m-}^\circ\text{C}$, conductividad térmica (líquido) $0.291 \text{ W/m-}^\circ\text{C}$.

RECOMENDACIONES

- Si bien se realizó el presente proyecto de calefacción con aire en la ciudad de Urubamba – Cusco, se sugirió implementar a nivel piloto su calefacción con agua en el distrito de Mazocruz – Puno, que se encuentra a bajas temperaturas, el mismo que está en proceso de desarrollo. Cuyos resultados se presume más favorables debido a la conservación de energía del agua, utilizando colectores solares.
- Si bien se tiene proyectos de desarrollo en curso para calefacción (por aire o con agua) para zonas frías, se recomienda realizar proyectos de refrigeración para zonas cálidas como Lima, Moquegua, Madre de Dios, Paracas, entre otros utilizando acumuladores bajo cero (en la noche se acumula el frío y de día se descarga para refrigerar).
- Se recomienda realizar proyectos con PCM micro encapsulado, que tienen la ventaja de ser de fácil aplicación y tener buena transmisión térmica debido al incremento de la superficie de intercambio y no necesita protección contra la destrucción. Se espera en los próximos años un desarrollo muy grande en estos materiales, para ser empleados en la construcción, en los líquidos de transporte de calor entre otros usos.
- Debido a la analogía entre los circuitos eléctricos y circuitos térmicos se sugiere realizar estudios y aplicaciones para cerramientos o envolventes el paralelismo con la magnitud analógica de la corriente alterna, apareciendo los nuevos conceptos de impedancia térmica, desfase térmico, amortiguamiento térmico, resistencia térmica, capacidad térmica, la frecuencia de la onda térmica, entre otros. Es así que, para una variación de la temperatura periódica, se puede desfasar o amortiguar el flujo de calor que atraviesa el cerramiento, actuando sobre el poder aislante o la resistencia y/o sobre la inercia térmica (que depende del calor específico, la densidad y del volumen del cerramiento). Se torna interesante este nuevo campo que puede profundizarse en el campo de la electrónica de potencia con rectificadores de la onda térmica y el uso de la serie de Fourier para las ondas armónicas fundamentales.
- La importancia del acumulador solar con materiales de cambio de fase (PCM) permite almacenar energía para diferentes niveles de temperatura, por lo que se sugiere utilizar su aplicación en múltiples usos específicos de interés como son: almacenaje térmica de energía solar para gran capacidad, almacenaje, pasivo en edificios, obtención de



agua caliente sanitaria (ACS), protección térmica de: alimento, productos agrícolas, dispositivos electrónicos, aplicaciones médicas, confort térmico de vehículos, textil (ropas térmicas), entre otros.

- La carga del acumulador de energía puede realizarse directamente de la radiación solar, o de agua caliente, vapor de otra forma de energía que transfiere energía al acumulador, por lo que se sugiere aprovechar la energía o calor existente para cargar el acumulador según el tipo de uso que va realizar. Aquí juega un papel importante el porcentaje de licuación (%L), según la cantidad de carga del acumulador.

BIBLIOGRAFÍA

- Alexiades, V., & Solomon, A. D. (1993). Mathematical modeling of melting and freezing processes. In *Mathematical Modeling of Melting and Freezing Processes*. <http://www.math.utk.edu/~vasili/475/Handouts/3.PhChgbk.1+title.pdf>
- Ampuero V., L. (2010). Sistema de calefacción a leña. In *Historia* (Issue 1931).
- Auris C., O. T. (2017). *Diseño de un sistema de climatización para un domo de 50 m² de uso familiar en la ciudad de Pisco*.
- Bannier, E., Cantavella, V., Bou, E., & Castellano, J. (2003). *Inercia térmica de la envolvente de edificios y su influencia en la demanda energética*.
- Bravo Hidalgo, D. (2018). Una Revisión sobre Materiales para Almacenamiento de Energía Solar Térmica. *Ingeniería*, 23(2), 144–165. <https://doi.org/10.14483/23448393.12510>
- Castejón, E. (1983). NTP 74: Confort térmico - Método de Fanger para su evaluación. *Centro De Investigación Y Asistencia Técnica - Barcelona*, 10. https://www.insst.es/documents/94886/326853/ntp_074.pdf/1a5d4655-f44d-4118-9516-281a452e820d
- Dagleish, T., Williams, J. M. G. ., Golden, A.-M. J., Perkins, N., Barrett, L. F., Barnard, P. J., Au Yeung, C., Murphy, V., Elward, R., Tchanturia, K., & Watkins, E. (2007). [No Title]. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136(1), 23–42.
- De Dear, R., & Brager, G. S. (1998). *Thermal adaptation in the built environment: a literature review*. <https://escholarship.org/uc/item/5ts1r442>
- Dolado, P. (2015). *Almacenamiento térmico de energía mediante*. November. https://www.researchgate.net/profile/Pablo_Dolado/publication/284437814_Almacenamiento_termico_de_energia_mediante_cambio_de_fase_Disenio_y_modelizacion_de Equipos_de_almacenamiento_para_intercambio_de_calor_con_aire/links/5653192308ae1ef92975b3d3/Almacena
- Dominguez, M., Arías, J. M., & Díaz, R. (2000). Incorporación de acumuladores de cambio de fase en la construcción. *Coarquitectura*, 55–62.
- Dominguez, M., & Cubillo, F. (2012). *Vivienda Unifamiliar de BAjo Consumo Energético con MCF*. 1–12. <https://core.ac.uk/download/pdf/36076827.pdf>

- Domínguez, M., & Santamaría, S. (2001). *Importancia de la inercia térmica de los cerramientos*. 49–56. <http://www.conarquitectura.com/articulos tecnicos pdf/03.pdf>
- Domínguez, Manuel, & García, C. (2009). Aprovechamiento de los materiales de cambio de fase (PCM) en la climatización. *Informacion Tecnologica*, 20(4), 107–115. <https://doi.org/10.1612/inf.tecnol.4076it.08>
- Domínguez, Manuel, García, C., & Arias, J. M. (2009). *Eficiencia energética en el campo del frío*. 1–13. <http://digital.csic.es/handle/10261/20022>
- Domínguez, Manuel, García, C., González, F., Arias, J. M., & Instituto del frío. (2013). Importancia de la capacidad térmica en la resistencia al paso del calor en los cerramientos. *Con Arquitectura*, 1, 65–72. <http://www.conarquitectura.com/articulos tecnicos pdf/09.pdf>
- Domínguez, Manuel, García, C., M^a, J., Instituto, A., Novais, A., & Domínguez, M. (2009). *Factores importantes en el comportamiento térmico de cerramientos . Ventajas de la incorporación de los materiales de cambio de fase .* 1–8.
- Durán, J. C., & Godfrin, E. M. (2004). Aprovechamiento de la energía solar en la Argentina y en el mundo. *Aprovechamiento de La Energía Solar En La Argentina y En El Mundo. Boletín Energético.*, 16, 44. <http://www.onenergias.com/energia-online/wp-content/uploads/2010/12/aprovechamiento-de-la-energia-solar.pdf%0Ahttp://www.cnea.gob.ar/sites/default/files/duran.pdf>
- Escobar-Ochoa, M., Cuervo-Andrade, S., & Rincon-Prat, S. (2018). Methodology for the design of a thermal energy storage module for asolar tunnel dryer using phase change materials (PCM). *Revista UIS Ingenierías*, 13(1), 9–20. <https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018001>
- Espeau, P., Robles, L., Cuevas-Diarte, M. A., Mondieig, D., & Haget, Y. (1996). Thermal cycling of molecular alloys and eutectics containing alkanes for energy storage. *Materials Research Bulletin*, 31(10), 1219–1232. [https://doi.org/10.1016/0025-5408\(96\)00123-7](https://doi.org/10.1016/0025-5408(96)00123-7)
- Esteban, J., Restrepo, A., Esteban, J., & Restrepo, A. (2020). Metodología para la evaluación energética de edificios comerciales en Colombia basados en estándares y normas internacionales Metodología para la evaluación energética de edificios comerciales en Colombia basados en estándares y normas internacionales.



- Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín Facultad de Minas Escuela de Ingeniería de La Organización.* <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/52242>
- Galeano Bate, S. (2014). Beneficios de la utilización de energía solar en la Escuela Básica N°4765 de la comunidad indígena La Promesa en el departamento de Presidente Hayes. *Congreso Iberoamericano de Ciencia, Tecnología, Innovación y Educación*, 1–9.
- Glendenning, I. (1981). *ADVANCED MECHANICAL ENERGY STORAGE*. <http://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=22550636>
- Godoy Muñoz, A. (2012). *El confort térmico adaptativo: aplicación en la edificación en España.* 64.
https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18763/TFM_Alfonso_Godoy_Munoz.pdf?sequence=1
- Grande R., A. (2016). *Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura.* 94.
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70707/fichero/Proyecto+Fin+de+Máster-Alfonso+Grande+Ruiz.pdf>
- IDAE. (2007). *Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos.*
http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10540_Disenio_y_calculos_a_islamiento_AISLAM_GT3_07_01ee3c15.pdf
- Jensen, R. N. (1980). *Combined solar collector and energy storage system. U.S. Patent No 4,192,290, 11 Mar.* <https://patents.google.com/patent/US4830832A/en>
- Jiménez G., J. R. (2014). The cold and the absence of heat. *Ciencia y Sociedad*, 39, 118.
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87031229005>
- Loyola L., F. E. (2012). *Desarrollo de aislantes térmicos empleando rastrojos de maíz para la construcción de viviendas.* 138.
http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/2390/1/Loyola_Lavin_Felipe_Eduardo.pdf
- Martinez T., A. S. (2012). *Eficiencia energética en rehabilitación de vivienda unifamiliar mediterránea* tipo.
[https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17719/EFICIENCIA ENERGETICA](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/17719/EFICIENCIA_ENERGETICA)

EN REHABILITACION DE VIVIENDA UNIFAMILIAR MEDITERRANEA
TIPO.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- Mazo Olarte, J. (2016). *Investigación sobre la aplicación del almacenamiento de energía térmica mediante materiales de cambio de fase en elementos de construcción termoactivos*. <https://zaguan.unizar.es/record/48320/files/TESIS-2016-115.pdf>
- Miranda, L., & Medina, E. (1998). *Investigando en ingeniería* (E. UNAS. (ed.)). http://isbn.bnpp.gob.pe/catalogo.php?mode=busqueda_menu&id_autor=39478
- Montgomery, D. C., & Peck A., E. (1992). *Introduction to Linear Regression Analysis* (cop. John Wiley & Sons (ed.)). <http://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=111284>
- Moscoso, M. (2016). *Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura* (Vol. 369, Issue 1).
- Muñoz, A. G. (2012). El confort térmico adaptativo. *Master En Sostenibilidad*, 74.
- Ochoa H., A. (2016). *Evaluación de parafina comercial como materia de cambio de fase para almacenamiento de energía*. <https://core.ac.uk/download/pdf/198447145.pdf>
- Oliver-Ramírez, A. (2009). Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. (*PhD-Tesis*), 386.
- Oliver, A., Neila, F. J., & García-Santos, A. (2012). Clasificación y selección de materiales de cambio de fase según sus características para su aplicación en sistemas de almacenamiento de energía térmica. *Materiales de Construcción*, 62, 131–140. <https://doi.org/10.3989/mc.2012.58010>
- Parra, M. (2003). Conceptos básicos en salud laboral. In *Textos de capacitación*. <http://www.edpcollege.info/ebooks-pdf/ser009.pdf>
- Reglamento Nacional de Edificaciones. (2014). EM. 110 Confort Térmico y Lumínico con Eficiencia Energética. In *El Peruano* (Vol. 1, p. 50). <https://www.construccion.org/normas/rne2012/rne2006.htm>
- Ruiz, A. G. (2016). *Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura*.
- Sanguinetti Remusgo, E. (2017). *Manual de Refrigeración y Acondicionamiento de Aire* (I).



- Shchukina, E. M., Graham, M., Zheng, Z., & Shchukin, D. G. (2018). Nanoencapsulation of phase change materials for advanced thermal energy storage systems. *Chemical Society Reviews*, 47(11), 4156–4175. <https://doi.org/10.1039/c8cs00099a>
- Solana Martínez, L., & Montañana Aviñó, A. (2011). *Pfg Científico -Técnico*.
- Yang, Z., & Garimella, S. V. (2010). Thermal analysis of solar thermal energy storage in a molten-salt thermocline. *Solar Energy*, 84(6), 974–985. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.007>
- Yogi Goswami, D. (2014). *Principles of Solar Engineering* (Third edit).
- Zhang, X., Zhang, S., Wang, C., Wang, B., & Guo, P. (2014). Effects of moderate strength cold air exposure on blood pressure and biochemical indicators among cardiovascular and cerebrovascular patients. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 11(3), 2472–2487. <https://doi.org/10.3390/ijerph110302472>

ANEXOS

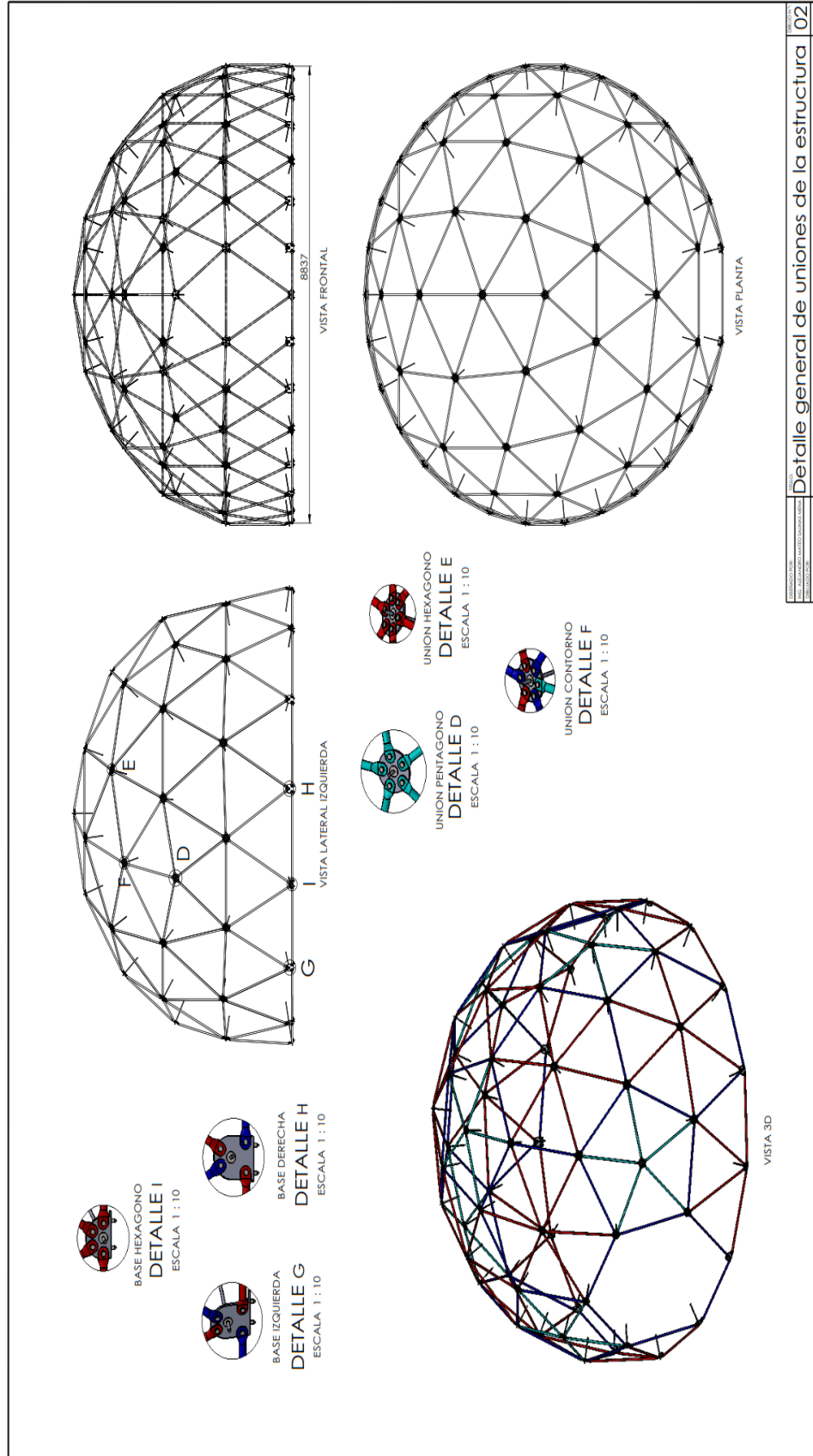
ANEXO 1:

MAPA DE POTENCIAL ENERGÉTICO DE RADIACIÓN SOLAR DEL PERÚ



Fuente:

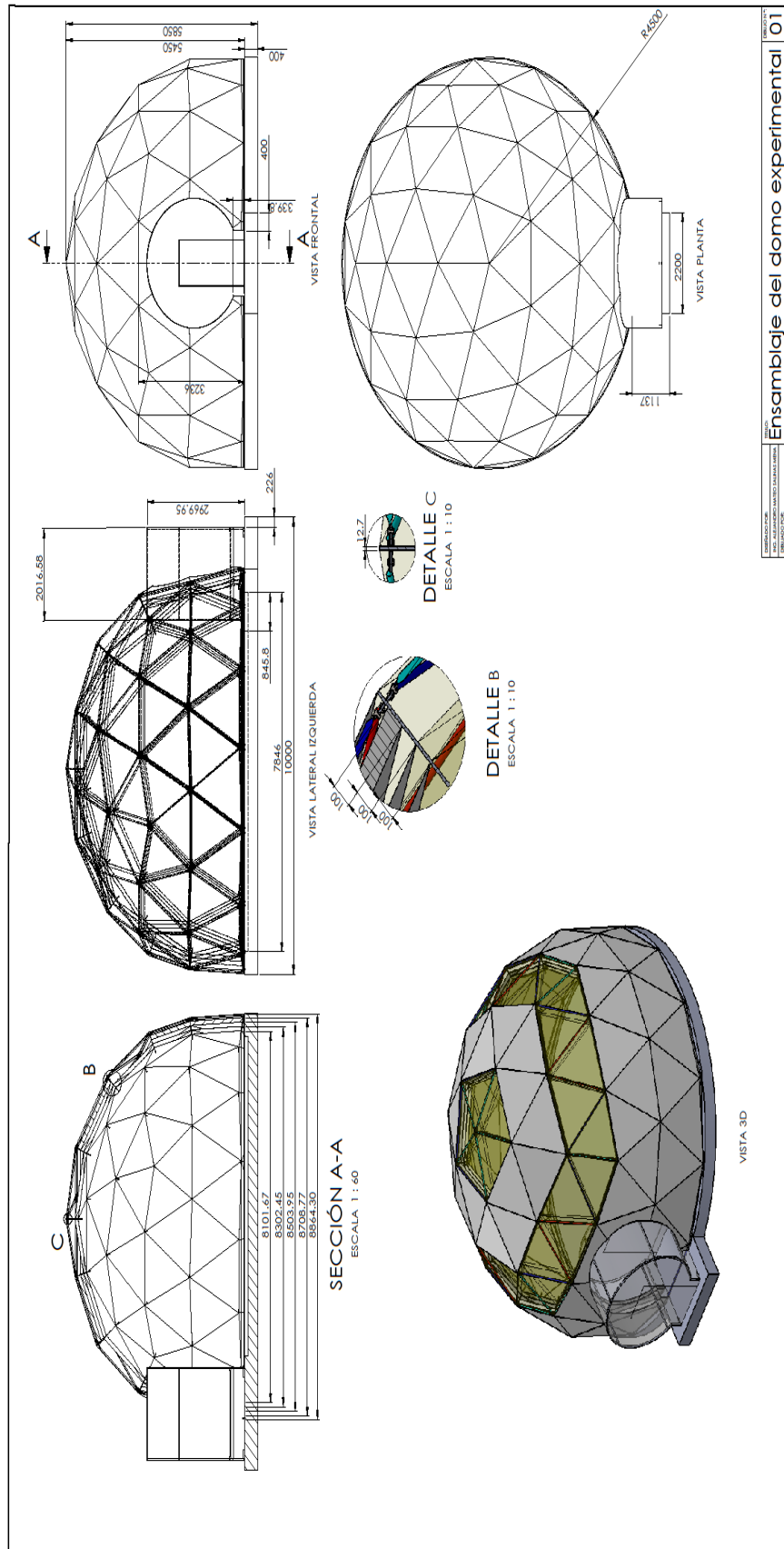
ANEXO 2:
PLANO N° 01 ENSAMBLAJE DEL DOMO EXPERIMENTAL



PROYECTANTE	PROFESOR	FECHA	02
ELABORADOR	INGENIERO	FECHA	02
TÍTULO: Detalle general de uniones de la estructura			
CANTON: PUNO			

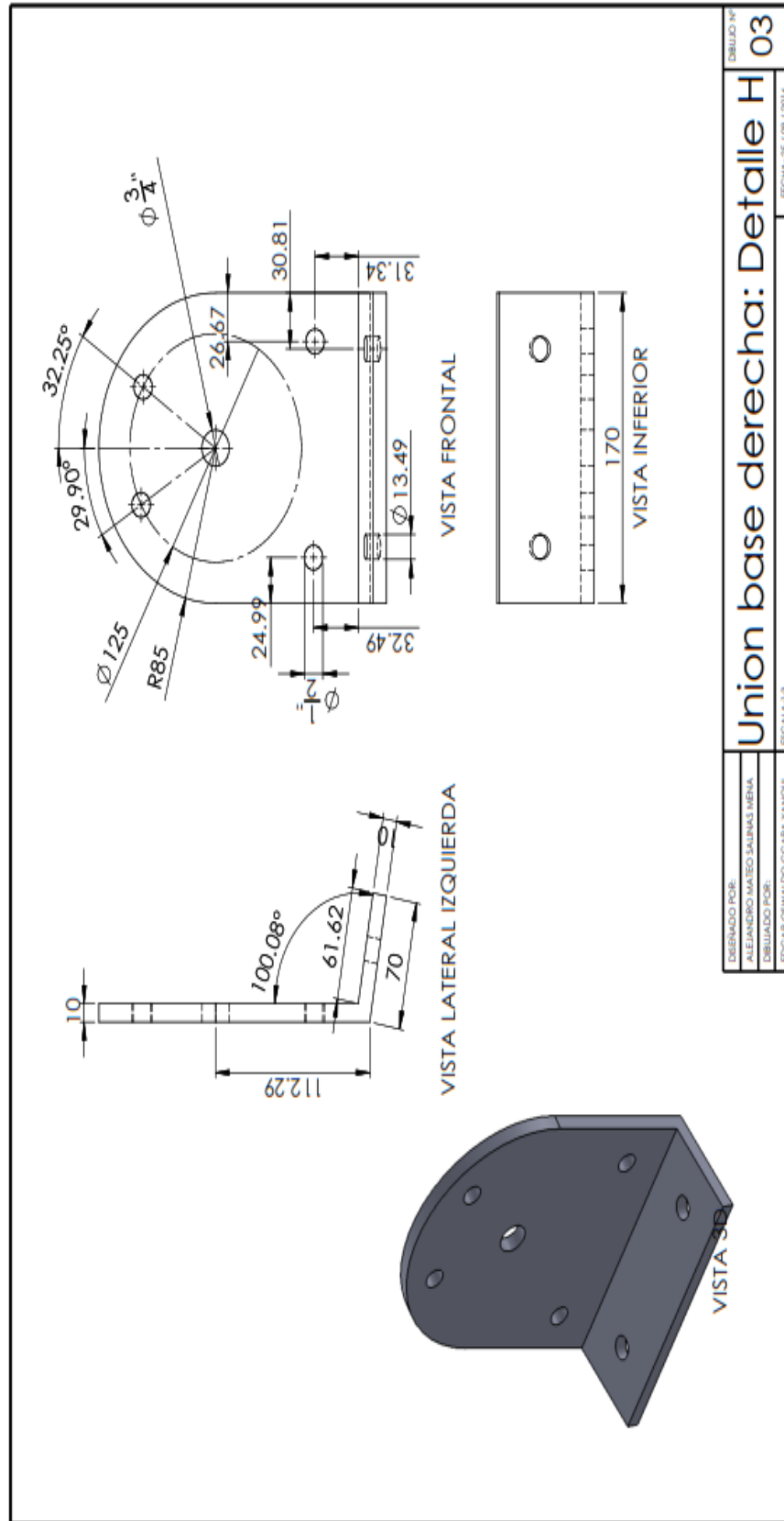
Elaboración propia

ANEXO 3:
PLANO N° 02 DETALLE GENERAL DE UNIONES DE LA ESTRUCTURA



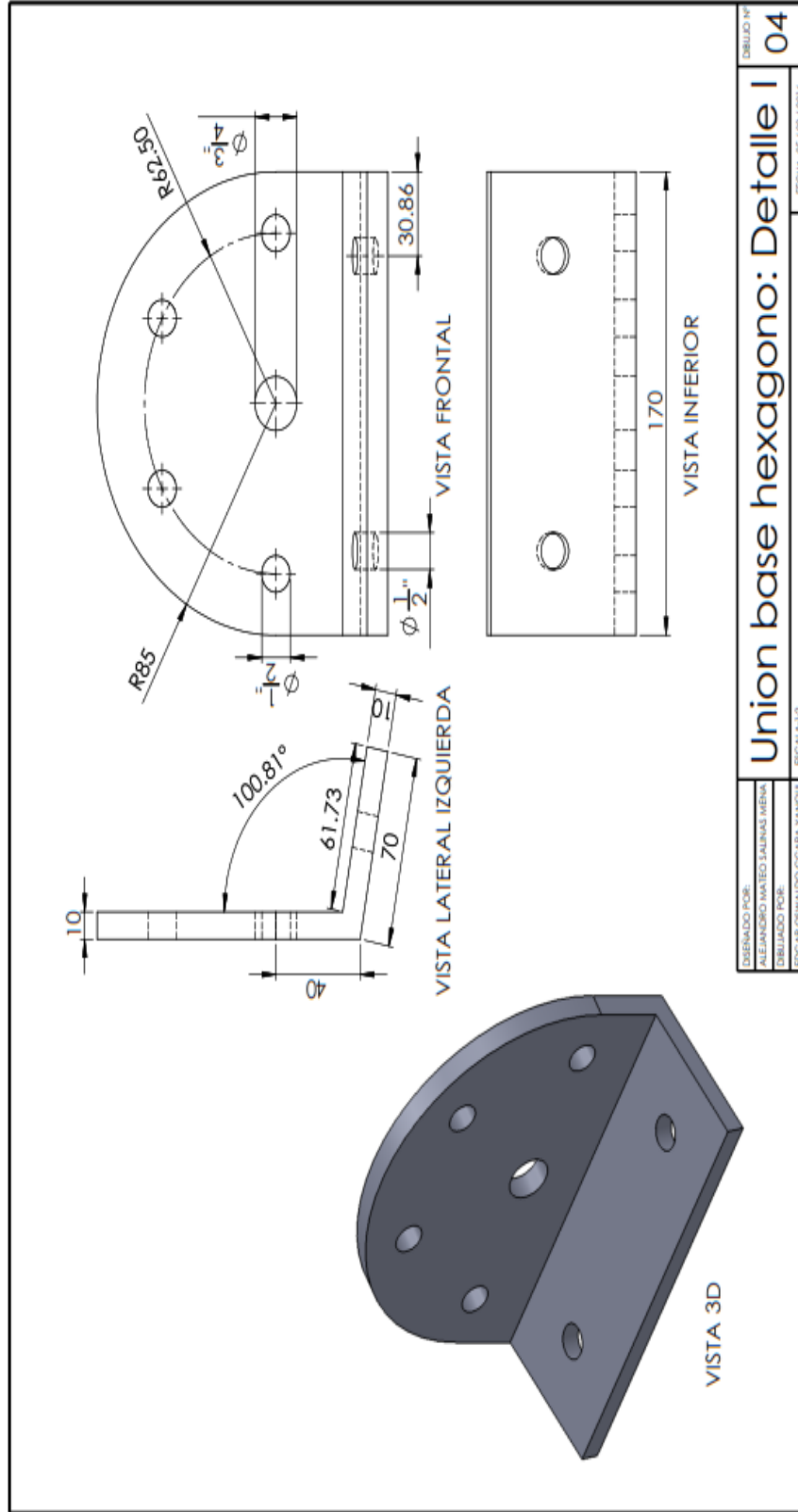
Elaboración propia

ANEXO 4:
PLANO N° 03 UNIÓN BASE DERECHA DETALLE H



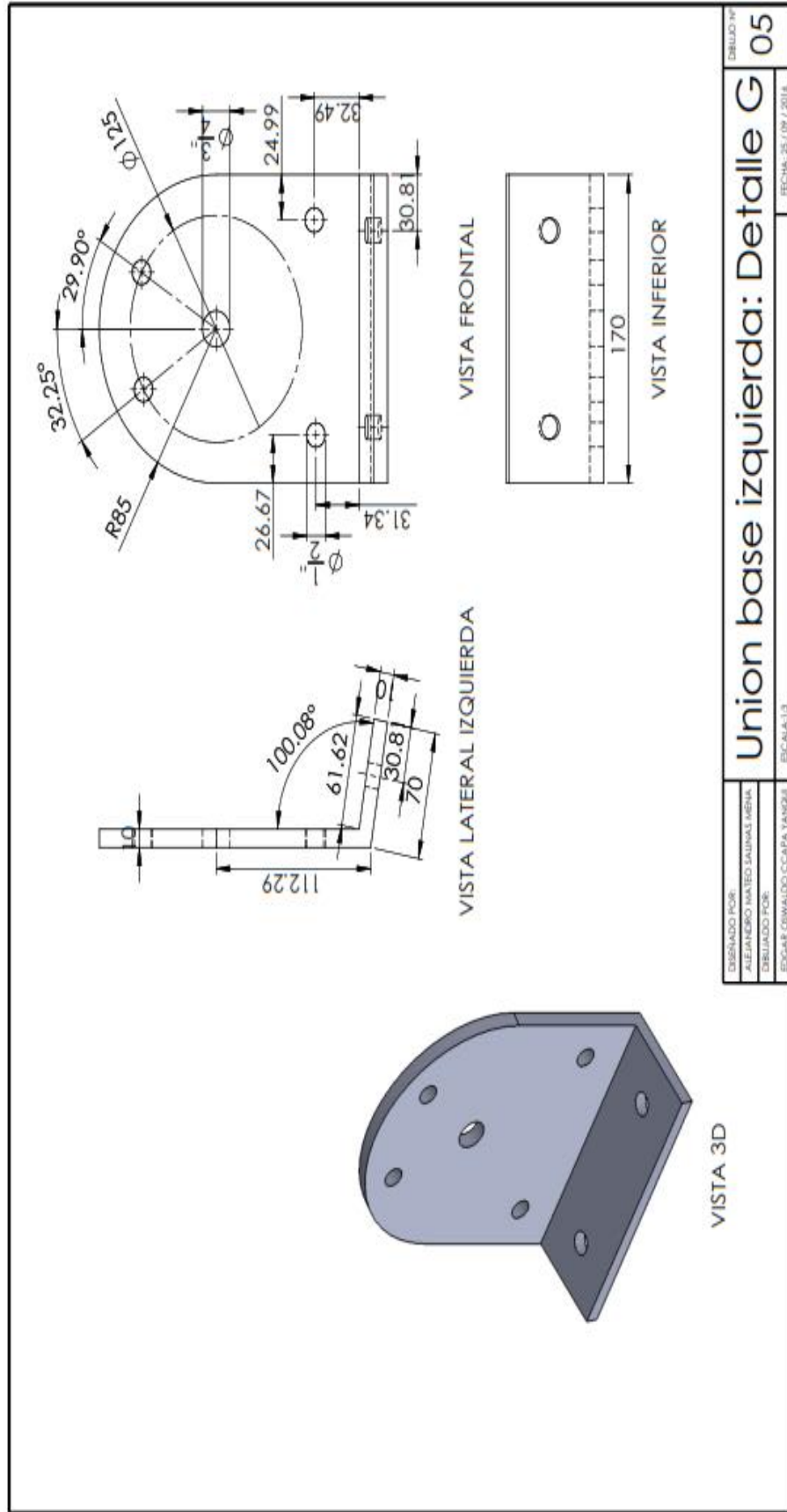
Elaboración propia

ANEXO 5:
PLANO N° 04 UNIÓN BASE HEXÁGONO DETALLE I



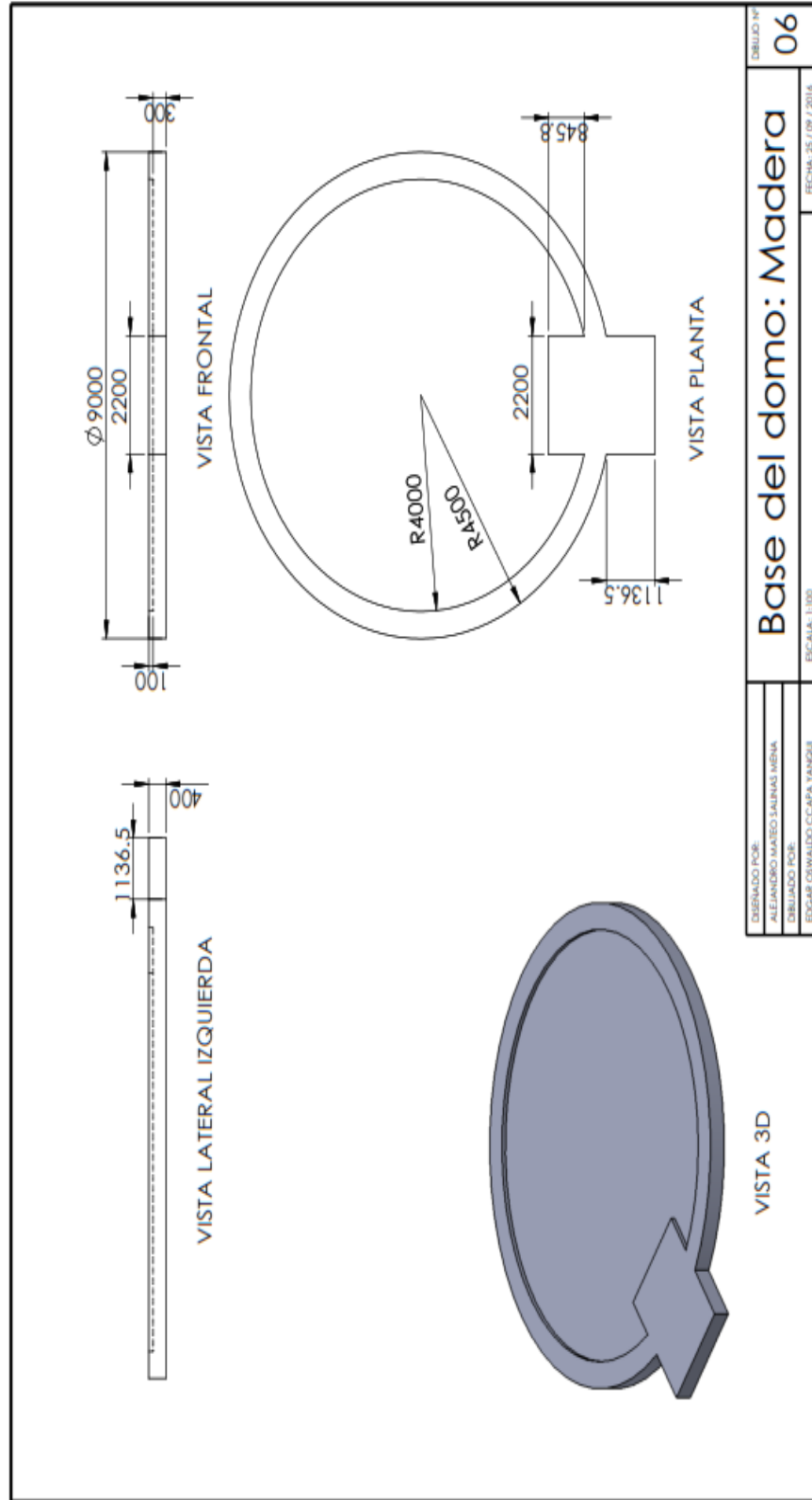
Elaboración propia

ANEXO 6:
PLANO N° 05 UNIÓN BASE IZQUIERDA DETALLE G



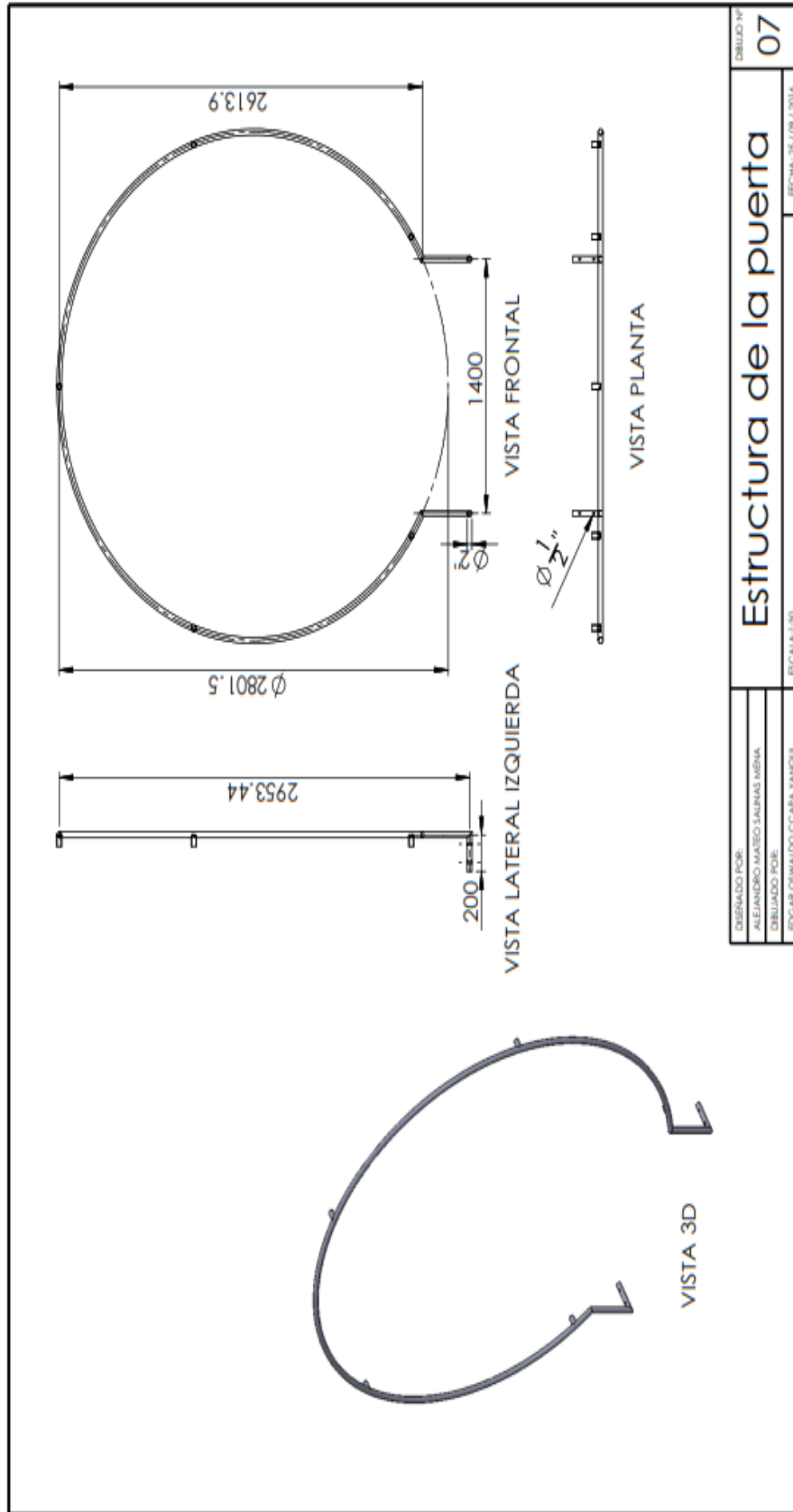
Elaboración propia

ANEXO 7:
PLANO N° 6 BASE DEL DOMO: MADERA



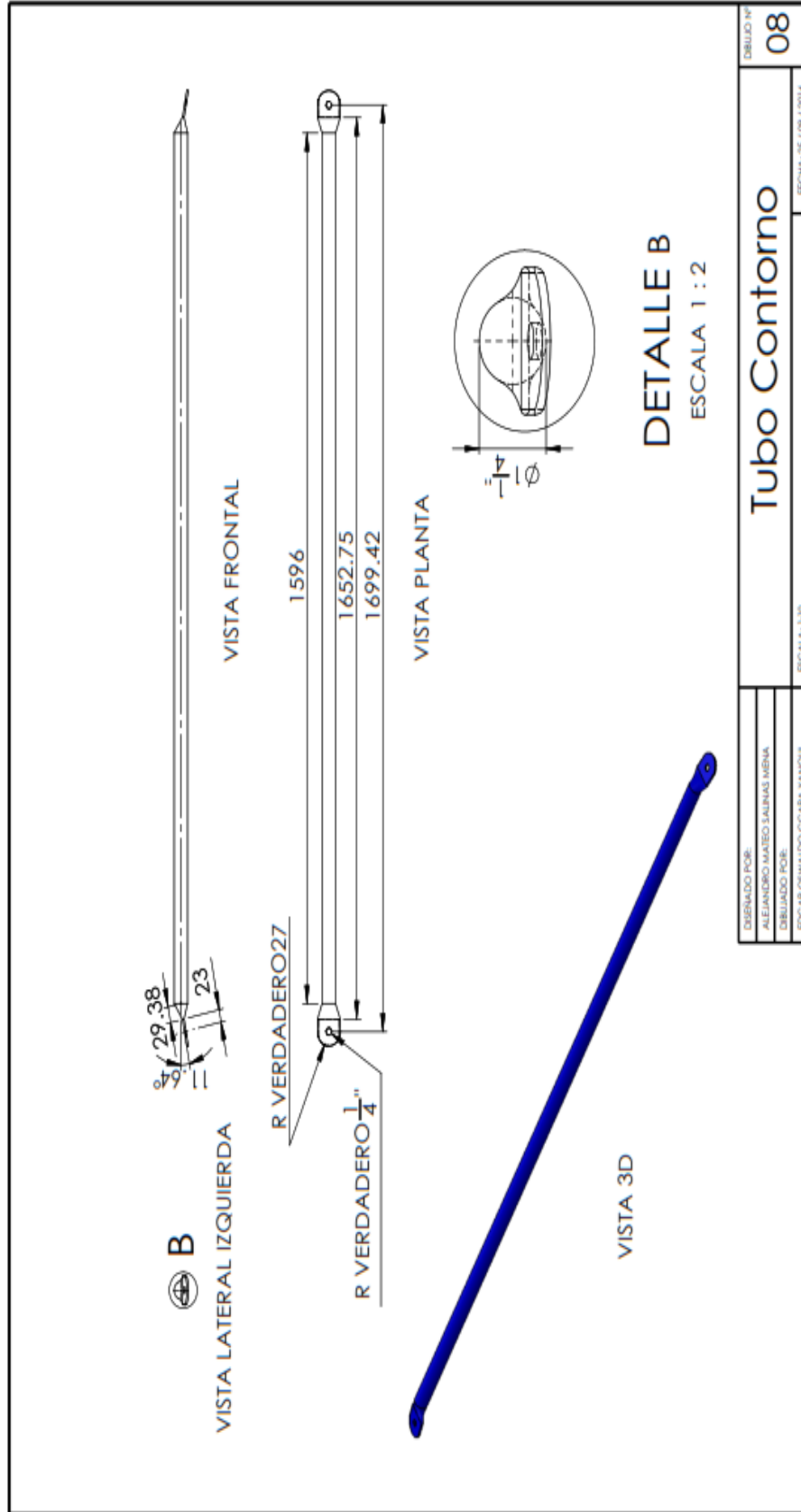
Elaboración propia

ANEXO 8:
PLANO N° 07 ESTRUCTURA DE LA PUERTA



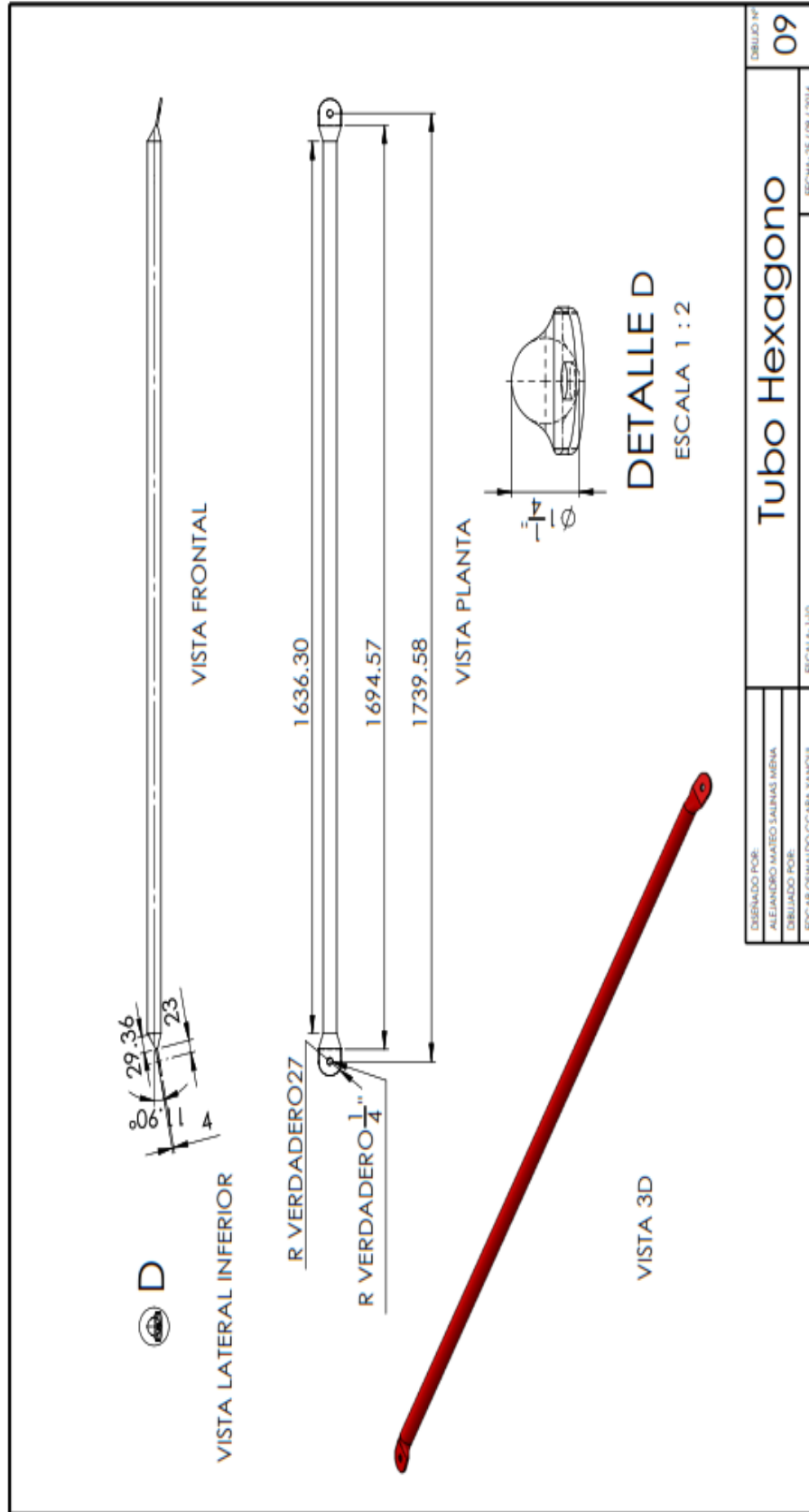
Elaboración propia

ANEXO 9:
PLANO N° 08 TUBO DE CONTORNO



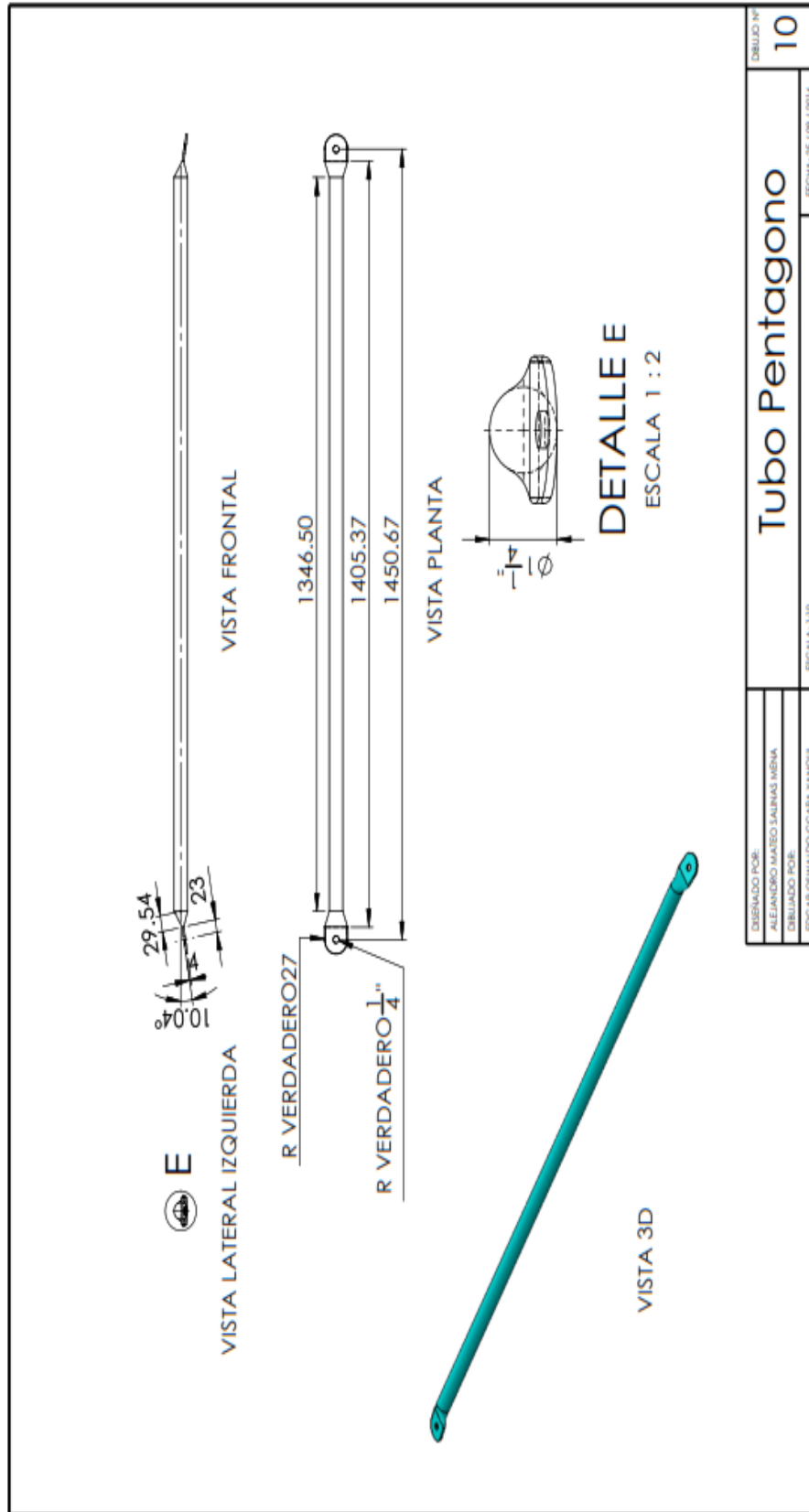
Elaboración propia

ANEXO 10:
PLANO N° 09 TUBO DE HEXÁGONO



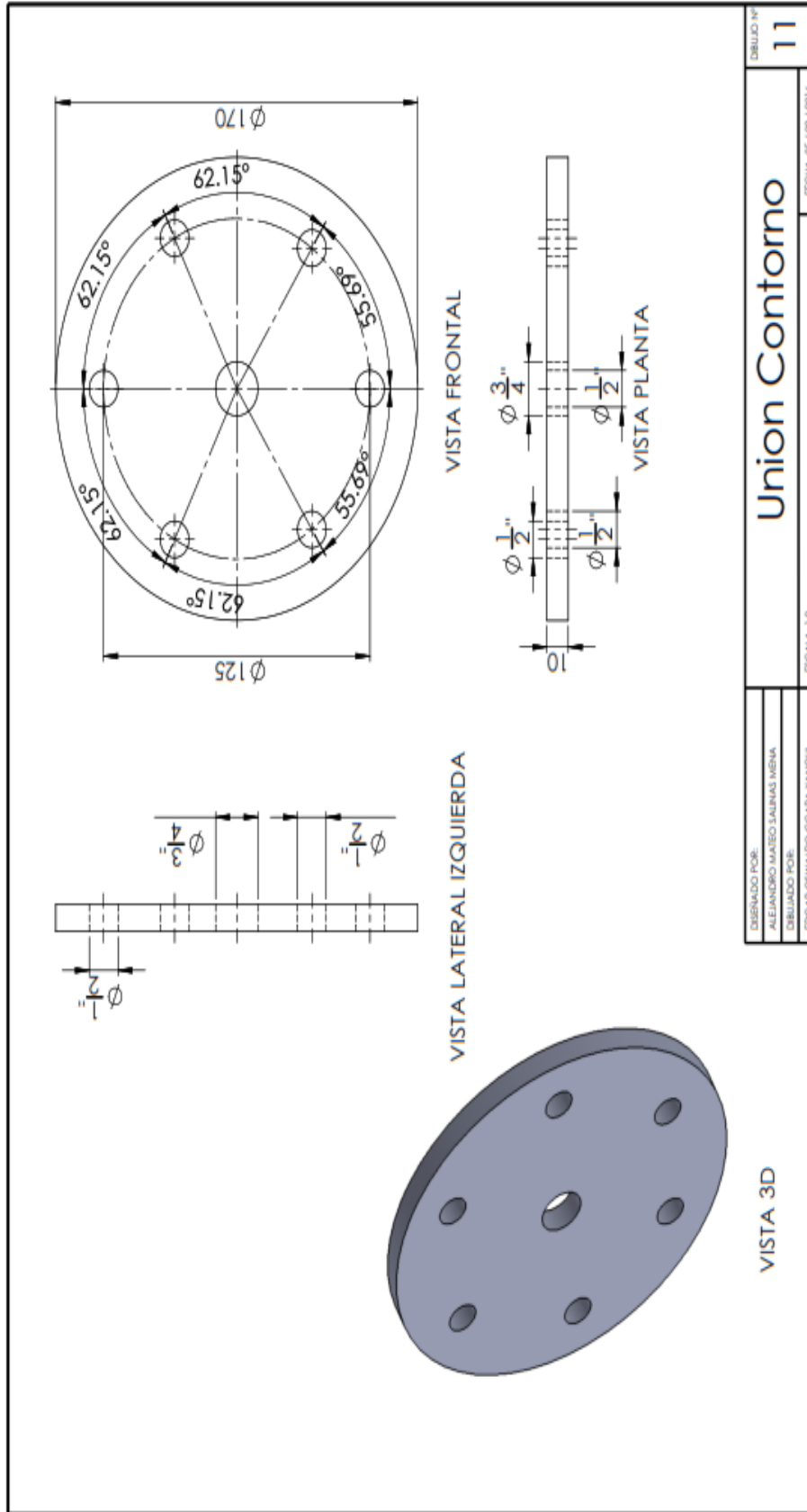
Elaboración propia

ANEXO 11:
PLANO N° 10 TUBO DE PENTÁGONO



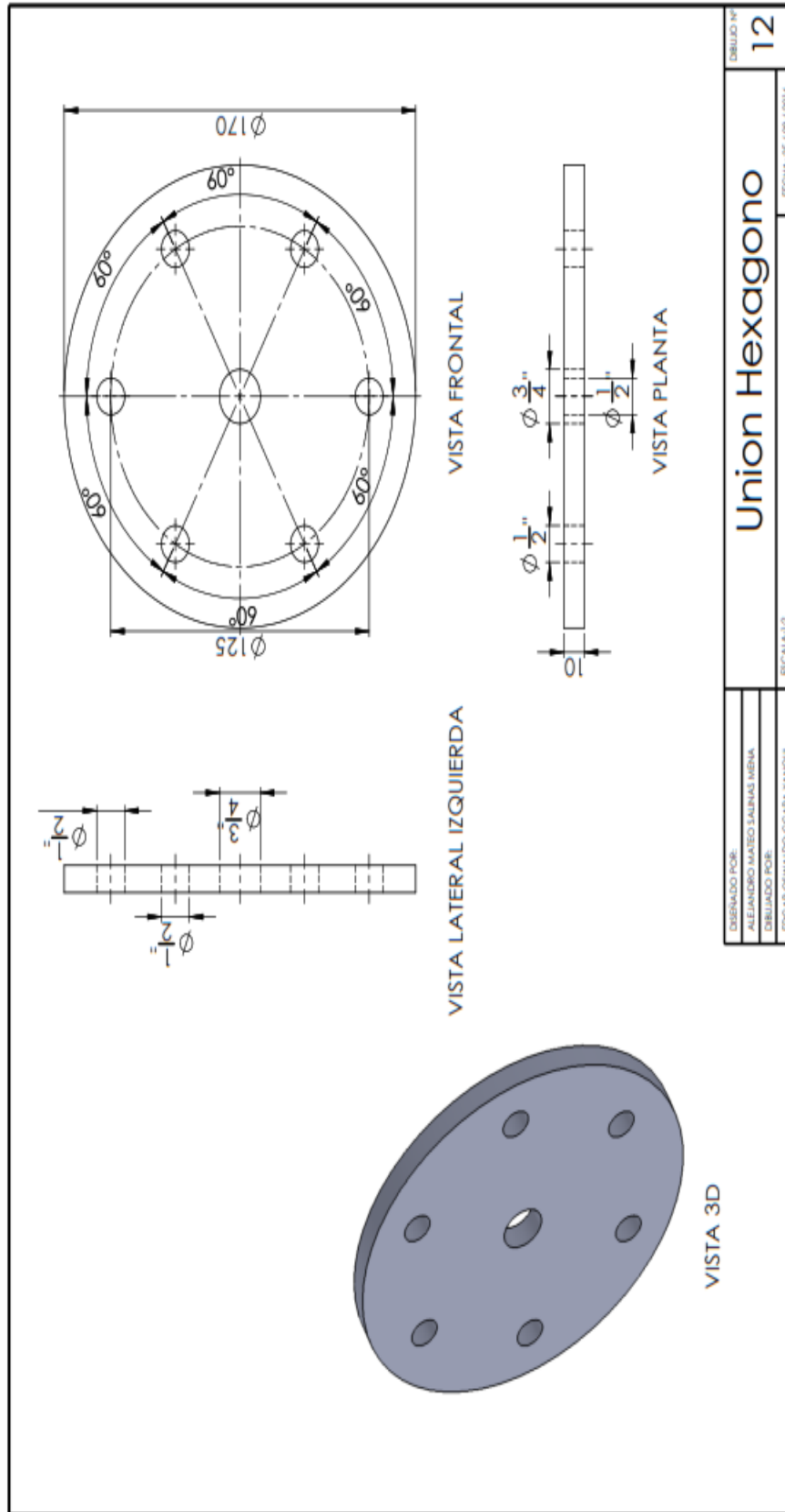
Elaboración propia

ANEXO 12:
PLANO N° 11 UNIÓN DE CONTORNO



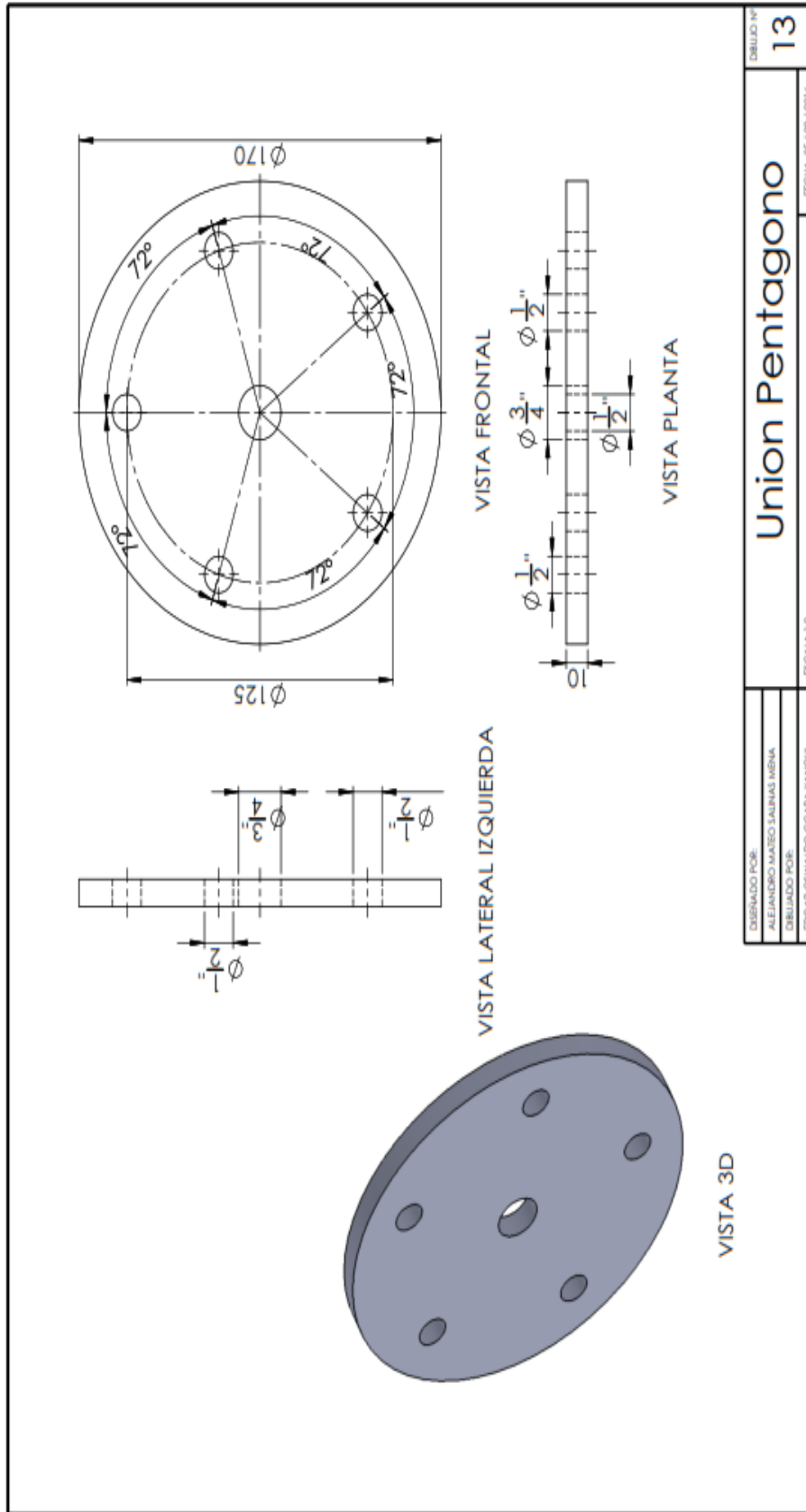
Elaboración propia

ANEXO 13:
PLANO N° 12 UNIÓN DE HEXÁGONO



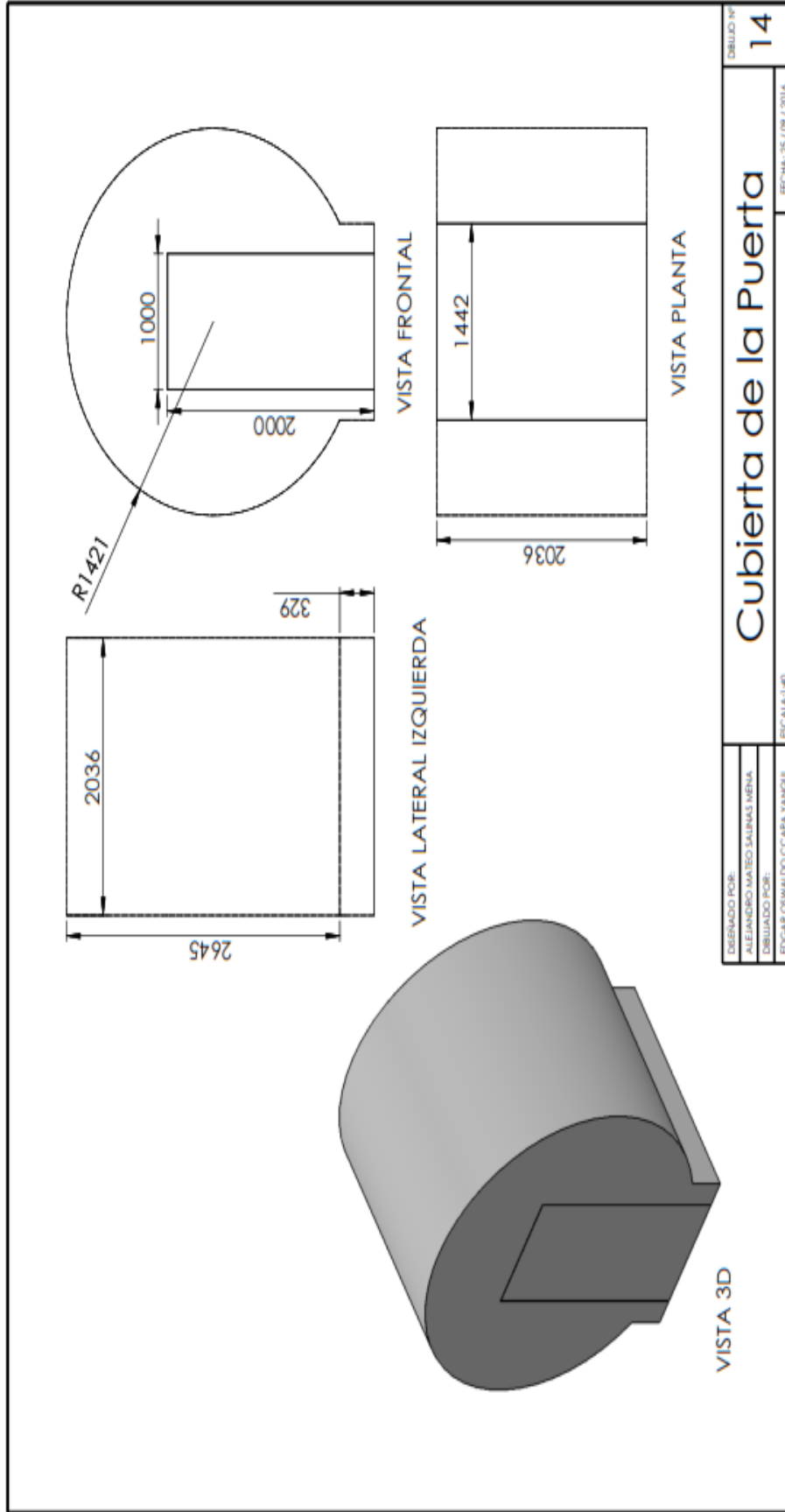
Elaboración propia

ANEXO 14:
PLANO N° 13 UNIÓN DE PENTÁGONO



Elaboración propia

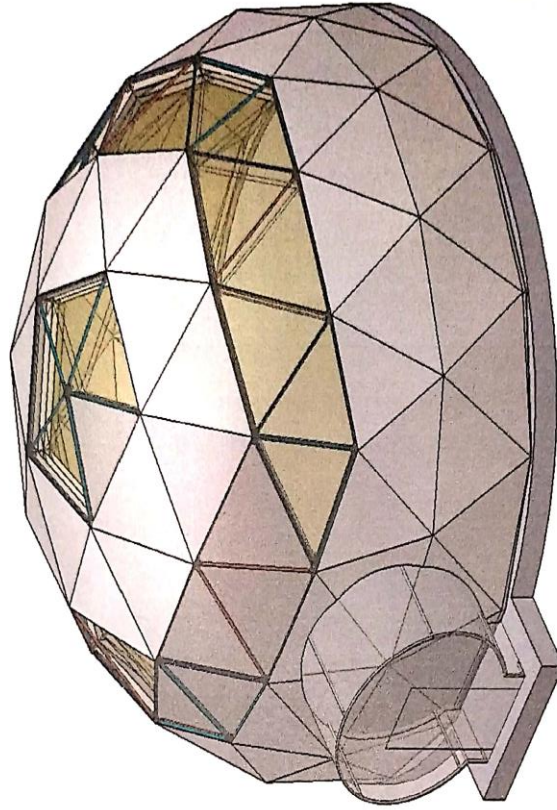
ANEXO15:
PLANO N° 14 CUBIERTA DE LA PUERTA



Elaboración propia

ANEXO16:
PLANO N° 15 MATERIALES

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Base Madera		1
2	Capa PVC Interior 1		1
3	Capa PVC Interior 2		1
4	Capa Interior PER		1
5	Tubo Contorno		55
6	Union Contorno		30
7	Union Hexagono		10
8	Union Pentagono		6
9	Base Derecha		5
10	Base Hexagono		5
11	Base Izquierda		5
12	Tubo Hexagono		80
13	Tubo Pentagono		30
14	Union capas		61
15	Capa PVC Exterior		1
16	puerta		2
17	Union puerta		5
18	contorno puerta		1
19	heavy hex finished bolt_ai		330
20	heavy hex jam nut_ai		330
21	flat washer type b wide_ai		130
22	hex lag screw_ai		30
23	hex jam nut_ai		78

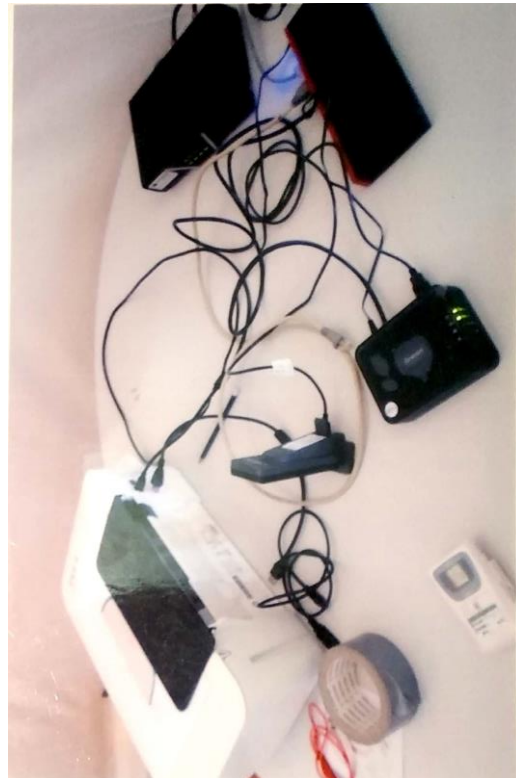


DISEÑADO POR: ALEJANDRO MATEO SALINAS MENA
 DISEÑADO POR: EDGAR OSWALDO CCAPA YANQUI
 FECHA: 25 / 09 / 2016
MATERIALES
 UNA - PUNO PLANO N° 15 ESCALA: 1: 100

Elaboración propia

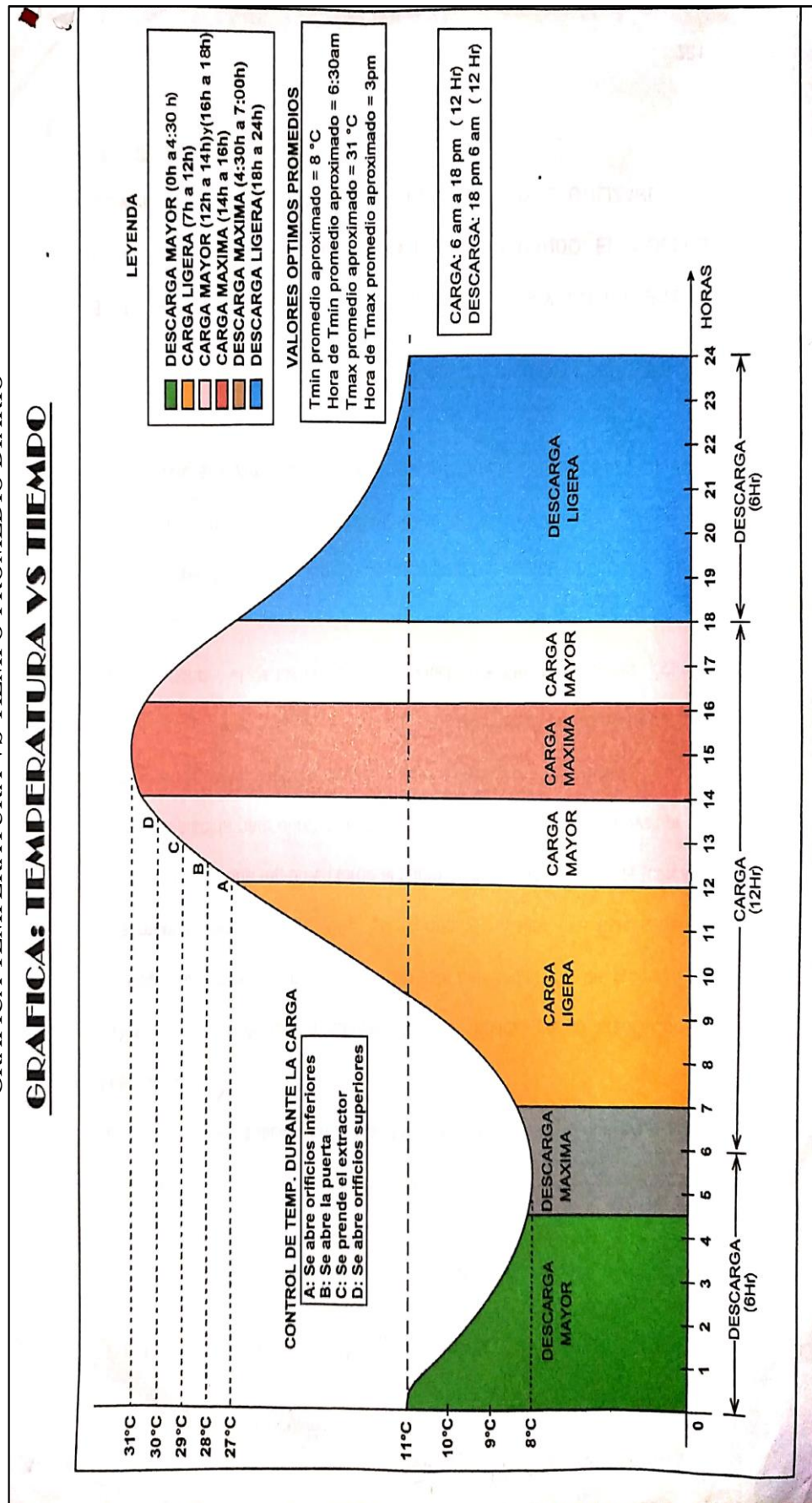


FOTOGRAFÍAS DEL DOMO EXPERIMENTAL INSTALADO EN LA CIUDAD DE URUBAMBA - CUSCO



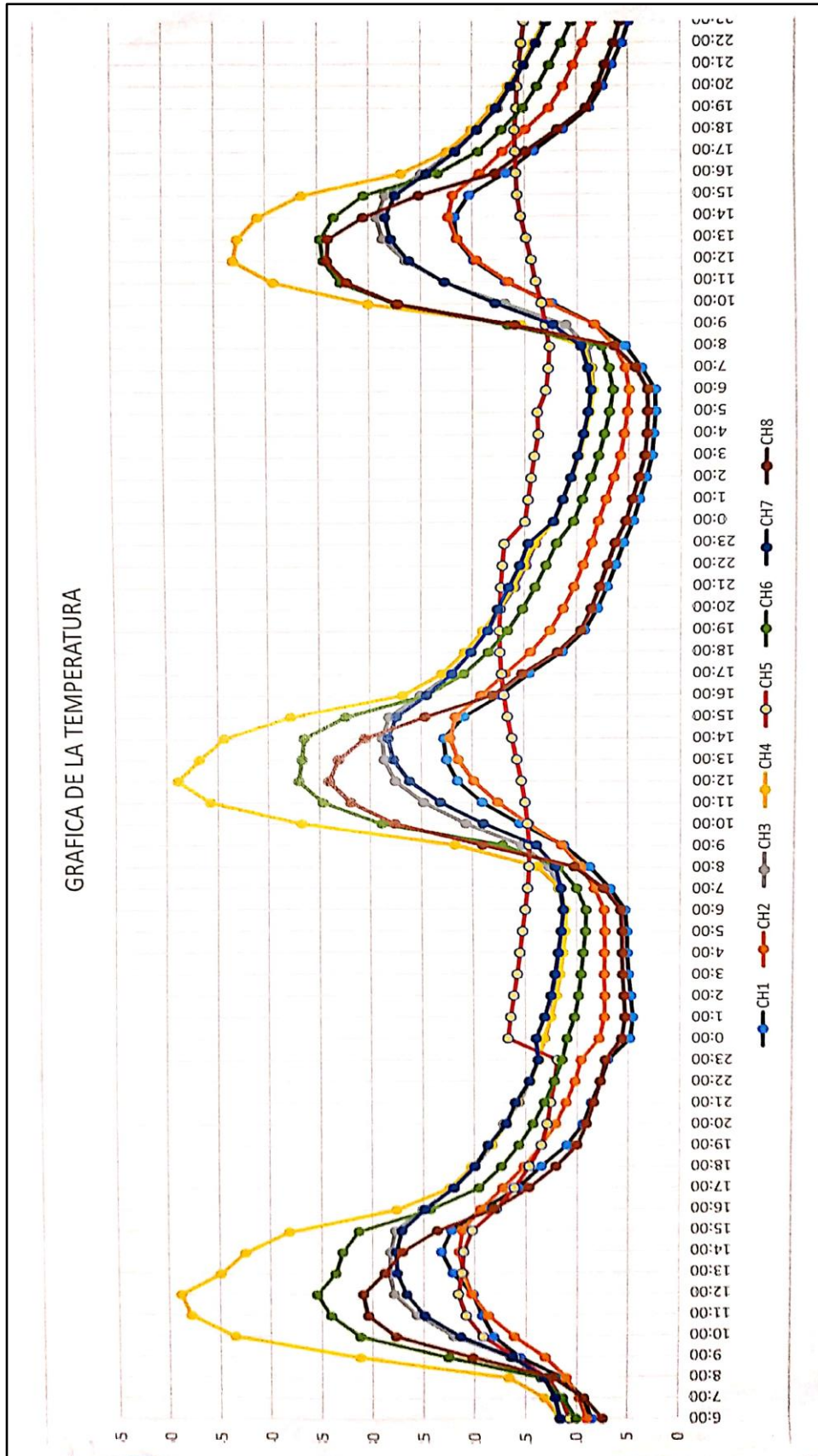
FOTOGRAFÍAS DE LAS PLACAS: PCM23 Y PCM45

ANEXO 17:
GRAFICA TEMPERATURA VS TIEMPO PROMEDIO DIARIO
GRAFICA: TEMPERATURA VS TIEMPO



Elaboración propia

ANEXO 18:
GRAFICA DE TEMPERATURAS VS TIEMPO PROMEDIO TRIMESTRAL



ANEXO 19:
DATOS METEOROLÓGICOS DE PROMEDIOS DE TEMPERATURA



NASA Surface meteorology and Solar
Energy: Interannual Variability



Latitude **-13.297** / Longitude **-72.172** was chosen.

Geometry Information

Elevation: 3185 meters
taken from the
NASA GEOS-4
model elevation

Northern boundary
-13
Western boundary -73 Center Latitude **-13.5** Longitude **-72.5** Eastern boundary -72
Southern boundary
-14

Monthly Averaged Air Temperature At 10 m Above The Surface Of The Earth (°C)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1990	10.57	10.97	10.81	10.18	7.94	6.40	5.52	7.09	8.99	10.23	10.86	10.88	9.19
1991	11.39	11.13	10.85	9.74	9.35	7.82	7.26	7.50	9.29	9.92	10.48	10.96	9.63
1992	10.94	10.76	10.79	9.60	9.10	7.13	5.95	7.39	8.55	9.31	10.17	10.33	9.16
1993	10.09	10.01	9.52	9.29	7.92	7.39	6.86	7.45	9.02	9.80	10.51	11.28	9.09
1994	10.47	10.41	9.21	8.86	7.78	7.14	7.31	8.23	9.93	10.64	10.84	11.67	9.37
1995	11.40	11.07	10.91	9.90	8.72	7.77	7.97	9.34	9.38	10.93	10.93	10.70	9.91
1996	10.49	10.74	10.97	10.01	8.06	6.63	6.54	8.05	9.01	10.19	10.51	10.65	9.32
1997	11.30	10.45	10.99	9.99	8.36	7.95	7.52	7.81	9.39	10.56	11.20	11.88	9.78
1998	12.24	12.31	12.38	11.63	9.08	7.40	6.96	8.39	9.65	10.63	11.45	11.52	10.29
1999	11.11	10.62	10.68	9.96	8.86	8.16	6.97	8.16	9.40	9.71	10.79	11.02	9.61
2000	10.66	10.46	10.13	10.36	8.78	6.87	6.79	7.77	8.90	8.91	9.97	10.21	9.14
2001	10.13	9.95	10.45	9.57	8.25	6.78	7.44	7.74	9.16	10.71	11.04	11.00	9.35
2002	11.05	11.06	11.18	10.45	9.35	7.76	6.43	8.20	8.89	10.05	10.38	11.07	9.65
2003	11.30	11.25	11.05	10.33	9.27	8.32	6.87	7.70	9.45	10.97	11.44	11.23	9.92
2004	11.44	11.14	11.54	10.58	7.75	6.46	6.09	7.20	9.68	10.56	10.95	11.43	9.56
2005	11.56	11.27	11.46	10.71	9.43	7.97	7.74	9.08	8.91	10.46	11.22	11.26	10.08
1990 - 2005	11.01	10.85	10.81	10.07	8.62	7.37	6.89	7.94	9.22	10.22	10.80	11.07	9.57
Min Dif	-0.92	-0.90	-1.60	-1.21	0.87	0.97	1.37	0.85	0.68	-1.31	-0.82	-0.86	-1.03
Max Dif	1.23	1.46	1.57	1.56	0.80	0.95	1.08	1.40	0.71	0.74	0.65	0.81	1.08



NASA Surface meteorology and Solar
Energy: Interannual Variability



7.94 = 8.62 + 7.37 + 6.89 + 7.94

ANEXO 20:
DATO METEOROLÓGICO PROMEDIO DE HUMEDAD RELATIVA

Latitude -13.297 / Longitude -72.172 was chosen.

Geometry Information

Elevation: **3185** meters
taken from the
NASA GEOS-4
model elevation

Northern boundary
-13
Center
Latitude **-13.5**
Longitude **-72.5**
Western boundary
-73
Eastern boundary
-72
Southern boundary
-14

Monthly Averaged Relative Humidity (%)

Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1990	82.73	82.02	82.85	81.63	74.88	71.00	55.38	56.00	56.01	69.13	79.51	83.93	72.86
1991	85.53	84.66	85.39	81.48	73.34	62.75	46.83	45.47	58.48	68.66	83.14	82.60	71.42
1992	84.68	83.58	83.87	82.79	71.64	67.98	52.42	58.30	69.76	76.03	74.39	84.12	74.08
1993	86.07	84.60	86.46	83.63	72.66	52.72	59.09	55.07	62.43	75.18	83.33	85.95	73.88
1994	86.69	86.73	84.31	85.44	77.88	57.24	48.84	40.71	64.76	61.23	68.48	82.14	70.25
1995	83.99	84.56	82.31	81.93	70.12	56.80	56.38	43.77	60.53	63.71	76.11	82.96	70.16
1996	86.77	86.38	83.84	83.89	79.49	60.40	45.95	60.97	59.94	77.17	83.75	86.01	74.51
1997	86.19	87.43	83.46	80.03	75.29	70.61	58.78	75.84	71.64	78.44	84.89	86.85	78.23
1998	88.61	87.65	85.13	85.10	76.43	78.36	60.79	70.20	63.67	80.61	80.96	85.24	78.51
1999	86.18	90.14	88.58	82.70	79.14	77.49	75.71	55.16	76.90	82.89	82.60	87.48	80.34
2000	85.98	86.78	87.44	83.48	83.41	80.21	63.45	72.73	76.85	80.15	82.18	85.59	80.65
2001	87.29	88.12	86.67	83.77	84.56	77.80	73.39	59.56	82.30	81.15	85.62	84.28	81.14
2002	86.59	87.82	87.43	84.57	83.11	83.42	78.49	62.12	74.65	83.57	84.53	87.24	81.91
2003	86.64	86.12	85.56	83.38	82.44	79.33	75.10	70.08	67.64	72.77	80.16	86.43	79.61
2004	85.78	84.40	84.15	85.20	81.82	76.86	74.51	57.79	63.99	81.55	85.09	87.42	79.03
2005	85.31	85.57	85.18	83.98	80.16	72.81	61.71	59.39	76.31	83.81	83.19	86.20	78.57
1990 - 2005	85.94	86.04	85.16	83.31	77.90	70.36	61.68	58.95	67.87	76.00	81.12	85.28	76.63
Min Dif	-3.21	-4.01	-2.86	-3.28	-7.78	17.64	15.73	18.23	11.86	14.78	12.64	-3.13	-9.60
Max Dif	2.67	4.10	3.41	2.12	6.66	13.06	16.81	16.89	14.43	7.81	4.50	2.20	7.89

DATO PROMEDIO DE IRRADIACIÓN SOLAR



NASA Surface meteorology and Solar
Energy: Interannual Variability



Latitude **-13.25** / Longitude **-72.33** was chosen.

Geometry Information

Elevation: **3185** meters
taken from the
NASA GEOS-4
model elevation

Northern boundary
-13

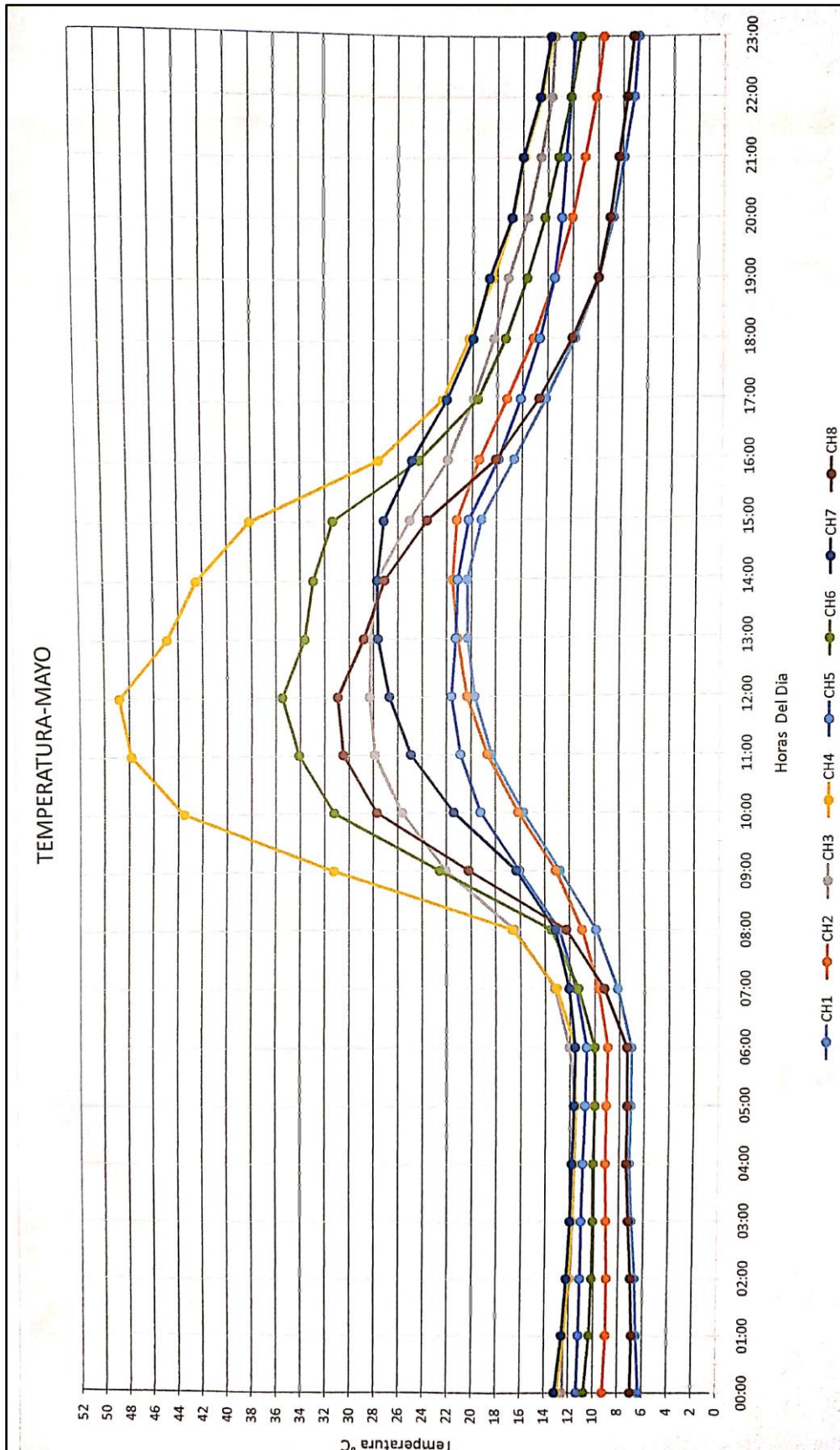
Western boundary -73 Center Latitude **-13.5** Eastern boundary -72
Longitude **-72.5**

Southern boundary
-14

Monthly Averaged Insolation Incident On A Horizontal Surface (kWh/m²/day)

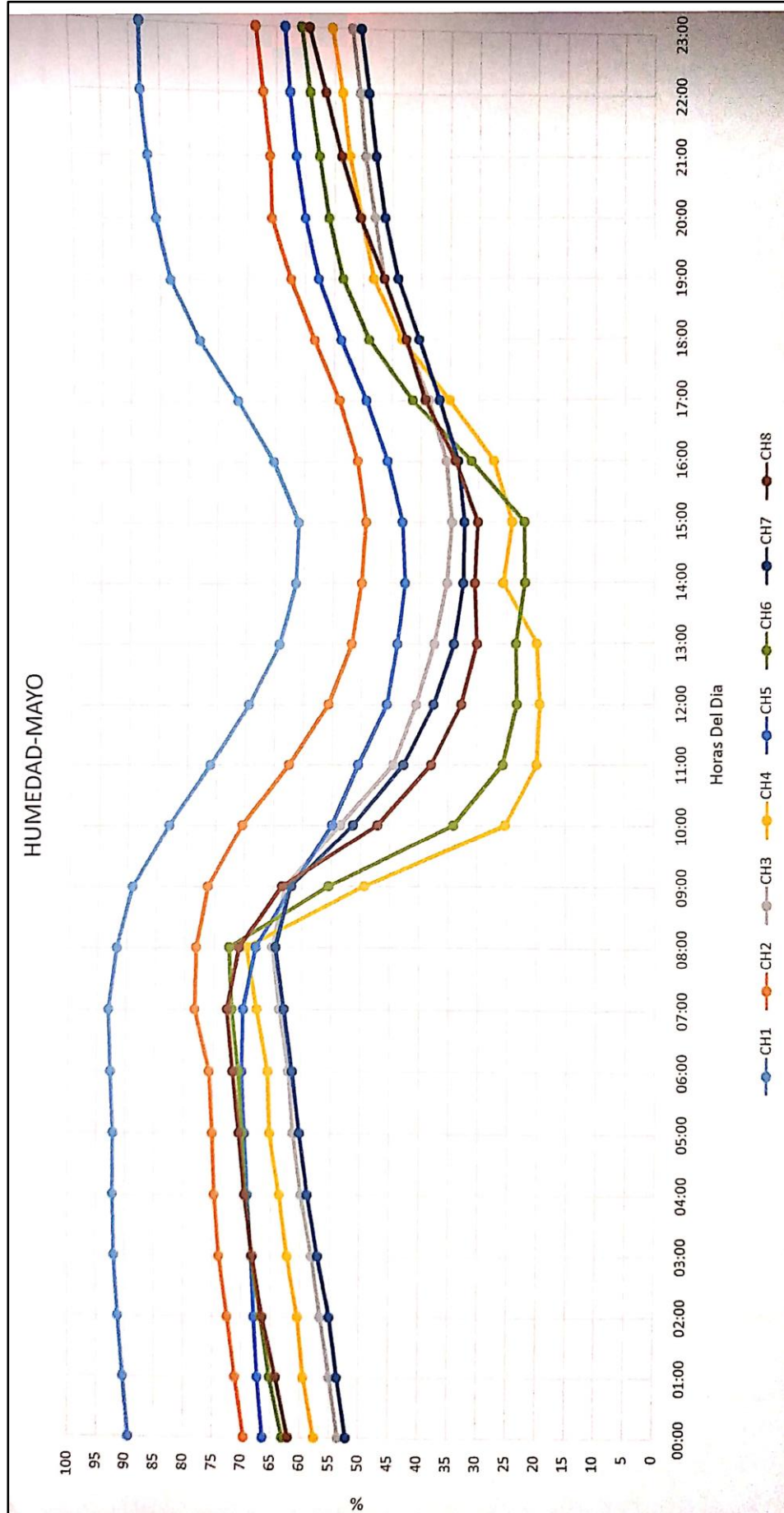
Year	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Annual
1985	5.52	5.59	5.24	4.72	4.77	4.95	5.25	5.28	5.69	6.52	5.85	5.25	5.38
1986	5.20	5.12	5.05	5.13	5.58	5.30	5.17	5.09	5.38	6.54	6.46	5.73	5.48
1987	5.62	6.02	6.08	5.52	5.50	5.44	5.39	5.81	5.99	6.34	5.76	6.16	5.80
1988	5.11	5.83	4.84	4.86	5.03	5.49	5.62	6.14	5.72	6.40	6.40	6.04	5.62
1989	5.56	5.77	5.29	5.08	4.90	4.85	5.38	5.36	6.16	6.16	7.17	6.90	5.71
1990	5.90	6.70	5.85	5.75	5.12	4.46	5.37	5.72	6.06	5.88	6.00	5.98	5.73
1991	6.00	5.70	5.30	5.25	5.41	5.27	5.63	5.97	6.01	6.10	6.62	6.79	5.84
1992	6.11	6.52	5.85	5.82	5.85	4.60	5.40	5.13	5.47	5.05	5.93	5.53	5.60
1993	5.05	5.48	5.63	4.78	5.12	5.54	5.27	5.48	5.19	5.46	5.52	5.55	5.34
1994	5.57	5.38	5.48	4.95	5.28	5.25	5.28	5.81	5.51	5.76	5.91	5.53	5.48
1995	5.58	5.49	5.08	4.99	5.56	5.10	5.07	5.61	5.41	6.48	6.25	6.13	5.56
1996	5.35	5.19	5.47	5.15	5.17	5.40	5.27	4.80	5.91	6.56	6.84	5.93	5.59
1997	5.43	5.39	5.95	5.35	5.08	5.34	5.45	5.02	5.73	5.96	6.51	6.05	5.61
1998	5.53	5.47	5.78	5.58	5.77	4.89	5.33	5.22	6.11	5.97	6.65	5.87	5.68
1999	5.29	5.33	5.12	5.05	5.23	5.39	5.09	5.75	5.70	5.62	6.87	5.83	5.52
2000	5.04	4.99	4.92	5.20	5.30	4.85	4.92	4.98	5.71	5.42	7.16	5.66	5.34
2001	5.04	5.00	4.83	5.27	5.10	4.79	4.67	5.37	5.62	6.30	6.33	6.11	5.37
2002	5.43	4.61	5.11	5.03	5.03	4.81	4.15	5.19	5.29	5.56	5.95	6.05	5.19
2003	5.60	5.48	5.08	5.08	5.13	5.08	5.12	5.11	6.13	6.75	6.69	5.70	5.58
2004	5.64	5.67	5.33	5.44	5.54	4.93	4.70	4.95	5.56	5.84	6.66	6.02	5.52
2005	6.07	5.49	5.30	5.41	5.77	5.45	5.43	5.94	5.75	5.97	6.39	5.69	5.72
1985 - 2005	5.51	5.53	5.36	5.21	5.30	5.10	5.19	5.41	5.72	6.03	6.38	5.93	5.56
Min % Dif	-8	-18	-10	-9	-10	-13	-22	-11	-9	-17	-14	-12	-13
Max % Dif	10	19	12	11	9	8	8	12	7	11	11	15	11

Comportamiento de la temperatura del mes de mayo del 2015 durante las 24 horas promedio



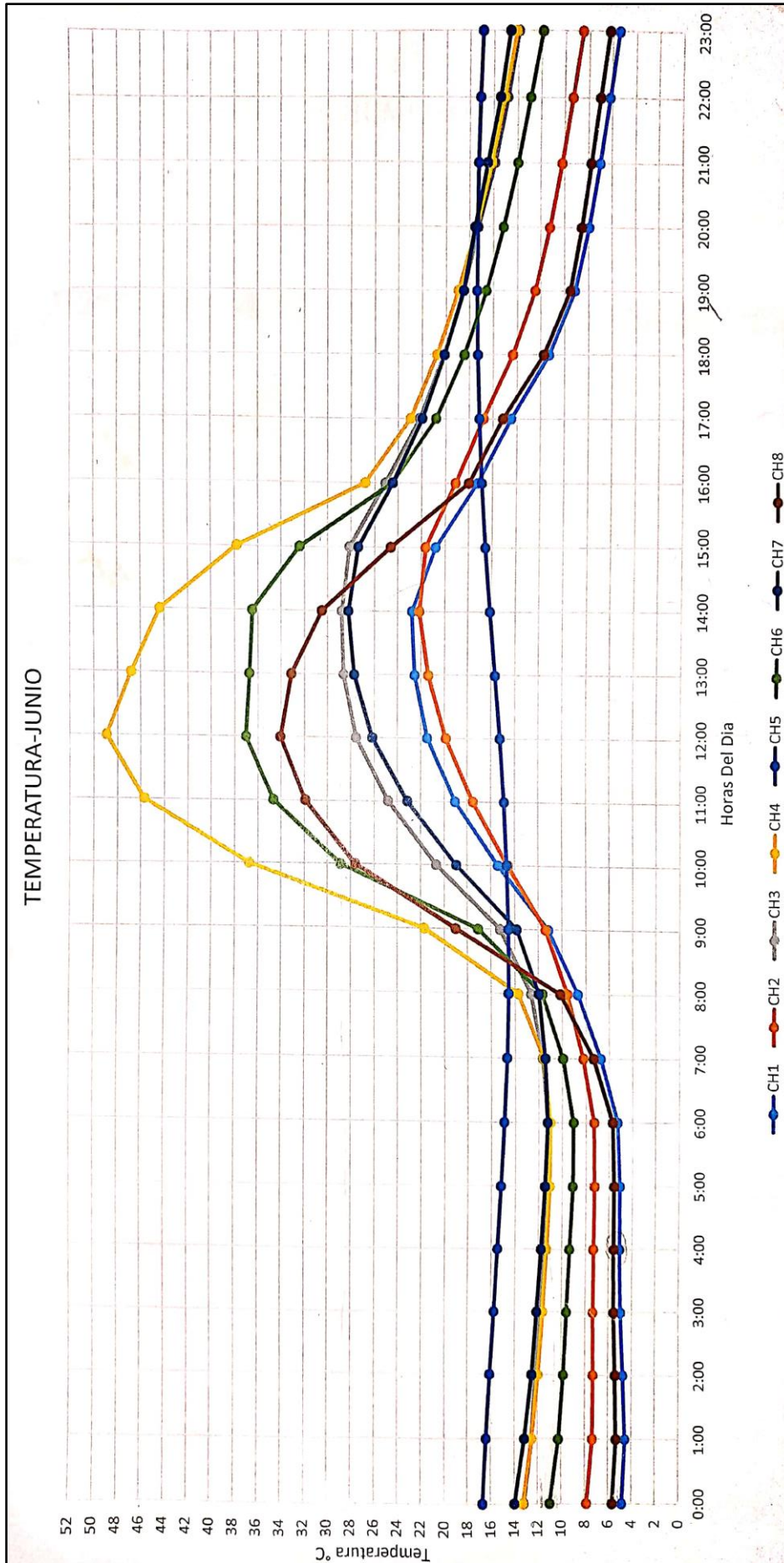
Elaboración propia

Comportamiento de la humedad relativa del mes de mayo del 2015 durante las 24 horas promedio

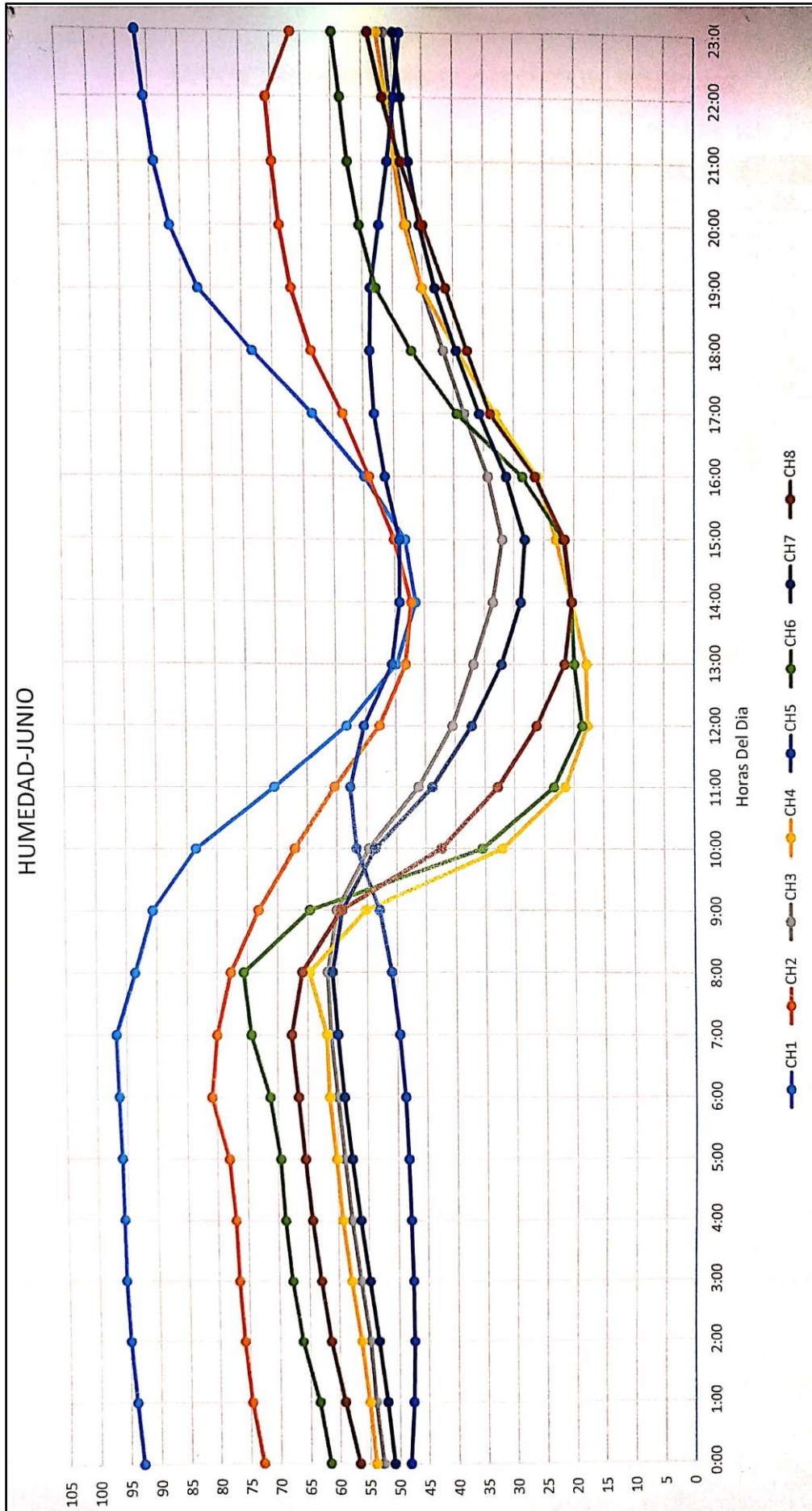


Elaboración propia

Comportamiento de la temperatura del mes de junio del 2015 durante las 24 horas promedio

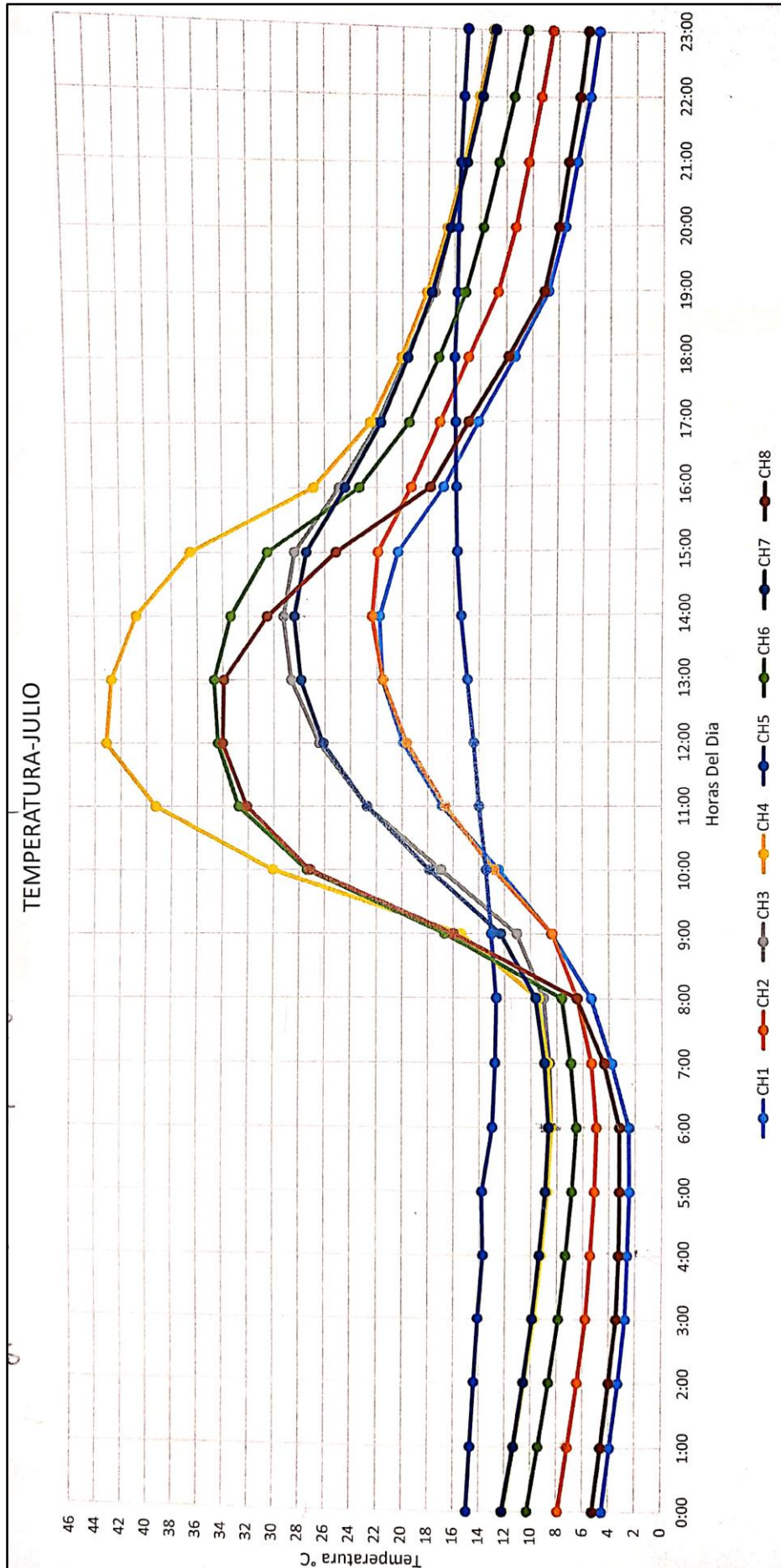


Comportamiento de la humedad relativa del mes de junio del 2015 durante las 24 horas promedio



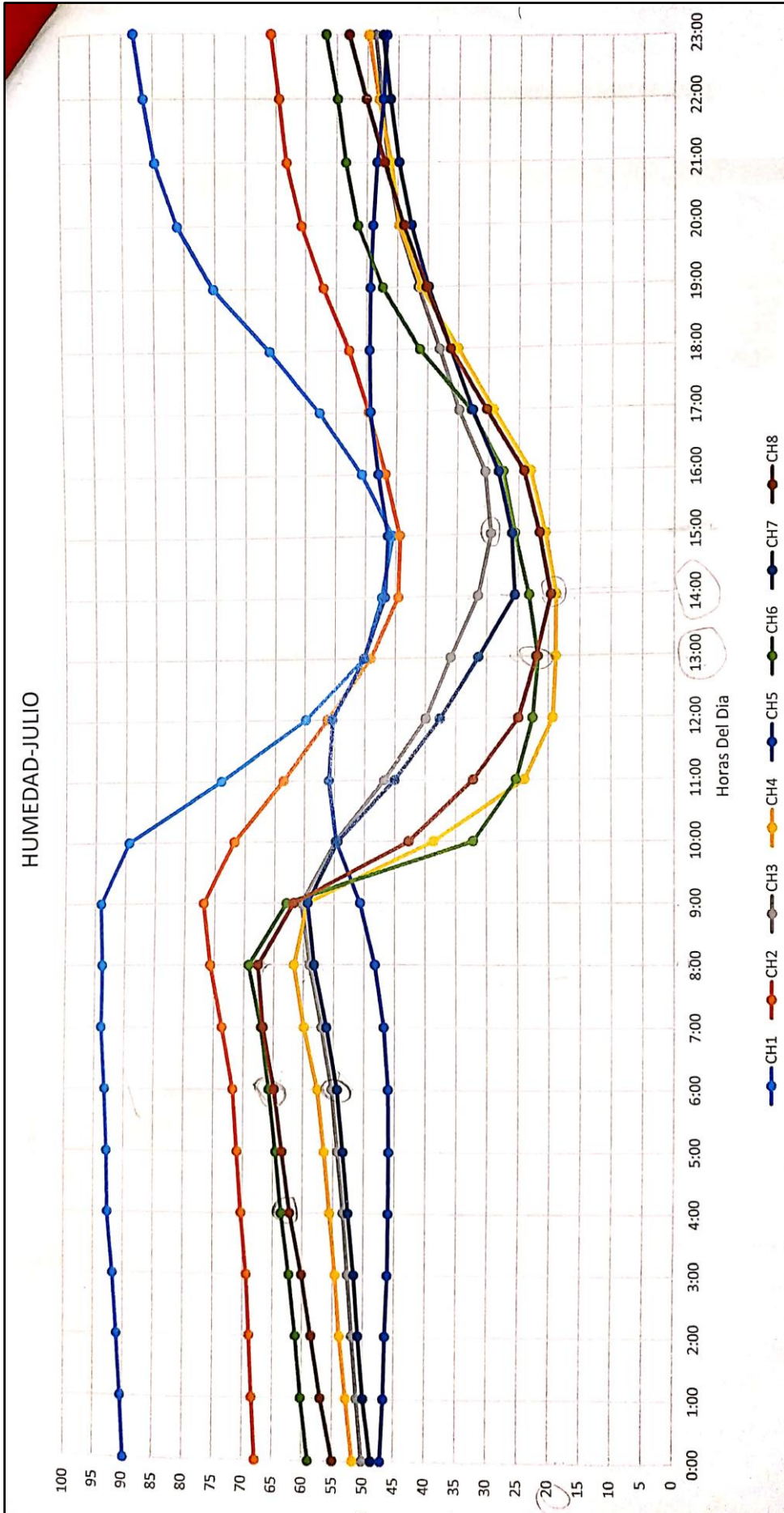
Fuente: Elaboración propia

Comportamiento de la temperatura del mes de julio del 2015 durante las 24 horas promedio



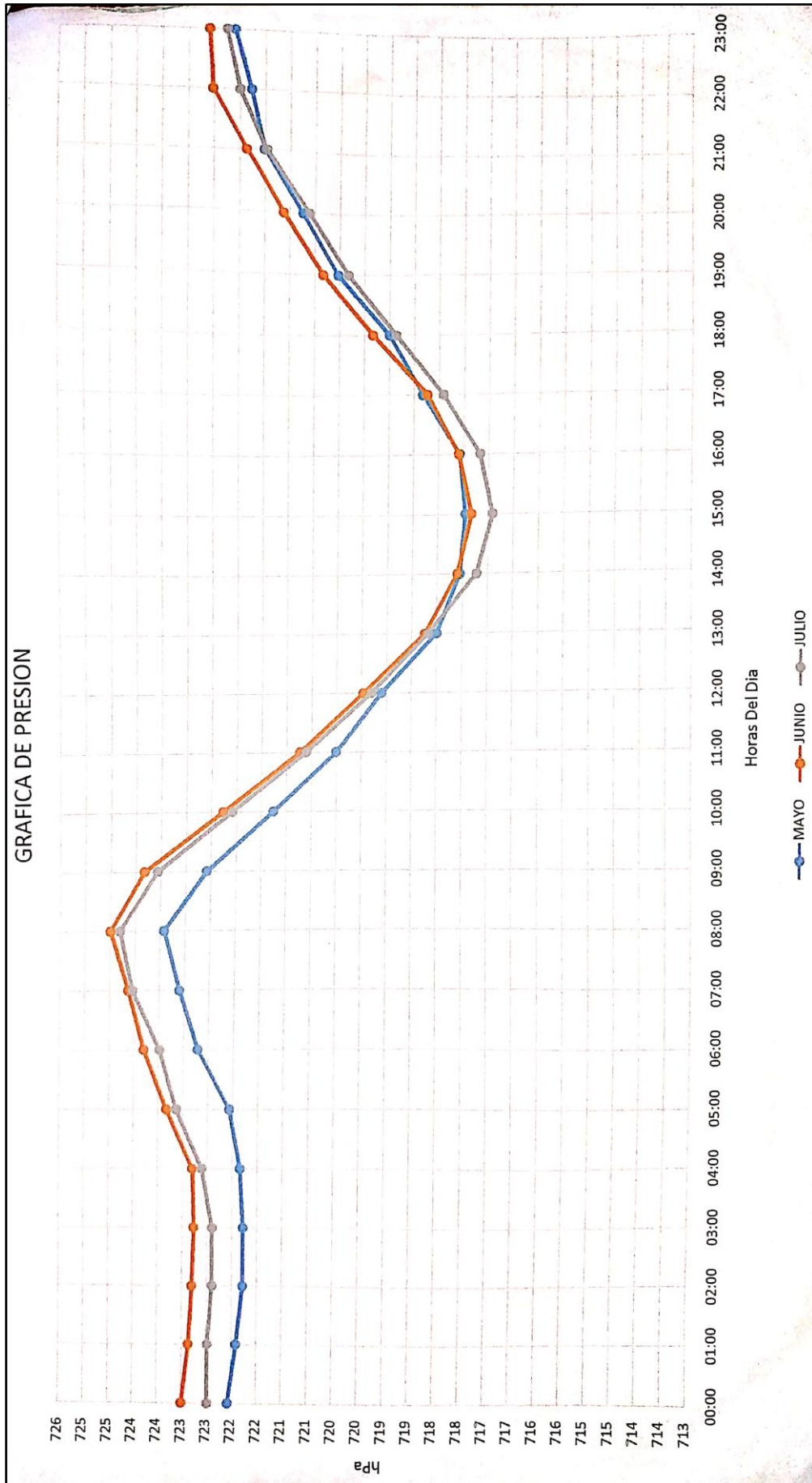
Elaboración propia

Comportamiento de la humedad relativa del mes de julio del 2015 durante las 24 horas promedio



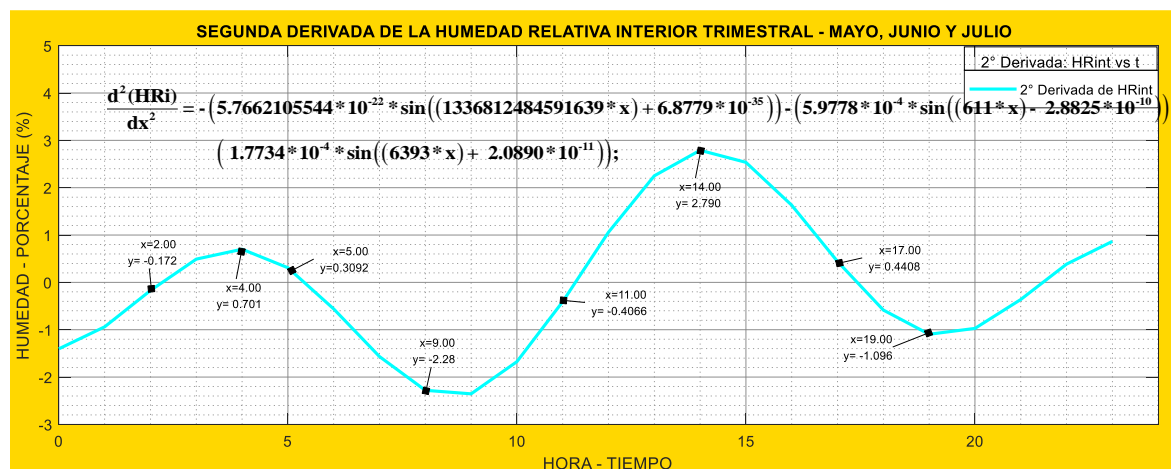
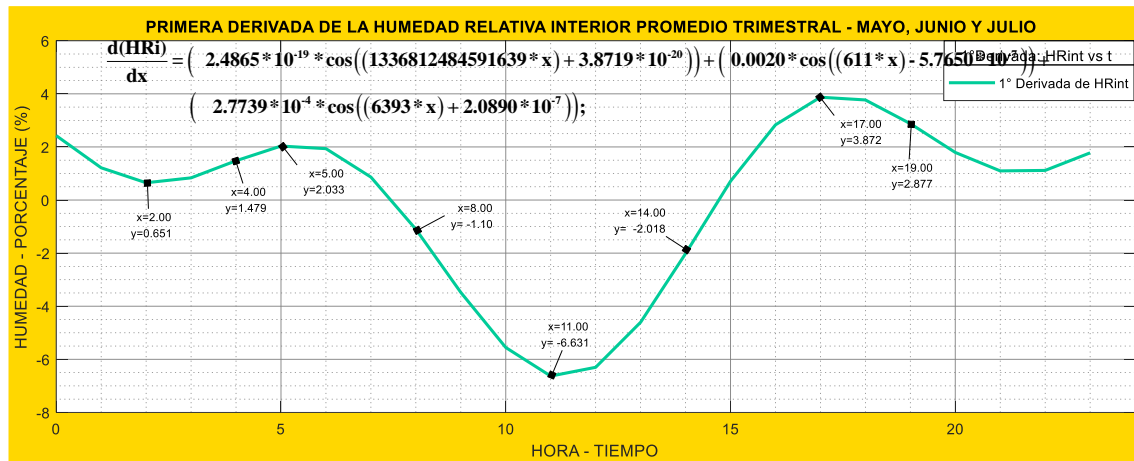
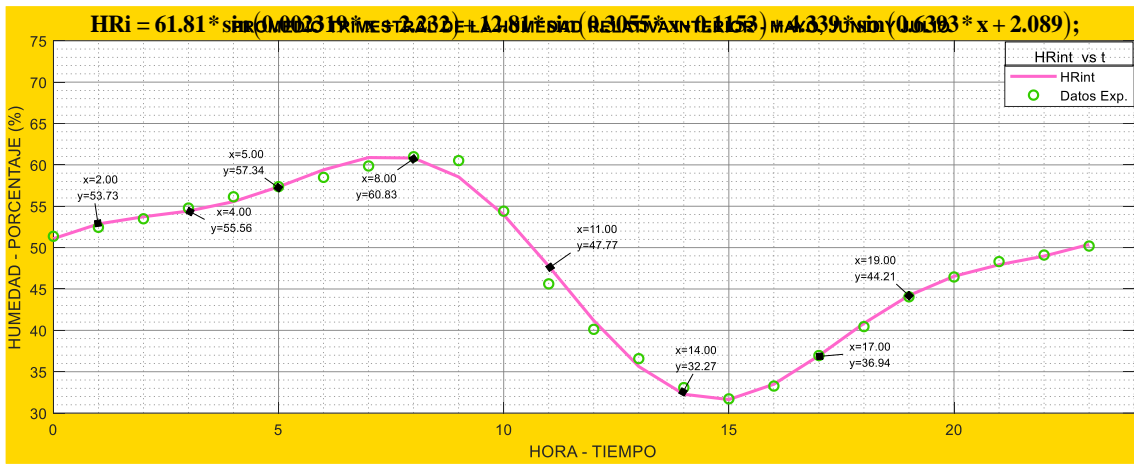
Elaboración propia

Comportamiento de la presión atmosférica de los meses mayo, junio y julio del 2015



Elaboración propia

GRÁFICAS PROMEDIO DIARIAS TRIMESTRAL DE TEMPERATURA INTERIOR DEL DOMO DEL AÑO 2015 SEGÚN MODELO DE FOURIER



PROMEDIO TRIMESTRAL DE HUMEDAD RELATIVA INTERIOR – MAYO, JUNIO Y JULIO

$$x = 0:1:23;$$

Y=[51.371 52.453 53.486 54.779 56.142 57.372 58.488 59.864 60.982 61.026 54.403 45.618 40.124 36.582 33.084 31.723 33.205 36.961 40.451 44.053 46.453 48.307 49.107 50.196]

AJUSTE DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR PROMEDIO TRIMESTRAL – MAYO, JUNIO Y JULIO

cftool (Matlab)

$$HRi = 61.81 * \sin(0.002319 * x + 2.232) + 12.81 * \sin(0.3055 * x - 0.1153) + 4.339 * \sin(0.6393 * x + 2.089);$$

CALCULO DE LA PRIMERA DERIVADA DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR PROMEDIO TRIMESTRAL – MAYO, JUNIO Y JULIO

$$\frac{d(HRi)}{dx} = \left(2.4865 * 10^{-19} * \cos((1336812484591639 * x) + 3.8719 * 10^{-20}) \right) + \left(0.0020 * \cos((611 * x) - 5.7650 * 10^{-7}) \right) + \left(2.7739 * 10^{-4} * \cos((6393 * x) + 2.0890 * 10^{-7}) \right);$$

CALCULO DE LA SEGUNDA DERIVADA DE LA HUMEDAD RELATIVA INTERIOR PROMEDIO TRIMESTRAL – MAYO, JUNIO Y JULIO

	a1 = 61.81	a2 = 12.81	a3 = 4.339
COEFICIENTES	b1 = 0.002319	b2 = 0.3055	b3 = 0.6393
	c1 = 2.232	c2 = -0.1153	c3 = 2.089
MODELO	hint= a1*sin(b1*x+c1) + a2*sin(b2*x+c2) + a3*sin(b3*x+c3)		

$$\frac{\partial^2(HRi)}{\partial x^2} = - \left(5.7662105544 * 10^{-22} * \sin((1336812484591639 * x) + 6.8779 * 10^{-35}) \right) - \left(5.9778 * 10^{-4} * \sin((611 * x) - 2.8825 * 10^{-10}) \right) - \left(1.7734 * 10^{-4} * \sin((6393 * x) + 2.0890 * 10^{-11}) \right);$$

Estadística de regresión

- *coeficiente de determinación*: $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 0.9916$

- R^2 Ajustado = $1 - \frac{MCE}{MCT} = 0.9871$

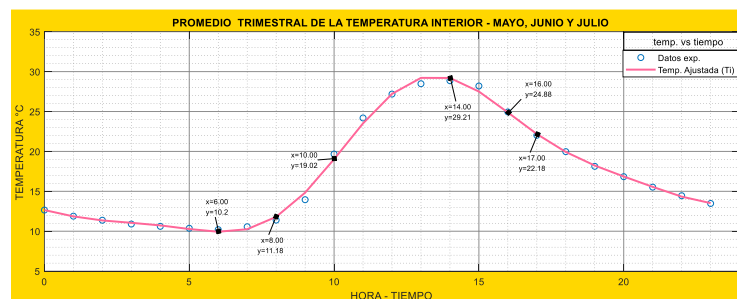
• *Coefficiente de cancelación múltiple* : $r = \sqrt{R^2} = 0.99579$

• *Error típico o desviación estándar* : $\sigma = \sqrt{MCE} = 1.0589$

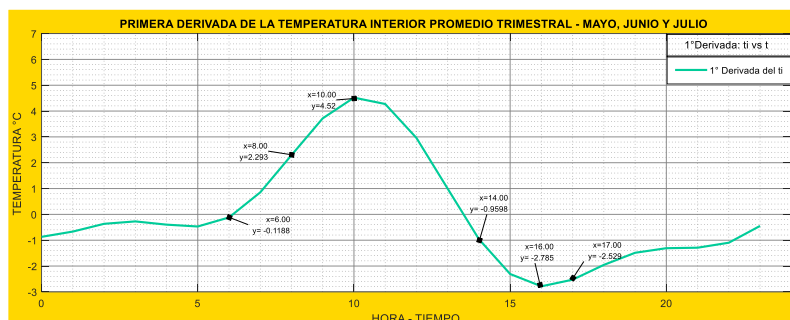
ANOVA				
FV	DF	SS	MC	F
REGRESIÓN	8	1985.5964	248.2	221.34
ERROR	15	16.8203	1.121353	
TOTAL	23	2002.42		

$$ti = 21.73 * \sin(0.06937 * x + 0.4266) + 6.949 * \sin(0.4015 * x + 2.301) + 1.597 * \sin(0.767 * x - 1.887);$$

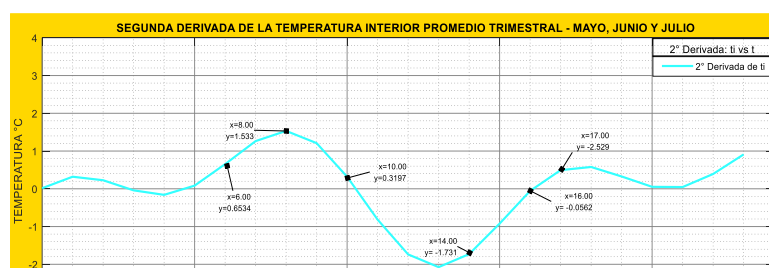
GRÁFICA DE LA HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO DIARIA TRIMESTRAL DEL DOMO DEL AÑO 2015 SEGÚN MODELO DE FOURIER



$$\frac{d(ti)}{dx} = (0.0012 * \cos((767 * x) - 1.8870 * 10^{-6})) + (0.0014 * \cos((803 * x) + 1.1505 * 10^{-6})) + (1.5074 * 10^{-5} * \cos((6937 * x) + 4.2660 * 10^{-8}));$$



$$\frac{d^2(ti)}{dx^2} = -(9.3950 * 10^{-4} * \sin((767 * x) - 1.8870 * 10^{-9})) - (5.6010 * 10^{-4} * \sin((803 * x) + 5.7525 * 10^{-10})) - (1.0457 * 10^{-6} * \sin((6937 * x) + 4.2660 * 10^{-13}));$$



PROMEDIO DE TEMPERATURAS INTERIORES MAYO JUNIO JULIO

$$X = 0:1:23;$$

tint=[12.650 11.887 11.379 10.896 10.612 10.369 10.19 10.55 11.394 13.947 19.669
24.193 27.184 28.483 28.865 28.198 24.947 22.020 19.972 18.132 16.833 15.526
14.448 13.477]'

CALCULO DEL AJUSTE DE LA TEMPERATURA INTERIOR PROMEDIO DE MAYO JUNIO JULIO

Cftool

$$ti = 21.73 * \sin(0.06937 * x + 0.4266) + 6.949 * \sin(0.4015 * x + 2.301) + 1.597 * \sin(0.767 * x - 1.887);$$

CALCULO DE LA PRIMERA DERIVADA

$$\frac{d(ti)}{dx} = (0.0012 * \cos((767 * x) - 1.8870 * 10^{-6})) + (0.0014 * \cos((803 * x) + 1.1505 * 10^{-6})) + (1.5074 * 10^{-5} * \cos((6937 * x) + 4.2660 * 10^{-8}));$$

CALCULO DE LA SEGUNDA DERIVADA

$$\frac{\partial^2(ti)}{\partial x^2} = - (9.3950 * 10^{-4} * \sin((767 * x) - 1.8870 * 10^{-9})) - (5.6010 * 10^{-4} * \sin((803 * x) + 5.7525 * 10^{-10})) - (1.0457 * 10^{-6} * \sin((6937 * x) + 4.2660 * 10^{-13}));$$

	a1 = 21.73	a2 = 6.949	a3 = 1.597
COEFICIENTES	b1 = 0.06937	b2 = 0.4015	b3 = 0.767
	c1 = 0.4266	c2 = 2.301	c3 = -1.887
MODELO	Tint= a1*sin(b1*x+c1) + a2*sin(b2*x+c2) + a3*sin(b3*x+c3)		

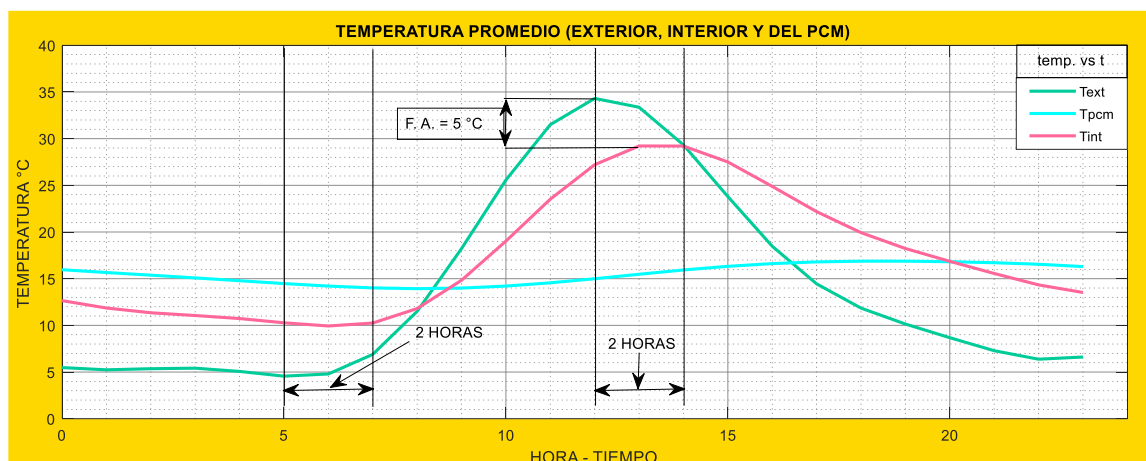
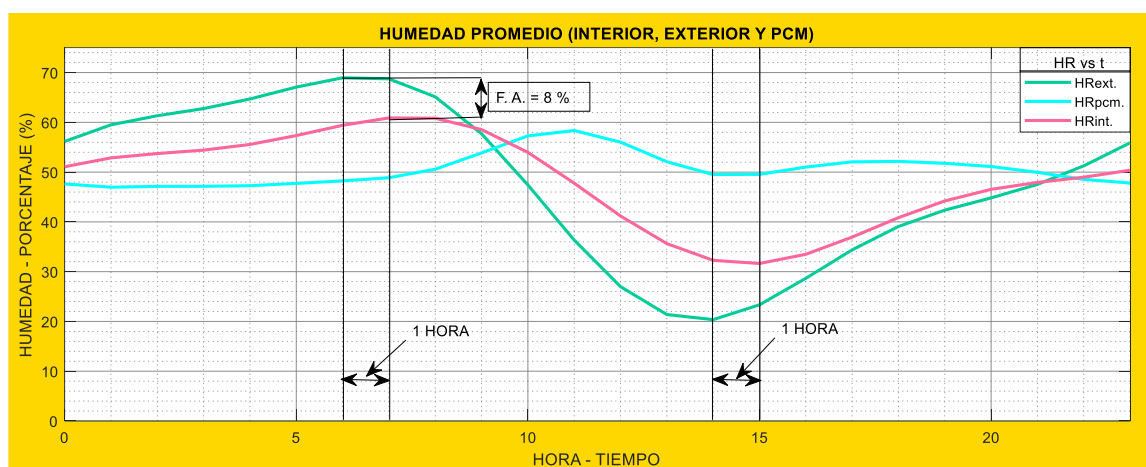
Estadística de regresión

- *coeficiente de determinación*: $R^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} = 0.9968$

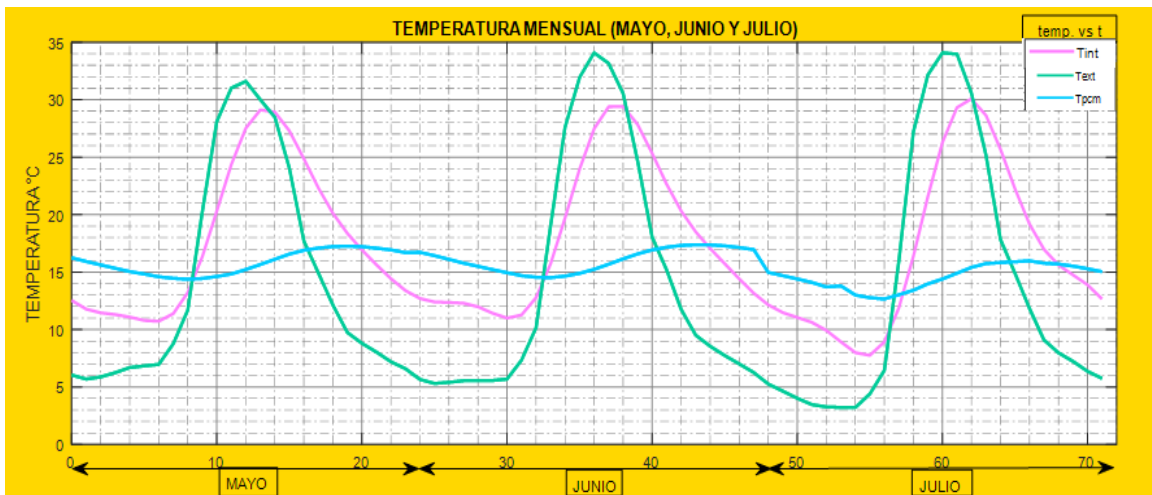
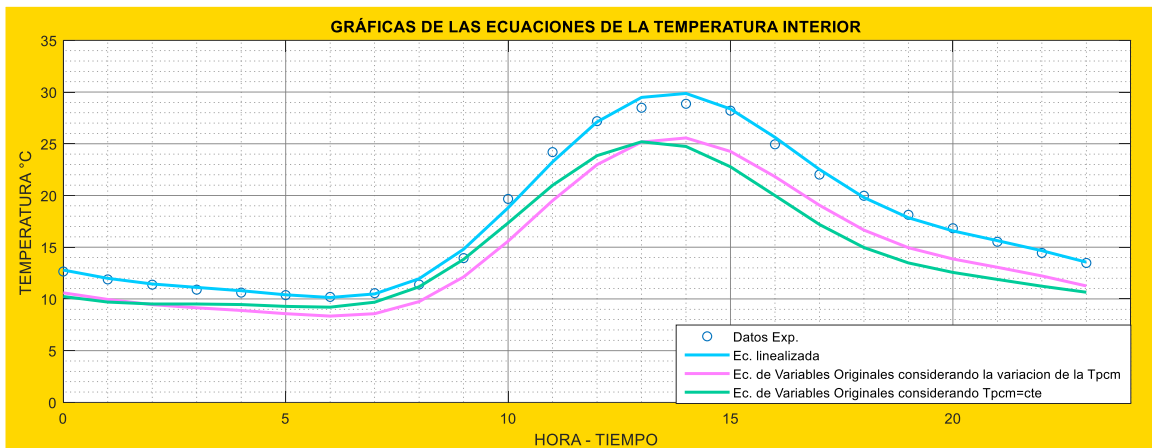
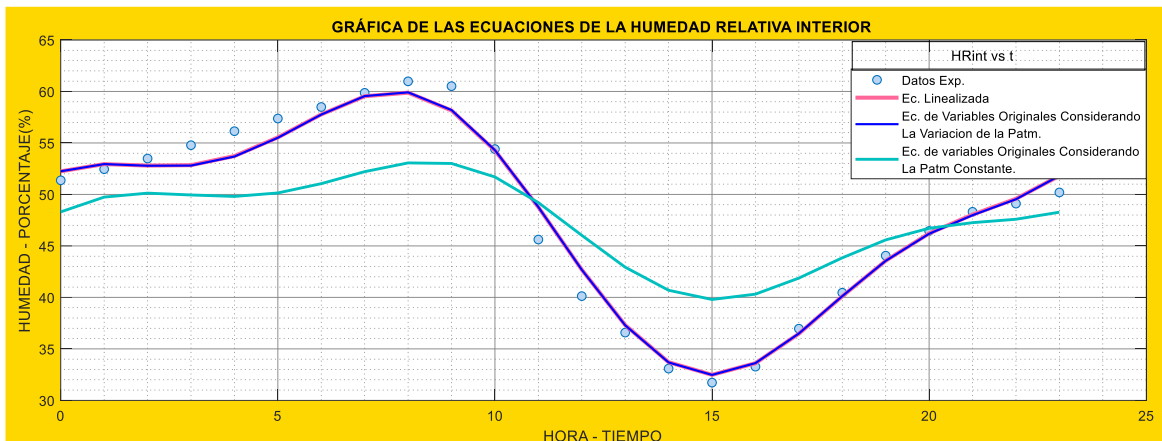
- R^2 Ajustado = $1 - \frac{MCE}{MCT} = 0.9951$

- *Coefficiente de cancelación múltiple* : $r = \sqrt{R^2} = 0.9984$
- *Error típico o desviación estándar* : $\sigma = \sqrt{MCE} = 0.4637$

ANOVA				
FV	DF	SS	MC	F
REGRESIÓN	8	1004.615	125.58	584.1
ERROR	15	3.2255	0.215	
TOTAL	23	1007.84		



GRÁFICA DE FACTOR DE AMORTIGUAMIENTO Y DESFASE TERMICO ENTRE LA HUMEDAD RELATIVA EXTERIOR E INTERIOR DEL AÑO 2015



GRÁFICA DE TEMPERATURAS INTERIOR, EXTERIOR Y DEL PCM COMO PROMEDIO TRIMESTRAL DEL AÑO 2015