

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Motivación .....	1
1.2 Antecedentes .....	1
1.3 Sistemas de Calefacción Solar Pasivos .....	2
1.3.1 Muro Trombe .....	2
1.3.2 Muro Trombe Zigzag .....	3
1.3.3 Muro Trombe Transwall .....	4
1.3.4 Muro Trombe Fluidizado .....	4
1.3.5 Muro Trombe con Paneles Fotovoltaicos.....	5
1.4 Definición del Problema.....	6
1.5 Objetivos .....	6
1.5.1 Objetivo General .....	6
1.5.2 Objetivos específicos.....	7
1.5.3 Alcances .....	7
1.6 Resultados Esperados.....	7
<b>2. Antecedentes .....</b>	<b>8</b>
2.1 Antecedentes Preliminares .....	8
2.1.1 Radiación Solar .....	9
2.1.2 Sistemas de Captación Solar Pasivos .....	10
2.1.3 Captación Solar .....	11
2.1.4 Principios de Funcionamiento de un Muro Trombe.....	12
2.2 Intercambio Energético en Viviendas .....	13
2.2.1 Ventilación o Renovación de Aire .....	13
2.2.2 Pérdidas y Ganancias de Calor .....	13
2.3 El Consumo Energético en Chile .....	14
2.3.1 Las Energías Renovables en Chile .....	15
2.3.2 La Energía Solar en el Norte de Chile.....	16
2.3.3 Región de Arica y Parinacota.....	18
2.3.4 Altiplano de la Región de Arica y Parinacota .....	18
2.4 Revisión de la Literatura .....	20

2.4.1	Muro Trombe .....	20
2.4.2	Muro Trombe Clásico .....	20
2.4.3	Análisis de Eficiencia.....	21
2.4.3.1	Efectos de Rejillas de Ventilación.....	22
2.4.3.2	Efecto de Ventiladores .....	22
2.4.3.3	Efecto del Tamaño .....	23
2.4.3.4	Efectos del Grosor y Color.....	24
2.4.3.5	Efectos de Aislamiento.....	25
2.4.3.6	Efectos de los Materiales de la Pared .....	26
2.4.3.7	Efectos del Acristalamiento.....	26
<b>3.</b>	<b>Dinámica de Fluidos Computacional.....</b>	<b>28</b>
3.1	Transferencia de Calor por Convección.....	28
3.2	Flotabilidad .....	29
3.3	Método de Volúmenes Finitos .....	30
3.3.1	Ecuaciones Gobernantes .....	31
3.4	Turbulencia .....	32
3.5	Modelos de Turbulencia.....	33
3.5.1	Modelo Estándar $k - \epsilon$ .....	33
3.5.2	Modelo RNG $k - \epsilon$ .....	35
3.5.3	Modelo $k - \omega$ Estándar .....	35
3.5.4	Efectos de la Flotabilidad en los Modelos de Turbulencia.....	35
3.6	Modelos de Radiación.....	36
3.6.1	Modelo P1 .....	37
3.6.2	Modelo DO.....	37
3.7	Solar Load Model.....	38
3.8	Tratamiento Cerca de las Paredes .....	38
3.9	Condiciones de Borde .....	39
3.10	Métodos de Resolución .....	41
3.10.1	Acoplamiento de Presión Velocidad .....	41
3.10.2	Algoritmo SIMPLE.....	42
3.10.3	Algoritmo SIMPLEC .....	42
3.10.4	Algoritmo PISO.....	42
3.10.5	Algoritmo COUPLED.....	43

3.11	Discretización Espacial .....	43
3.12	Simulaciones Transientes .....	44
3.13	Aproximación de Boussinesq.....	45
3.14	Análisis Matemático.....	46
<b>4.</b>	<b>Metodología.....</b>	<b>48</b>
4.1	Planteamiento del Problema.....	48
4.2	Ubicación Geográfica de la Vivienda .....	48
4.3	Geometría.....	50
4.4	Condiciones de Borde .....	51
4.5	Mallado .....	52
4.6	Configuración en ANSYS Fluent.....	53
4.6.1	Convección Natural.....	53
4.6.2	Modelo Turbulencia y Tratamiento en paredes.....	54
4.6.3	Modelo de Radiación .....	54
4.6.4	Discretizaciones .....	54
4.7	Validación .....	55
<b>5.</b>	<b>Resultados .....</b>	<b>56</b>
5.1	Mallado y Análisis de Sensibilidad .....	56
5.2	Validación de resultados .....	59
5.3	Resultados invierno; Comportamiento de las temperaturas, velocidades y masa térmica .....	61
5.3.1	Casos N° 1, 2, 3: Muros 25-10; 25-15; 25-20 .....	61
5.3.2	Casos N° 4, 5, 6: Muros 30-10; 30-15; 30-20 .....	63
5.3.3	Casos N° 7, 8, 9: Muros 35-10; 35-15; 35-20 .....	67
5.3.4	Contornos de Velocidades.....	70
5.3.5	Temperaturas promedio al interior de la habitación y confort térmico .....	71
5.4.6	Masa Térmica.....	77
5.4	Resultados verano; Comportamiento de las temperaturas, velocidades y masa térmica.....	78
5.4.1	Caso N° 1, 2, 3: Muros 25-10; 25-15; 25-20.....	78
5.4.2	Caso N° 4, 5, 6: Muros 30-10; 30-15; 30-20.....	81
5.4.3	Caso N° 7, 8, 9: Muros 35-10; 35-15; 35-20.....	84
5.4.4	Contornos de velocidades.....	87
5.4.5	Temperaturas promedio al interior de la habitación y confort térmico .....	89
5.4.6	Masa Térmica.....	94

<b>6. Rendimiento del Sistema.....</b>	<b>96</b>
6.1 Temperatura promedio vs Temperatura exterior.....	96
6.2 Energía Almacenada por el muro Trombe Escalonado.....	97
6.3 Balance de energía y Eficiencia del sistema .....	98
<b>Conclusiones.....</b>	<b>101</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>103</b>
<b>Anexo.....</b>	<b>106</b>

# Índice de Figuras

1.1. Esquema de un muro Trombe ventilado .....	<a href="#">3</a>
1.2. Muro Trombe Zigzag .....	<a href="#">3</a>
1.3. Muro Trombe Transwall .....	<a href="#">4</a>
1.4. Muro Trombe Fluidizado .....	<a href="#">5</a>
1.5. Muro Trombe con panel fotovoltaico .....	<a href="#">6</a>
2.1. Magnitud y composición electromagnética de la radiación solar .....	<a href="#">9</a>
2.2. Trayectoria del sol respecto de la superficie horizontal terrestre.....	<a href="#">10</a>
2.3. Absorción, reflexión y transmisión de la radiación incidente por un material semitransparente.....	<a href="#">11</a>
2.4. Efecto invernadero .....	<a href="#">12</a>
2.5. Mecanismos de transferencia de calor en una vivienda .....	<a href="#">14</a>
2.6. Consumo de electricidad a nivel nacional.....	<a href="#">15</a>
2.7. Distintos tipos de mesetas en Chile.....	<a href="#">17</a>
2.8. Radiación solar global en Chile .....	<a href="#">17</a>
2.9. Región de Arica y Parinacota.....	<a href="#">19</a>
2.10. Tipos de muro Trombe clásicos. a) Sin ventilación; b) modo invierno con termo- circulación de aire; c) modo verano con ventilación cruzada .....	<a href="#">20</a>
2.11. Muro Trombe clásico .....	<a href="#">21</a>
2.12. Muro Trombe con paneles fotovoltaicos y ventiladores .....	<a href="#">23</a>
2.13. Ahorro de energía basado en el tamaño de la pared solar.....	<a href="#">24</a>
3.1. Esquema de pared delgada .....	<a href="#">40</a>
4.1. Posición del sol en el solsticio de invierno para una latitud de 20° .....	<a href="#">49</a>

4.2. Posición del sol en el solsticio de verano para una latitud de 20° .....	<a href="#">49</a>
4.3. Geometría de un muro Trombe Escalonado.....	<a href="#">50</a>
4.4. Variación de parámetros a considerar .....	<a href="#">51</a>
4.5. Geometría del caso N° 9 en el punto $x = 5.1$ , $y = 2.4$ , $z = 0.1$ .....	<a href="#">53</a>
5.1. Mallado del dominio .....	<a href="#">56</a>
5.2. Mallado del dominio en 3 dimensiones .....	<a href="#">57</a>
5.3. Corte transversal.....	<a href="#">57</a>
5.4. Vista isométrica.....	<a href="#">57</a>
5.5. Gráfico de temperatura medida en un punto fijo versus el número de elementos en los diferentes mallados.....	<a href="#">58</a>
5.6. Curva obtenida por el modelo CFD, junto con la T.Bajc <i>et al.</i> .....	<a href="#">60</a>
5.7. Distribución de los vectores de velocidad.....	<a href="#">60</a>
5.8. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°1 .....	<a href="#">61</a>
5.9. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°2 .....	<a href="#">62</a>
5.10. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°3 .....	<a href="#">62</a>
5.11. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°3 .....	<a href="#">63</a>
5.12. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°3 .....	<a href="#">63</a>
5.13. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°4 .....	<a href="#">64</a>
5.14. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°5 .....	<a href="#">65</a>
5.15. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°5 .....	<a href="#">65</a>
5.16. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°5 .....	<a href="#">66</a>
5.17. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°6 .....	<a href="#">66</a>
5.18. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°7 .....	<a href="#">67</a>
5.19. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°8 .....	<a href="#">68</a>
5.20. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°9 .....	<a href="#">68</a>
5.21. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°9 .....	<a href="#">69</a>

5.22. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°9 .....	<a href="#">69</a>
5.23. Contorno de velocidad a las 10 [hr]. Caso N°2.....	<a href="#">70</a>
5.24. Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N°8.....	<a href="#">71</a>
5.25. Líneas de corriente en la habitación a las 13 [hr]. Caso N°2 .....	<a href="#">71</a>
5.26. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 25 [cm] .....	<a href="#">72</a>
5.27. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 30 [cm] .....	<a href="#">73</a>
5.28. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 35 [cm] .....	<a href="#">73</a>
5.29. Líneas paralelas utilizadas.....	<a href="#">74</a>
5.30. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm] .....	<a href="#">74</a>
5.31. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm] .....	<a href="#">75</a>
5.32. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm] .....	<a href="#">75</a>
5.33. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm] .....	<a href="#">76</a>
5.34. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm] .....	<a href="#">76</a>
5.35. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm] .....	<a href="#">77</a>
5.36. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°1 .....	<a href="#">79</a>
5.37. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°2.....	<a href="#">79</a>
5.38. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°3 .....	<a href="#">80</a>
5.39. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°3.....	<a href="#">80</a>
5.40. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°3 .....	<a href="#">81</a>
5.41. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°4 .....	<a href="#">82</a>
5.42. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°5 .....	<a href="#">82</a>
5.43. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°5 .....	<a href="#">83</a>
5.44. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°5 .....	<a href="#">83</a>
5.45. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°6.....	<a href="#">84</a>
5.46. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°7 .....	<a href="#">85</a>
5.47. Contorno de temperatura a las 10 [hr]. Caso N°8.....	<a href="#">85</a>

5.48. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°8.....	<a href="#">86</a>
5.49. Contorno de temperatura a las 17 [hr]. Caso N°8.....	<a href="#">86</a>
5.50. Contorno de temperatura a las 14 [hr]. Caso N°9.....	<a href="#">87</a>
5.51. Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N°5.....	<a href="#">88</a>
5.52. Contorno de velocidad a las 13 [hr]. Caso N°3.....	<a href="#">88</a>
5.53. Líneas de corriente en la habitación a las 13 [hr]. Caso N° 3.....	<a href="#">89</a>
5.54. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 25 [cm].....	<a href="#">90</a>
5.55. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 30 [cm].....	<a href="#">90</a>
5.56. Temperatura promedio en la habitación para un muro de 35 [cm].....	<a href="#">91</a>
5.57. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].....	<a href="#">92</a>
5.58. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].....	<a href="#">92</a>
5.59. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].....	<a href="#">93</a>
5.60. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 25 [cm].....	<a href="#">93</a>
5.61. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 30 [cm].....	<a href="#">94</a>
5.62. Mapa térmico de la temperatura interior para un muro de 35 [cm].....	<a href="#">94</a>
6.1. Distribución de temperatura en la habitación v/s temperatura exterior.....	<a href="#">96</a>
6.2. Energía almacenada por el Muro Trombe Escalonado.....	<a href="#">97</a>
6.3. Diferencia de temperatura entre sistemas.....	<a href="#">99</a>

# Índice de Tablas

2.1. Efectos de colores en el rendimiento de un muro Trombe.....	<a href="#">25</a>
4.1. Casos a analizar para distintas geometrías .....	<a href="#">51</a>
4.2. Condiciones de contorno usadas en el modelo .....	<a href="#">52</a>
4.3. Valores promedio de las temperaturas exteriores .....	<a href="#">52</a>
4.4. Propiedades de los materiales .....	<a href="#">52</a>
4.5. Métodos de solución .....	<a href="#">55</a>
4.6. Factores de relajación.....	<a href="#">55</a>
5.1. Estadísticas de la malla .....	<a href="#">58</a>
5.2. Porcentaje de volumen de concreto donde la temperatura es mayor a 5 [°C].....	<a href="#">77</a>
5.3. Porcentaje de volumen de concreto donde la temperatura es mayor a 10 [°C].....	<a href="#">95</a>
6.1. Flujos de calor sobre las superficies.....	<a href="#">98</a>
6.2. Resumen del sistema implementado .....	<a href="#">99</a>