



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE  
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

---

*Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche  
Corso di Laurea Triennale in Ingegneria Edile*

**“TEST SPERIMENTALI SU FORNI SOLARI E SU MATERIALI A  
CAMBIAMENTO DI FASE”**

**“EXPERIMENTAL TESTS ON SOLAR COOKERS AND PHASE  
CHANGE MATERIALS”**

***Relatore:***

Prof. Giovanni Di Nicola

***Tesi di Laurea di:***

Serena Petrachi

Anno Accademico 2018/2019

---

# Indice

---

|   |    |
|---|----|
| <b>Presentazione</b> .....  | 1  |
| <b>1. Stato dell'arte</b> .....   | 3  |
| 1.1 Il sole e l'energia solare. ....  | 3  |
| 1.2 Storia tecnologica dei forni solari. ....   | 6  |
| 1.3 Classificazione dei forni solari. ....  | 10 |
| 1.3.1 Forni solari a pannelli. ....   | 11 |
| 1.3.2 Forni solari parabolici. ....   | 12 |
| 1.3.3 Forni solari a scatola. ....  | 13 |
| 1.3.4 Forni solari a concentrazione. ....   | 16 |
| 1.4 Analisi di mercato. ....  | 18 |
| 1.5 Utilizzo dei forni solari nei campi profughi. ....                                      | 41 |
| 1.5.1 Modelli di forni solari più utilizzati nei campi profughi. ....                       | 42 |
| 1.5.2 Principali progetti d'implementazione della cucina solare nei<br>campi profughi. .... | 44 |
| 1.5.3 Organizzazioni non governative per la promozione della<br>cucina solare. ....         | 46 |
| <b>2. Principi fisici di funzionamento</b> .....  | 52 |
| 2.1 Funzionamento di un forno solare. ....  | 52 |
| 2.2 Orientamento. ....  | 52 |
| 2.3 Ottica del forno e calcolo del rendimento. ....   | 53 |
| 2.4 Sfruttamento di forni solari in assenza di radiazione solare. ....                      | 56 |
| 2.4.1 Miglioramento delle prestazioni. ....   | 56 |
| 2.4.2 Materiali a cambiamento di fase (PCM). ....   | 56 |
| 2.4.3 Classificazione dei PCM. ....   | 57 |
| 2.4.4 Metodi per incrementare le prestazioni dei PCM. ....                                  | 59 |
| 2.4.5 Applicazione dei PCM ai forni solari. ....  | 60 |
| 2.4.6 PCM scelti. ....  | 60 |
| 2.4.7 Calcolo della massa dei PCM. ....   | 63 |
| 2.4.8 Realizzazione pentola a doppio fondo. ....  | 64 |
| 2.4.9 Descrizione del fluido di prova (olio di silicone). ....                              | 68 |
| <b>3. Realizzazione di un forno ad elevata efficienza</b> .....                             | 70 |
| 3.1 Premessa. ....  | 70 |
| 3.2 Caratteristiche geometriche del forno. ....   | 71 |
| 3.3 Materiali utilizzati. ....  | 74 |
| 3.3.1 Vernice. ....   | 74 |
| 3.3.2 Specchi in alluminio. ....  | 75 |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.3.3     | Vetro. ....   | 76         |
| 3.3.4     | Isolamento e modifiche apportate. ....                    | 78         |
| <b>4.</b> | <b>Realizzazione di un forno a concentrazione. ....</b>   | <b>84</b>  |
| 4.1       | Premessa. ....  | 84         |
| 4.2       | Tipologia di forno realizzato. ....                       | 84         |
| 4.3       | Caratteristiche geometriche del forno. ....               | 85         |
| 4.4       | Materiali utilizzati. ....                                | 88         |
| 4.5       | Principio di funzionamento. ....                          | 92         |
| <b>5.</b> | <b>Realizzazione di un forno a media efficienza. ....</b> | <b>93</b>  |
| 5.1       | Premessa. ....  | 93         |
| 5.2       | Fasi di lavorazione. ....                                 | 94         |
| 5.2.1     | Realizzazione della camera di cottura. ....               | 94         |
| 5.2.2     | Realizzazione della scatola esterna. ....                 | 97         |
| 5.2.3     | Isolamento con lana di vetro. ....                        | 100        |
| 5.2.4     | Sistema di concentrazione dei raggi solari. ....          | 103        |
| 5.3       | Principali modifiche. ....                                | 106        |
| 5.3.1     | Vernice. ....   | 106        |
| 5.3.2     | Vetro e ISO 9050:2003. ....                               | 106        |
| 5.3.3     | Alluminio. ....   | 109        |
| 5.4       | Analisi funzionale. ....                                  | 111        |
| <b>6.</b> | <b>Risultati. ....</b>                                    | <b>112</b> |
| 6.1       | Prove a vuoto. ....                                       | 112        |
| 6.1.1     | Test del 23/05/2017. ....                                 | 112        |
| 6.1.2     | Test del 09/06/2017. ....                                 | 114        |
| 6.1.3     | Test del 13/06/2017. ....                                 | 117        |
| 6.1.4     | Riepilogo delle prove a vuoto. ....                       | 119        |
| 6.2       | Prove a carico con acqua. ....                            | 119        |
| 6.2.1     | Test del 02/08/2017. ....                                 | 120        |
| 6.2.2     | Test del 14/09/2017. ....                                 | 122        |
| 6.2.3     | Test del 01/06/2018. ....                                 | 125        |
| 6.2.4     | Test del 20/06/2018. ....                                 | 128        |
| 6.2.5     | Test del 04/07/2018. ....                                 | 131        |
| 6.2.6     | Riepilogo delle prove a carico con acqua. ....            | 134        |
| 6.3       | Prove a carico con olio di silicone. ....                 | 135        |
| 6.3.1     | Test dell'11/06/2018. ....                                | 135        |
| 6.3.2     | Test del 27/09/2018. ....                                 | 138        |
| 6.3.3     | Test dell'11/06/2019. ....                                | 141        |
| 6.3.4     | Test del 12/06/2019. ....                                 | 144        |
| 6.3.5     | Test del 17/06/2019. ....                                 | 147        |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.3.6 | Riepilogo delle prove a carico con olio di silicone. . . . .                                       | 150 |
| 6.4   | Prove a carico con eritritolo come accumulo di energia termica. . . . .                            | 151 |
| 6.4.1 | Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo del 24/07/2018. . . . .                           | 151 |
| 6.4.2 | Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo del 11/09/2018. . . . .                           | 154 |
| 6.4.3 | Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo del 12/09/2018. . . . .                           | 157 |
| 6.4.4 | Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo del 25/09/2018. . . . .                           | 160 |
| 6.4.5 | Riepilogo delle prove a carico con eritritolo come accumulo di<br>energia termica. . . . .         | 163 |
| 6.5   | Prove a carico con xilitolo come accumulo di energia termica. . . . .                              | 164 |
| 6.5.1 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 03/06/2019. . . . .                             | 165 |
| 6.5.2 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 04/06/2019. . . . .                             | 167 |
| 6.5.3 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 05/06/2019. . . . .                             | 170 |
| 6.5.4 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 06/06/2019. . . . .                             | 173 |
| 6.5.5 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 07/06/2019. . . . .                             | 176 |
| 6.5.6 | Riepilogo delle prove a carico con xilitolo come accumulo di<br>energia termica. . . . .           | 179 |
| 6.6   | Prove a carico con xilitolo-mannitolo come accumulo di energia<br>termica. . . . .                 | 180 |
| 6.6.1 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del<br>18/06/2019. . . . .                | 181 |
| 6.6.2 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del<br>19/06/2019. . . . .                | 183 |
| 6.6.3 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del<br>20/06/2019. . . . .                | 186 |
| 6.6.4 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del<br>02/07/2019. . . . .                | 189 |
| 6.6.5 | Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del<br>03/07/2019. . . . .                | 192 |
| 6.6.6 | Riepilogo delle prove a carico con xilitolo-mannitolo come<br>accumulo di energia termica. . . . . | 195 |
| 6.7   | Confronto dei risultati. . . . .   | 196 |
| 6.7.1 | Confronto solo olio / Olio ed eritritolo. . . . .  | 197 |
| 6.7.2 | Confronto solo olio / Olio e xilitolo. . . . .   | 199 |
| 6.7.3 | Confronto solo olio / Olio e xilitolo-mannitolo. . . . .   | 201 |
| 6.7.4 | Confronto tra olio e xilitolo / Olio e xilitolo-mannitolo. . . . .                                 | 203 |
| 6.8   | Riepilogo dei risultati. . . . .   | 205 |

**7. Conclusioni. . . . . 206**

**Bibliografia . . . . . 207**

**Ringraziamenti . . . . . 209**

# Lista delle figure

---

|  |    |
|--|----|
| <b>Fig. 1</b> - Il sole . . . . .  | 4  |
| <b>Fig. 2</b> - Grafico radiazione solare. . . . .   | 5  |
| <b>Fig. 3</b> - Tipi di forni solari: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico;<br>(c) forno solare a scatola. . . . .   | 11 |
| <b>Fig. 4</b> - Forno solare a pannelli. . . . .   | 11 |
| <b>Fig. 5</b> - Forno solare parabolico. . . . .   | 12 |
| <b>Fig. 6</b> - Componenti del forno solare a scatola. . . . .   | 13 |
| <b>Fig. 7</b> - Viste del prototipo del forno solare a scatola. . . . .  | 14 |
| <b>Fig. 8</b> - Sezioni del prototipo del forno solare a scatola. . . . .  | 14 |
| <b>Fig. 9</b> - Dimensioni del forno portatile a scatola solare. . . . .   | 16 |
| <b>Fig. 10</b> - Forno solare a concentrazione (Heliac ApS) [6]. . . . .   | 17 |
| <b>Fig. 11</b> - Differenza tra le direzioni di orientamento. . . . .  | 53 |
| <b>Fig. 12</b> - Studio dell'ottica. . . . .   | 54 |
| <b>Fig. 13</b> - Confezione di eritritolo. . . . .   | 61 |
| <b>Fig. 14</b> - Confezione di xilitolo. . . . .   | 62 |
| <b>Fig. 15</b> - Confezione di mannitolo . . . . .   | 63 |
| <b>Fig. 16</b> - Posizione delle strisce di legno come distanziali. . . . .  | 65 |
| <b>Fig. 17</b> - Fissaggio delle due pentole e del tubo della termocoppia. . . . .   | 66 |
| <b>Fig. 18</b> - Tubi in acciaio inossidabile saldati ai dadi. . . . .   | 66 |
| <b>Fig. 19</b> - Pentola a doppio fondo dipinta. . . . .   | 67 |
| <b>Fig. 20</b> - Pentola a doppio fondo completata . . . . .   | 67 |
| <b>Fig. 21</b> - Schema e sezione della pentola a doppio fondo. . . . .  | 68 |
| <b>Fig. 22</b> - Variazione del calore specifico degli oli Rhodorsil® 47 in funzione<br>della temperatura [15]. . . . .  | 69 |
| <b>Fig. 23</b> - Variazione della conducibilità termica degli oli Rhodorsil® 47 V 50 a<br>V 1000 in funzione della temperatura [15] . . . . .  | 69 |
| <b>Fig. 24</b> - Forno solare realizzato presso il DIISM. . . . .  | 70 |
| <b>Fig. 25</b> - Dimensioni forno solare . . . . .   | 71 |
| <b>Fig. 26</b> - Tavola 1, schematizzazione del corpo del forno. . . . .   | 71 |
| <b>Fig. 27</b> - Tavola 2, dimensionamento ed inclinazione specchi. . . . .  | 72 |
| <b>Fig. 28</b> - Tavola 3, coperchio dodecagonale parte superiore assorbitore e vista<br>frontale forno con individuazione della fessura nella prima fila degli specchi,<br>specchio centrale e relativo indicatore. . . . . | 73 |
| <b>Fig. 29</b> - Tavola 4, sezione assorbitore e dettaglio del supporto basculante. . . . .  | 73 |
| <b>Fig. 30</b> - Emissività. . . . .   | 74 |
| <b>Fig. 31</b> - Assorbimento. . . . .   | 74 |
| <b>Fig. 32</b> - Stratigrafia della composizione dei fogli di alluminio. . . . .   | 75 |
| <b>Fig. 33</b> - Riflessione alluminio. . . . .  | 76 |
| <b>Fig. 34</b> - Lana di vetro bruciata durante un test sperimentale. . . . .  | 78 |
| <b>Fig. 35</b> - Vermiculite . . . . .   | 79 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Fig. 36</b> - Vermiculite inserita nello sportello del nostro forno solare. ....  | 81  |
| <b>Fig. 37</b> - Vista interna dello sportello del forno solare con ai lati le lastre di silicato<br>utilizzate .....        | 83  |
| <b>Fig. 38</b> - Tavola 5, sezioni esplicative isolamento. ....  | 83  |
| <b>Fig. 39</b> - Prototipo Heliac realizzato in laboratorio. ....  | 85  |
| <b>Fig. 40</b> - Foto del forno Heliac chiuso. ....  | 86  |
| <b>Fig. 41</b> - Dimensioni forno Heliac [6]. ....   | 87  |
| <b>Fig. 42</b> - Cornice della superficie riflettente [6]. ....  | 87  |
| <b>Fig. 43</b> - Piano di cottura [6]. ....  | 88  |
| <b>Fig. 44</b> - Assi di legno di diverse misure. ....   | 89  |
| <b>Fig. 45</b> - Verniciatura delle assi di legno. ....  | 89  |
| <b>Fig. 46</b> - Lastra in alluminio. ....   | 90  |
| <b>Fig. 47</b> - Lente di materiale polimerico. ....   | 91  |
| <b>Fig. 48</b> - Principio di rifrazione della lente [6]. ....   | 91  |
| <b>Fig. 49</b> - Schematizzazione del funzionamento di un forno Heliac [6]. ....   | 92  |
| <b>Fig. 50</b> - Prototipo dell'Ing. Crovatto [16]. ....   | 93  |
| <b>Fig. 51</b> - Dimensioni forno a media efficienza. ....   | 94  |
| <b>Fig. 52</b> - Pezzo "N" [16]. ....  | 95  |
| <b>Fig. 53</b> - Pezzo "M" [16]. ....  | 95  |
| <b>Fig. 54</b> - Camera di cottura. ....   | 96  |
| <b>Fig. 55</b> - Pezzo "P" piegato e zavorrato [16]. ....  | 96  |
| <b>Fig. 56</b> - Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile. ....  | 97  |
| <b>Fig. 57</b> - Pezzi che formano il corpo esterno [16]. ....   | 98  |
| <b>Fig. 58</b> - Posizione dei listelli di rinforzo [16]. ....   | 98  |
| <b>Fig. 59</b> - Involucro esterno. ....   | 99  |
| <b>Fig. 60</b> - Scatola esterna con basamento. ....   | 99  |
| <b>Fig. 61</b> - Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno. ....  | 100 |
| <b>Fig. 62</b> - Distanziatori e isolamento camera interna [16]. ....  | 101 |
| <b>Fig. 63</b> - Riempimento fessure con materiale isolante. ....  | 102 |
| <b>Fig. 64</b> - Scatola forno verniciata. ....  | 103 |
| <b>Fig. 65</b> - Disegni pannelli riflettenti (specchi) [16]. ....   | 104 |
| <b>Fig. 66</b> - Pannelli riflettenti. ....  | 104 |
| <b>Fig. 67</b> - Specchi montati. ....   | 105 |
| <b>Fig. 68</b> - Forno solare ultimato. ....   | 105 |
| <b>Fig. 69</b> - Struttura fogli di alluminio [3]. ....  | 110 |
| <b>Fig. 70</b> - Riflettanza totale dell'alluminio [3]. ....   | 110 |
| <b>Fig. 71</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 113 |
| <b>Fig. 72</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 23/05/2017). ....        | 114 |
| <b>Fig. 73</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 115 |
| <b>Fig. 74</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 09/06/2017). ....        | 116 |
| <b>Fig. 75</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 117 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Fig. 76</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,20 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 13/06/2017).                    | 118 |
| <b>Fig. 77</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 120 |
| <b>Fig. 78</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 02/08/2017).                    | 121 |
| <b>Fig. 79</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 123 |
| <b>Fig. 80</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 14/09/2017).                    | 124 |
| <b>Fig. 81</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 126 |
| <b>Fig. 82</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 01/06/2018).                    | 127 |
| <b>Fig. 83</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 129 |
| <b>Fig. 84</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 20/06/2018).                    | 130 |
| <b>Fig. 85</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 132 |
| <b>Fig. 86</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 04/07/2018).                    | 133 |
| <b>Fig. 87</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 136 |
| <b>Fig. 88</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 11/06/2018).                    | 137 |
| <b>Fig. 89</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 139 |
| <b>Fig. 90</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 27/09/2018).                    | 140 |
| <b>Fig. 91</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 142 |
| <b>Fig. 92</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 11/06/2019).                    | 143 |
| <b>Fig. 93</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 145 |
| <b>Fig. 94</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 12/06/2019).                    | 146 |
| <b>Fig. 95</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 148 |
| <b>Fig. 96</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 17/06/2019).                    | 149 |
| <b>Fig. 97</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 152 |
| <b>Fig. 98</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 24/07/2018).                    | 153 |
| <b>Fig. 99</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel.  | 155 |
| <b>Fig. 100</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 11/09/2018).                   | 156 |
| <b>Fig. 101</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel. | 158 |
| <b>Fig. 102</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 12/09/2018).                   | 159 |
| <b>Fig. 103</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel. | 161 |
| <b>Fig. 104</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 25/09/2018).                   | 162 |
| <b>Fig. 105</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e                               |     |

|   |     |
|---|-----|
| riportate in Microsoft Excel. ....  | 165 |
| <b>Fig. 106</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 03/06/2019). ....                                   | 166 |
| <b>Fig. 107</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 168 |
| <b>Fig. 108</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 04/06/2019). ....                                   | 169 |
| <b>Fig. 109</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 171 |
| <b>Fig. 110</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 05/06/2019). ....                                   | 172 |
| <b>Fig. 111</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 174 |
| <b>Fig. 112</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 06/06/2019). ....                                   | 175 |
| <b>Fig. 113</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 177 |
| <b>Fig. 114</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 07/06/2019). ....                                   | 178 |
| <b>Fig. 115</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 181 |
| <b>Fig. 116</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 18/06/2019). ....                                   | 182 |
| <b>Fig. 117</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 184 |
| <b>Fig. 118</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 19/06/2019). ....                                   | 185 |
| <b>Fig. 119</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 187 |
| <b>Fig. 120</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 20/06/2019). ....                                   | 188 |
| <b>Fig. 121</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 190 |
| <b>Fig. 122</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 02/07/2019). ....                                   | 191 |
| <b>Fig. 123</b> - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e<br>riportate in Microsoft Excel. .... | 193 |
| <b>Fig. 124</b> - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 03/07/2019). ....                                   | 194 |



# Lista delle tabelle

---

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabella 1</b> - Classifica dei Paesi con maggior potenziale vantaggio derivato dall'uso della cucina solare. . . . .   | 19  |
| <b>Tabella 2</b> - Classificazione dei PCM. . . . .   | 58  |
| <b>Tabella 3</b> - Riepilogo delle proprietà di eritritolo e xilitolo [12]. . . . .   | 62  |
| <b>Tabella 4</b> - Parametri principali delle due pentole. . . . .  | 65  |
| <b>Tabella 5</b> - Caratteristiche luminose del vetro. . . . .  | 76  |
| <b>Tabella 6</b> - Caratteristiche energetiche del vetro . . . . .  | 77  |
| <b>Tabella 7</b> - Altre caratteristiche del vetro. . . . .   | 77  |
| <b>Tabella 8</b> - Riduzione acustica del vetro. . . . .  | 77  |
| <b>Tabella 9</b> - Spessore e peso del vetro. . . . .   | 77  |
| <b>Tabella 10</b> - Caratteristiche fisiche della vermiculite utilizzata. . . . .   | 80  |
| <b>Tabella 11</b> - Dati tecnici delle lastre in silicato. . . . .  | 82  |
| <b>Tabella 12</b> - Caratteristiche energetiche del vetro . . . . .   | 107 |
| <b>Tabella 13</b> - Distribuzione spettrale della radiazione solare globale. . . . .  | 109 |
| <b>Tabella 14</b> - Analisi funzionale del forno. . . . .   | 111 |
| <b>Tabella 15</b> - Riepilogo delle prove a vuoto. . . . .  | 119 |
| <b>Tabella 16</b> - Calcolo dei parametri necessari per determinare $F_2$ . . . . .   | 122 |
| <b>Tabella 17</b> - Calcolo dei parametri necessari per determinare $F_2$ . . . . .   | 125 |
| <b>Tabella 18</b> - Calcolo dei parametri necessari per determinare $F_2$ . . . . .   | 128 |
| <b>Tabella 19</b> - Calcolo dei parametri necessari per determinare $F_2$ . . . . .   | 131 |
| <b>Tabella 20</b> - Calcolo dei parametri necessari per determinare $F_2$ . . . . .   | 134 |
| <b>Tabella 21</b> - Riepilogo delle prove a carico con acqua. . . . .   | 134 |
| <b>Tabella 22</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 138 |
| <b>Tabella 23</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 141 |
| <b>Tabella 24</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 144 |
| <b>Tabella 25</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 147 |
| <b>Tabella 26</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 150 |
| <b>Tabella 27</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio di silicone come fluido di prova . . . . .                         | 150 |
| <b>Tabella 28</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio di silicone come fluido di prova. . . . .                         | 151 |
| <b>Tabella 29</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 154 |
| <b>Tabella 30</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 157 |
| <b>Tabella 31</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 160 |
| <b>Tabella 32</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 163 |
| <b>Tabella 33</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio di silicone come fluido di prova ed eritritolo come PCM. . . . .   | 163 |
| <b>Tabella 34</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio di silicone come liquido di prova ed eritritolo come PCM. . . . . | 164 |
| <b>Tabella 35</b> - Riepilogo dei parametri. . . . .  | 167 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tabella 36</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 170 |
| <b>Tabella 37</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 173 |
| <b>Tabella 38</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 176 |
| <b>Tabella 39</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 179 |
| <b>Tabella 40</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio di silicone come liquido di prova e xilitolo come PCM. ....                      | 179 |
| <b>Tabella 41</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio di silicone come liquido di prova e xilitolo come PCM. ....                     | 180 |
| <b>Tabella 42</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 183 |
| <b>Tabella 43</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 186 |
| <b>Tabella 44</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 189 |
| <b>Tabella 45</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 192 |
| <b>Tabella 46</b> - Riepilogo dei parametri. ....   | 195 |
| <b>Tabella 47</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio siliconico come liquido di prova e miscela di xilitolo-manichino come PCM. ....  | 195 |
| <b>Tabella 48</b> - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio siliconico come liquido di prova e miscela di xilitolo-manichino come PCM. .... | 196 |
| <b>Tabella 49</b> - Riepilogo della fase di riscaldamento (solo olio e olio ed eritritolo). ....  | 198 |
| <b>Tabella 50</b> - Riepilogo della fase di raffreddamento (solo olio e olio ed eritritolo). ....   | 198 |
| <b>Tabella 51</b> - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di riscaldamento medio $\Delta t_{h,av}$ per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM). ....                            | 199 |
| <b>Tabella 52</b> - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di raffreddamento medio $\Delta t_{c,av}$ per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM). ....                           | 199 |
| <b>Tabella 53</b> - Riepilogo della fase di riscaldamento (solo olio e olio e xilitolo). ....   | 200 |
| <b>Tabella 54</b> - Riepilogo della fase di raffreddamento (solo olio e olio e xilitolo). ....  | 200 |
| <b>Tabella 55</b> - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di riscaldamento medio $\Delta t_{h,av}$ per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM). ....                            | 201 |
| <b>Tabella 56</b> - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di raffreddamento medio $\Delta t_{c,av}$ per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM). ....                           | 201 |
| <b>Tabella 57</b> - Riepilogo della fase di riscaldamento (solo olio e olio e xilitolo-mannitolo). ....   | 202 |
| <b>Tabella 58</b> - Riepilogo della fase di raffreddamento (solo olio e olio e xilitolo-mannitolo). ....  | 202 |
| <b>Tabella 59</b> - Deviazioni assolute (%) tra il tempo medio di riscaldamento $\Delta t_{h,av}$ per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM). ....                            | 203 |
| <b>Tabella 60</b> - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di raffreddamento medio $\Delta t_{c,av}$ per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM). ....                           | 203 |
| <b>Tabella 61</b> - Riepilogo della fase di riscaldamento (olio e xilitolo e olio e xilitolo-mannitolo). ....   | 204 |
| <b>Tabella 62</b> - Riepilogo della fase di raffreddamento (olio e xilitolo e olio e xilitolo-mannitolo). ....  | 204 |

# Presentazione

---

In un'epoca di crisi economica in cui i forni elettrici prendono sempre più piede, la costruzione di un forno che utilizza l'energia solare per la cottura dei cibi, garantisce benefici sia a livello economico sia a livello ambientale soprattutto in quelle aree rurali dove la radiazione solare è disponibile a larga scala, mentre vi è mancanza di altre forme di energia.

Questo lavoro di tesi studia l'utilizzo dell'energia solare come unica fonte di energia per la cottura dei cibi attraverso l'utilizzo di un forno solare. In particolare si andrà ad effettuare un'analisi dettagliata sull'efficienza di un forno solare precedentemente realizzato presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche dell'Università Politecnica delle Marche. Verranno descritte le prove effettuate per testare suddetto forno e saranno presentati i risultati ottenuti. Saranno descritti i materiali a cambiamento di fase scelti e utilizzati e saranno riportati i vari confronti fatti.

Nel primo capitolo si introduce brevemente il funzionamento del sole, verrà poi effettuata una panoramica storica su come è nata l'idea di forno solare, in seguito verranno spiegati ed analizzati i vari tipi di forni solari esistenti, fino ad arrivare ad illustrare i modelli maggiormente utilizzati nei campi profughi.

Nel secondo capitolo si descrive il principio di funzionamento del forno solare e viene spiegato lo sfruttamento dei forni solari in assenza di radiazione solare attraverso l'utilizzo dei materiali a cambiamento di fase (PCMs). Vengono dapprima spiegati i possibili cambi di fase che si possono avere, viene poi fatto un elenco dei PCMs presenti sul mercato fornendo una classificazione basata sulla natura del materiale distinguendoli in organici, inorganici ed eutettici. Vengono poi descritti nel dettaglio i PCMs da noi scelti in funzione della temperatura di fusione e poi utilizzati per le prove. La temperatura di fusione era per noi un vincolo da dover rispettare in funzione della massima temperatura raggiungibile dal nostro forno solare. Dopo varie considerazioni si sono scelti: eritritolo e xilitolo nelle loro composizioni pure e una miscela (proprio per abbassare la temperatura di fusione del mannitolo) xilitolo – mannitolo in composizione 70:30. Vengono infine descritte le fasi realizzative della pentola per l'alloggiamento del PCM e troviamo una sezione descrittiva del fluido di prova utilizzato durante le rilevazioni ovvero l'olio silconico.

Nel terzo capitolo viene analizzato un forno solare ad alta efficienza realizzato presso il dipartimento della nostra Facoltà. Si descrivono in modo dettagliato e con l'aiuto di disegni esplicativi le caratteristiche geometriche, il principio di funzionamento, i materiali con cui è stato costruito e le modifiche apportate per migliorare al massimo la sua efficienza, con particolare attenzione alle procedure adottate durante le fasi costruttive.

Nel quarto capitolo verrà introdotto un forno solare a concentrazione realizzato sempre nella nostra Facoltà, dunque si parlerà delle caratteristiche, dei materiali utilizzati, della costruzione e del principio di funzionamento.

Nel quinto capitolo verrà analizzato nel dettaglio il forno solare a scatola portatile che abbiamo utilizzato per effettuare tutti i test riportati in questo lavoro. Vengono descritte, attraverso disegni esplicativi e dettagli, le fasi realizzative del forno, vengono riportate le caratteristiche geometriche, il principio di funzionamento, i materiali scelti per cercare di migliorare al massimo la sua efficienza cercando di ottimizzare riflettanza degli specchi, trasmittanza dei vetri, assorbanza delle vernici e isolamento termico della camera di cottura.

Nel capitolo 6 saranno riportati tutti i test effettuati negli anni 2017, 2018 e 2019 con i risultati ottenuti. Sono stati effettuati diverse tipologie di prove:

- Prove a vuoto: sono servite per determinare le caratteristiche proprie del forno solare analizzato in questo lavoro, portandolo alla massima temperatura raggiungibile. Sono stati eseguiti 3 test a vuoto grazie ai quali siamo stati in grado di calcolare la prima figura di merito  $F_1$  e di conoscere il limite di temperatura raggiungibile dal forno per poter procedere nella scelta dei PCM da voler testare.
- Prove a carico: sono state svolte inserendo nel forno una pentola in alluminio verniciata di nero con diverse masse di fluido all'interno (1.5 kg, 2.0 kg e 3.0 kg). I fluidi di prova sono stati l'acqua e l'olio silconico. L'acqua, è facilmente reperibile e quindi usata per questo tipo di prove con conseguente facilità di confronto con gli altri risultati ottenuti da altri ricercatori. L'olio silconico è stato scelto per andare oltre la temperatura di evaporazione di 100 °C dell'acqua avendo una più elevata e poi, essendo un olio silconico, ha proprietà che si mantengono stabili nel tempo e con la temperatura. Le prove a carico sono state eseguite anche con un accumulo termico a base di zuccheri: eritritolo e xilitolo nella loro composizione pura e una miscela di xilitolo – mannitolo in composizione 70:30.

Successivamente, i risultati ottenuti nei test con solo olio e olio e i diversi PCM sono stati analizzati al fine di confrontare i tempi di riscaldamento e raffreddamento del fluido di prova nelle varie situazioni e i vari parametri calcolati per ciascuna prova. Si scoprirà quindi quanto la presenza di PCM all'interno della pentola influenzi i tempi di riscaldamento e raffreddamento del fluido, comprendendo così se ciò porta ad un miglioramento o ad un peggioramento in termini di tempo.

Nel capitolo sette sono riportate le conclusioni di questo lavoro, le considerazioni sui risultati ottenuti e i problemi incontrati durante i test e le acquisizioni sono inclusi e sono descritti gli sviluppi futuri.

# 1. Stato dell'arte

---

## Introduzione

Per forno solare si intende un dispositivo in grado di concentrare la luce del sole ed utilizzarla per fini alimentari.

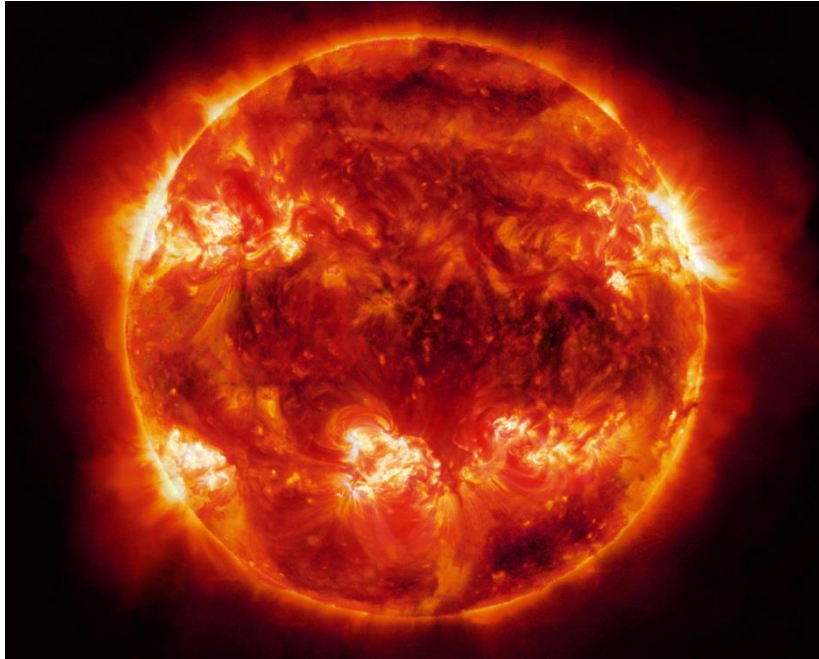
Perché utilizzare forni solari? Essi utilizzano la fonte solare, ovvero energia pulita, rinnovabile e gratuita che è possibile convertire ed impiegare in particolari collettori termici chiamati forni solari. Attraverso questo prototipo, nelle migliori condizioni ambientali disponibili, ci si propone di raggiungere ed eventualmente superare una temperatura di 300 °C all'interno della camera di cottura. Nonostante le elevate temperature raggiungibili, l'assenza di dispositivi elettrici e/o combustibili fossile, garantisce un livello di sicurezza molto elevato e costi relativamente bassi.

## 1.1 Il sole e l'energia solare

Il Sole è una stella medio-piccola di colore giallo e posizionata a circa 30 mila anni luce dal centro di una galassia a spirale. Il Sole è la stella a noi più vicina ed è l'astro più importante per quanto riguarda la vita sul nostro pianeta: senza la sua luce e il suo calore la vita, come noi la conosciamo, sarebbe impossibile.

Questa stella può essere immaginata come una sfera di gas ionizzato (chiamato plasma) avente diametro di 1.392.000 km, ovvero circa 109 volte il diametro della Terra ed è distante da quest'ultima circa 149.600.000 km.

Nella sua parte più centrale chiamata nucleo (che si trova ad una temperatura variabile tra gli  $8 \cdot 10^6$  K ed i  $40 \cdot 10^6$  K) avvengono reazioni di fusione nucleare e l'energia da essa prodotta viene trasmessa attraverso una successione di scambi termici convettivi e radiativi, quindi viene irradiata nello spazio sotto forma di radiazione elettromagnetica: di questa enorme energia, stimata in termini di potenza a  $3.86 \cdot 10^{20}$  MW, solo una piccola parte pari a  $1.8 \cdot 10^{12}$  MW irradia la Terra. Nonostante tutto, questa sarebbe di gran lunga superiore al fabbisogno energetico del nostro pianeta. Appare dunque evidente come questa risorsa, pulita e rinnovabile, debba essere assolutamente sfruttata anche perché sta diventando sempre più implacabile l'aumento di prezzo dei combustibili fossili, il loro esaurimento e l'inquinamento da essi provocato.

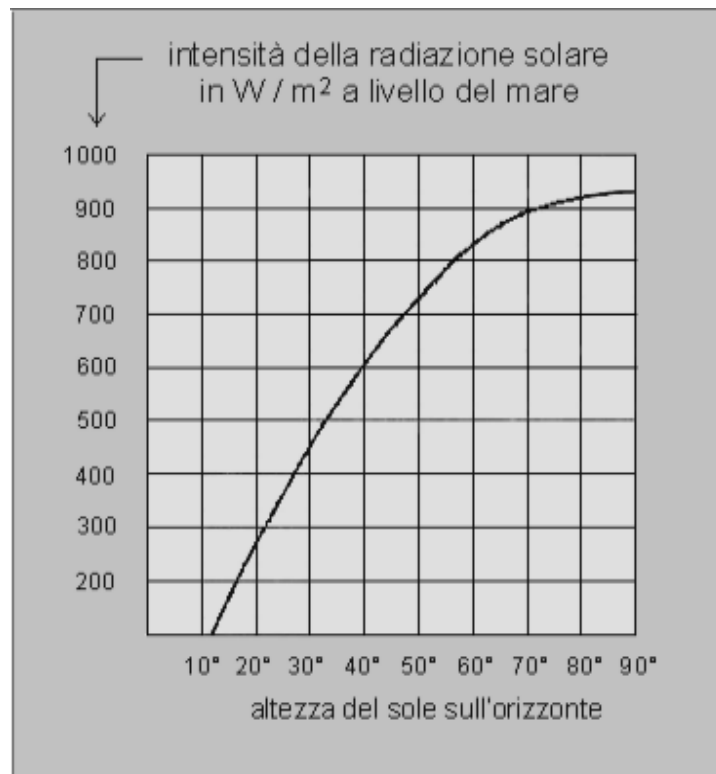


**Fig. 1 - Il sole**

Per energia solare si intende la radiazione emessa dal sole sotto forma di onde elettromagnetiche, in parte visibile ai nostri occhi (quella che chiamiamo luce) e in parte invisibile (radiazioni ultraviolette e infrarosse).

Il termine scientifico "radiazione solare" indica quanta energia proveniente dal sole colpisce una superficie di 1 mq nell'arco di un giorno oppure di un anno; l'unità di misura è il kWh/m<sup>2</sup>/giorno oppure kWh/mq/anno. Per indicare la potenza dei raggi solari in un determinato istante si usa il termine "intensità della radiazione solare" la cui l'unità di misura è il kW/m<sup>2</sup> o il W/m<sup>2</sup>. Il termine costante solare definisce la quantità di radiazione elettromagnetica solare che arriva per unità di superficie, misurandola a livello della superficie esterna dell'atmosfera terrestre. La costante solare include tutti i tipi di radiazione solare, non soltanto la luce visibile. Il suo valore è stato misurato da satelliti a circa 1.366,1 W/m<sup>2</sup>, anche se può variare di circa lo 6,9% durante l'anno (da circa 1.412 W/m<sup>2</sup> a gennaio a 1.321 W/m<sup>2</sup> a luglio) a causa della variazione della distanza della terra dal sole, oltre ad una lieve variazione della luminanza solare di poche parti su mille da un giorno all'altro.

Esempio: a Berlino (latit. 52°30') l'altezza massima del sole al 21 dicembre è di 14° perciò in questo periodo, in condizioni ottimali e solo a cavallo del mezzogiorno solare, l'intensità della radiazione solare è di 180 W.



**Fig. 2** - Grafico radiazione solare

La radiazione solare è una fonte di energia rinnovabile che ha il grande vantaggio di essere disponibile in misura praticamente illimitata e di non inquinare l'ambiente. L'utilizzo di questa fonte, tuttavia, presenta alcuni svantaggi. Uno è la sua discontinuità (dovuta all'alternanza del giorno e della notte, al ciclo delle stagioni e alla variazione delle condizioni meteorologiche), che obbliga ad utilizzare sistemi di accumulo dell'energia o integrazione con degli impianti che utilizzano altre fonti energetiche. Un altro è la bassa densità energetica che rende necessario l'impiego di ampie superfici di raccolta con elevati costi di impianto. Oggi esistono due metodi per sfruttare l'energia che il sole invia sulla terra. Il primo sfrutta l'effetto termico della radiazione solare e consiste nel riscaldare un fluido (in genere acqua o aria) mediante la captazione di appositi pannelli. L'acqua o l'aria calde così ottenute possono poi essere utilizzate in svariate applicazioni civili (riscaldamento di abitazioni, produzione di acqua calda), agricole (riscaldamento di serre e stalle, essiccazione di foraggi) e industriali. Questa tecnologia è oggi abbastanza diffusa, in quanto di semplice applicazione ed economicamente conveniente. Il secondo metodo sfrutta l'effetto elettromagnetico della radiazione solare per convertire, mediante appositi dispositivi, energia della radiazione solare in energia elettrica (conversione fotovoltaica). La conversione fotovoltaica sfrutta la capacità di alcuni elementi (per esempio il silicio) di trasformare direttamente la radiazione solare in elettricità. Ad oggi, tali dispositivi cominciano a trovare applicazione anche in utenze di medie dimensioni (case sparse, celle frigorifere, pompe per l'acqua ecc.) ed il miglioramento delle tecniche industriali di produzione potrà comunque, anche se non immediatamente, rendere l'energia solare concorrenziale per applicazioni più generalizzate. Analizzando i consumi primari di energia per fonte, è possibile notare che dal 2000 al 2013

il consumo di petrolio è diminuito del 35,8%. Questa diminuzione, particolarmente marcata nel secondo quinquennio (-15,4%), è dovuta principalmente alle scelte energetiche del nostro Paese, che hanno privilegiato il gas naturale come fonte primaria di energia per il settore civile e la generazione elettrica. Dal 2005 si osserva una flessione negativa anche per i consumi di gas (decrescita comunque inferiore a quella del petrolio nello stesso periodo) che è stata particolarmente significativa a partire dalla crisi economico-finanziaria. Infatti, nel 2013 si è registrato un calo dei consumi di gas pari al 23,6% rispetto al 2005. Le fonti che, pur in presenza di una crisi economica, hanno mostrato un andamento crescente nel periodo di riferimento sono le rinnovabili, che dai 12.904 ktep del 2000 hanno raggiunto i 30.783 ktep, registrando un incremento del 138,5%. Ciò detto, occorre ribadire che il loro contributo alla copertura dei consumi resta, nel mix energetico complessivo, ancora marginale.

## 1.2 Storia tecnologica dei forni solari

I primi popoli che hanno intuito la possibilità di concentrare i raggi del sole per ottenere alte temperature sono stati i Greci, i Romani e il popolo Cinese, che hanno studiato il fenomeno con l'utilizzo di specchi curvi.

La percezione che si aveva all'epoca nei riguardi delle potenzialità di questa tecnologia era l'uso in ambito militare, o più raramente in ambito domestico come l'accensione di torce per l'illuminazione.

Si è dovuto attendere il XVI secolo affinché lo sviluppo del commercio a livello mondiale portò in occidente varie specie di piante tropicali che necessitavano di alte temperature per essere coltivate nei paesi nordici.

Sia questa necessità, sia la maggiore diffusione del vetro e la sua maggiore accessibilità dovuta alla diminuzione del suo prezzo, portarono all'invenzione della serra.

La serra può essere considerata l'antenato del forno solare a scatola, in quanto tutti e due trattengono il calore solare all'interno di uno spazio circoscritto.

Proprio da questo concetto nel 1767 partì Horace-Bénédict de Saussure, scienziato, alpinista e naturalista svizzero, per costruire il primo vero e proprio forno solare della storia.

*“è un fatto noto, probabilmente noto da molto tempo, che una camera, una carrozza o qualsiasi altro luogo è più caldo quando i raggi del sole passano attraverso il vetro”*

*Horace de Saussure*

Saussure era sorpreso di come un fenomeno così comune non aveva portato ad alcuna ricerca empirica sulla massima temperatura raggiungibile in una scatola solare di vetro.

Nell'ambito degli studi sull'energia solare, i suoi contemporanei preferivano concentrarsi sull'uso di specchi ustori, con l'obiettivo di bruciare oggetti a distanza o fondere metalli.

L'obiettivo di de Saussure era invece rivolto allo studio della raccolta di calore all'interno di scatole di vetro.

Costruì quindi una serra in miniatura costituita da cinque scatole di vetro di dimensioni decrescenti, in modo da essere disposte l'una dentro l'altra. Dispose la scatola su un tavolo



nero e lo espose al sole per diverse ore, ruotandolo in modo tale che i raggi del sole colpivano la scatola sempre perpendicolarmente.

Misurando poi la temperatura all'interno di ciascuna scatola, notò che quella più esterna era la più fredda e che la temperatura aumentava spostandosi verso l'interno, all'interno della quale registrò la temperatura più alta di 87.5 °C.

Oggi possiamo spiegare meglio quello che è successo nelle scatole di vetro di de Saussure o cosa accade in qualsiasi contenitore di vetro o di un edificio con vetri esposti al sole.

I raggi solari penetravano le scatole di vetro ed erano assorbiti dalla superficie nera del tavolo su cui erano appoggiate le scatole.

In questo processo, l'energia luminosa si presenta sotto forma di calore.

Gran parte di questo calore era all'interno delle scatole di vetro sotto forma di aria calda e radiazione termica.

Ma il vetro ha una proprietà particolare: è facilmente attraversabile dai raggi solari, ma impedisce alla radiazione termica di fuoriuscire.

Quindi questa energia intrappolata ha riscaldato l'aria all'interno della scatola e le pareti di vetro hanno impedito all'aria calda di fuoriuscire anche se una parte di esso si è perso per conduzione attraverso il vetro.

Successivamente de Saussure perfezionò il suo dispositivo tentando di arginare il più possibile la fuoriuscita di calore.

Costruì quindi una piccola scatola rettangolare di legno rivestita di sughero, nella parte superiore direttamente esposta al sole posizionò tre strati di vetro, raggiungendo così una temperatura interna di 109 °C.

Tuttavia, la sua scatola perdeva ancora una certa quantità di calore verso l'esterno, quindi cercò di isolare meglio la scatola utilizzando un ulteriore rivestimento di lana.

De Saussure utilizzò la scatola solare per dimostrare anche il motivo della differenza di temperatura tra luoghi a diversa altitudine, arrivando alla conclusione che in montagna l'aria è più rarefatta, mentre ad altitudini più basse la quantità di anidride carbonica e vapore acqueo è maggiore, quindi questa atmosfera più densa trattiene il calore più facilmente, infatti la quantità di calore proveniente dal sole non dipende dall'altitudine, infatti, all'interno della scatola solare la temperatura rimaneva pressoché invariata ad altitudini diverse.

Gli esperimenti di de Saussure servirono da modello agli scienziati successivi che dimostrarono la relazione tra la temperatura terrestre e la sua atmosfera.

Altri seguirono le orme di de Saussure, tra cui il britannico Sir John Herschel e l'americano Samuel Pierpont Langley, ma una figura sicuramente fondamentale per lo sviluppo dello studio dell'energia solare termica fu l'inventore francese Augustin Mouchot (1825 – 1912) che, sulla base del lavoro svolto da de Saussure, inventò una caldaia di vetro che esposta al sole portava l'acqua all'ebollizione, il cui vapore avrebbe alimentato un piccolo motore a vapore.

L'obiettivo di Mouchot era quello di sostituire il carbone con una fonte di energia rinnovabile, poiché secondo lui il carbone si sarebbe esaurito.

Il suo progetto di sostituzione del carbone con l'energia solare si rivelò fallimentare, poiché all'epoca il carbone risultava più economico grazie ai benefici economici del trattato

Cobden-Chevalier. Mouchot fu comunque uno dei primi personaggi ad intuire i limiti dell'uso di energie non rinnovabili, gettando le basi di una cultura basata sull'uso dell'energia solare e il rispetto ambientale.

Verso la fine del XIX secolo, la storia dell'energia solare conobbe altri importanti studiosi, tra cui l'americano Aubrey Eneas, che ripercorrendo il lavoro di Mouchot, costruì un riflettore parabolico di grandi dimensioni nel sud ovest degli Stati Uniti e costituì la prima società che si occupava di produzione di dispositivi solari, e Frank Shuman (1862 – 1918) che istituì la Sun Power Company, e costruì la prima centrale solare al mondo, a Maadi in Egitto, costituita da specchi parabolici per alimentare un motore da 60-70 HP in grado di pompare 23.000 litri d'acqua al minuto dal Nilo agli adiacenti campi di cotone.

Purtroppo, anche i risultati delle ricerche di Shuman, come quelli di Mouchot, non si inserirono nel mercato, poiché si rivelarono economicamente poco competitivi con i diretti concorrenti, come il carbone e il petrolio, che avevano ancora un prezzo basso, e restarono quindi le fonti di energia più convenienti presenti sul mercato, ma Shuman comprese la possibilità di esaurimento del petrolio, e prevede l'utilizzo dell'energia solare nel futuro.

*“We have proved the commercial profit of sun power in the tropics and have more particularly proved that after our stores of oil and coal are exhausted the human race can receive unlimited power from the rays of the sun”*

*Frank Shuman*

Agli inizi del 1900, furono progettati una serie di edifici in grado di sfruttare l'energia solare utilizzando i principi della scatola solare di vetro di de Saussure, ma questi primi tentativi sono stati presto dimenticati, per poi essere ripresi nel corso degli anni 30. L'interesse per questi tipi di soluzioni energetiche, si è ripresentato dopo la seconda guerra mondiale, quando il bisogno di nuove abitazioni era cresciuto considerevolmente, e con esso, anche lo studio di nuove soluzioni energetiche.

Ma solo verso la metà del secolo scorso, è tornata all'attenzione degli studiosi la questione della cottura solare, e la ricerca delle possibili applicazioni di essa.

Un importante contributo alla cottura solare moderna è stato dato da Maria Telkes (1900 – 1996), biofisica di origine ungherese associata al MIT (Massachusetts Institute of Technology). Nel corso degli anni 20 inventò un distillatore di plastica capace di produrre qualche litro d'acqua dolce dal mare per i naufraghi.

Il principio era semplice, l'acqua del mare veniva posta all'interno di una scatola chiusa coperta da una superficie trasparente di vetro ed esposta al sole, l'energia solare entrava attraverso la copertura trasparente, l'acqua salata veniva scaldata e parte di essa evaporava e si condensava sulla superficie interna della lastra che copriva il distillatore.

Nel 1948 Maria Telkes diresse la costruzione della prima abitazione sperimentale a riscaldamento solare, cui seguirono generatori termoelettrici per usi spaziali e terrestri.

Mentre, dal 1959, si dedicò alla realizzazione di una cucina solare, una struttura da usare all'aperto, costituita da un corpo centrale in cui si inseriva il cibo, e da una serie di pannelli riflettenti di alluminio, disposti in modo da catturare il calore del sole.

Il suo lavoro sulla cucina solare l'ha resa probabilmente la prima persona a creare un forno pratico e adatto per l'uso quotidiano. I riflettori conosciuti popolarmente come la "cucina Telkes" erano fra le migliori cucine solari e sviluppavano una temperatura di 225°C. La scatola era rettangolare a doppia parete isolata, con una apertura su ogni lato. Un doppio vetro era fissato superiormente, e i quattro lembi apribili incernierati come riflettori principali formavano un angolo di 60° rispetto all'orizzontale. Gli spazi ad angolo tra questi riflettori principali sono stati dotati di quattro specchi triangolari. La scatola isolata aveva al suo interno un telaio basculante per contenere il recipiente di cottura con un dispositivo anti ribaltamento.

Un altro pioniere della tecnologia solare energetica, è stato George Löf (1913 – 2009), direttore dell'Industrial Research Institute presso l'università di Denver, in Colorado. Nel 1950 sperimentò un forno solare parabolico che soprannominò "Umbroiler", poiché la sua forma ricordava quella di un ombrello. Questo suo progetto si rivelò economicamente fallimentare per l'epoca, anche se successivamente riuscì a distribuire altri modelli di forni solari in vari paesi del terzo mondo grazie all'UNESCO.

Dopo tale periodo, nella seconda metà del XX secolo, vari individui o gruppi sparsi in ogni parte del mondo, iniziarono ad interessarsi alle potenzialità della cucina solare, ed a sperimentare i propri dispositivi, cercando di dimostrare i vantaggi dell'utilizzo di questa tecnologia. Nel 1955, un gruppo di studiosi e appassionati di Phoenix, si organizzarono in una associazione chiamata Association for Applied Solar Energy e tennero la loro prima conferenza, dalla quale nacque l'American Solar Energy Society e l'International Solar Energy Society.

L'attenzione era focalizzata sulle potenzialità dell'uso della cucina solare per far fronte alle carenze energetiche combinate alla sovrappopolazione, soprattutto in Cina e in India. Infatti, in Cina si tenne nel 1973 un seminario sulla cucina solare e nel 1981 iniziò la distribuzione di forni solari sovvenzionata dal governo cinese.

Un ulteriore impulso alla scoperta della cucina solare, venne proprio nel corso degli anni 80, a causa dell'incipiente crisi petrolifera, con una notevole sperimentazione in Europa e negli Stati Uniti, infatti i principali gruppi come ULOG in Svizzera, EG Solar in Germania e Solar Cookers International nel Stati Uniti, sono nati proprio in quegli anni.

Sempre negli anni 80, una donna dell'Arizona, Barbara Kerr, sperimentò l'efficienza di vari tipi di forni solari, soprattutto forni solari a muro e forni solari a pannelli, ed è proprio quest'ultima tipologia che ebbe grande successo.

Si trattava di un forno solare formato da pannelli di cartone pieghevole con una superficie riflettente, ed è proprio la semplicità e il basso prezzo che ne determinarono lo sviluppo. Infatti qualche anno più tardi la Solar Cookers International con l'assistenza tecnica di Barbara Kerr svilupparono l'introduzione di una nuova tipologia di forno solare, un ibrido tra la tipologia parabolica e a pannelli.

Questi forni determinarono una svolta nella storia della cucina solare, perché grazie al loro basso costo, erano in grado di soddisfare le esigenze degli abitanti dei paesi più poveri del mondo.

Nel 1987 la Solar Cookers International, si pose come obiettivo quello di diventare il punto di riferimento e di collegamento principale per tutte le organizzazioni promotrici della cottura solare del mondo, avendo come sua natura quella di educare la popolazione alla cucina solare. Nello stesso anno le Nazioni Unite diffusero i dati sulla popolazione mondiale, giunta a cinque miliardi, e si ipotizzò che almeno un miliardo di persone potevano beneficiare dell'uso della cucina solare, questo target, oggi è probabilmente raddoppiato.

Di forte interesse storico, è il fatto che prima della fondazione della Solar Cookers International, si tenne una grande manifestazione per la sensibilizzazione della popolazione nei confronti della cucina solare, sugli altipiani boliviani, che è una zona del mondo fortemente soggetta a carenza di legname e deforestazione. L'evento fu organizzato da due società, la Pillsbury Corporation e la Meals for Millions, che tennero dimostrazioni di cucina e lezioni sulla costruzione di forni solari con i materiali locali agli abitanti del posto.

Nel 1988, la Pillsbury Corporation, in collaborazione con la Foster Prents (ora Save the Children) ha sponsorizzato un progetto simile in Guatemala.

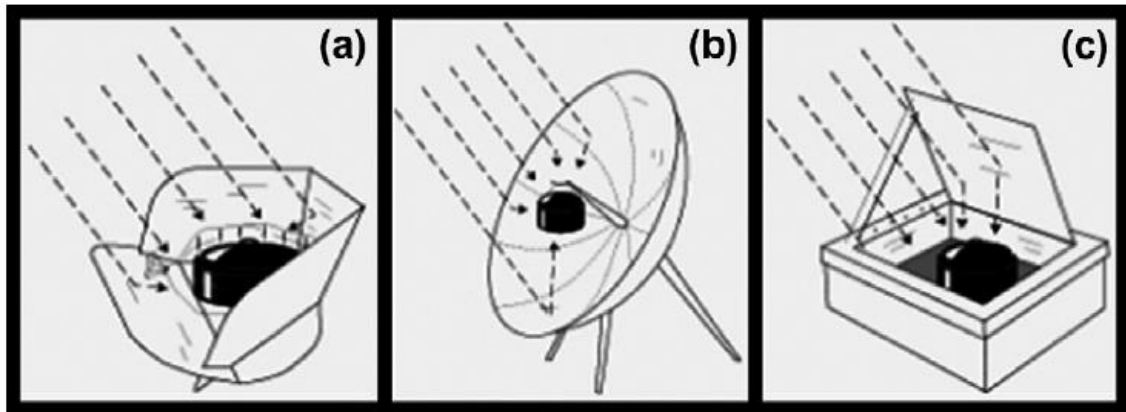
Questi sono stati i primi progetti internazionali nell'ambito della cucina solare, che hanno poi dato il via ad altri progetti analoghi che continuano ancora oggi.

Da allora, numerose altre organizzazioni si sono formate per sponsorizzare progetti e promuovere l'attività della cottura solare nel mondo.

### **1.3 Classificazione dei forni solari**

E' un fatto evidente che ci sono innumerevoli stili di forni solari in tutto il mondo e vengono continuamente migliorati e sviluppati da ricercatori e produttori. Pertanto, la classificazione di forni solari è un lavoro duro. Tuttavia si può affermare che la maggior parte dei forni solari oggi rientrano nelle tre categorie principali, come mostrato in Fig. 3, quali:

- forni solari a pannelli;
- forni solari parabolici;
- forni solari a scatola.



**Fig. 3** - Tipi di forni solari: (a) forno solare a pannelli; (b) forno solare parabolico; (c) forno solare a scatola.

### 1.3.1 Forni solari a pannelli

I forni solari a pannelli possono essere considerati il tipo più comune a disposizione per la loro facilità di costruzione e di materiale a basso costo. Nei forni a pannelli, la luce del sole è concentrata dall'alto. Questo metodo di cottura solare non è molto utilizzato in quanto fornisce una potenza di cottura limitata. D'altro canto, questo tipo di forno solare, è molto apprezzato da quelle persone che vivono da sole o viaggiano, in quanto è facilmente trasportabile.

Tali forni solari utilizzano apparecchiature riflettenti per la luce diretta del Sole per un recipiente di cottura che è racchiuso in un sacchetto di plastica trasparente.

Il forno a pannelli del Dr. Roger Bernard [1] mostrato in Fig. 4, è uno dei disegni più popolari di questa categoria. Per produrre tale forno sono stati utilizzati solo cartone e pellicola, con il vantaggio di preservare i cibi senza bruciarli.



**Fig. 4** - Forno solare a pannelli

Di contro però, le prestazioni dei forni a pannelli sono altamente dipendenti dalla radiazione riflessa quindi non sembrano efficaci in condizioni nuvolose.

Anche se, negli ultimi anni sono state comunque ampliate le aree di utilizzo di tale tipologia di forno; a tal proposito altri studiosi, quali Kerr e Scott [1], hanno progettato e costruito un apparato di energia solare per la sterilizzazione ed hanno inoltre indicato che il sistema previsto può essere utilizzato per la cottura e per scopi di conservazione alimentare.

### 1.3.2 Forni solari parabolici

Il primo forno solare parabolico è stato sviluppato da Ghai [1] nei primi anni del 1950 al National Physical Laboratory, in India. In seguito, Lof e Fester [1] hanno analizzato diverse geometrie e configurazioni per quanto riguarda il montaggio di questa tipologia di forno solare.

I forni solari parabolici possono raggiungere temperature elevate in un tempo molto breve. A differenza dei forni a pannelli o dei forni a scatola, non hanno bisogno di uno speciale recipiente di cottura. Tuttavia, un forno parabolico potrebbe causare il rischio di bruciare il cibo, se lasciato incustodito per un certo periodo di tempo, a causa del calore concentrato. Tale forno consiste di un riflettore parabolico con una pentola di cottura che si trova sul punto focale del forno stesso e di un supporto per sostenere il sistema di cottura, come mostrato in Fig. 5.



**Fig. 5** - Forno solare parabolico

### 1.3.3 Forni solari a scatola

La storia della tecnologia di cottura solare è iniziata con l'invenzione dei forni solari a scatola. Consiste essenzialmente in una scatola isolata con una copertura in vetro trasparente e superfici riflettenti la luce solare diretta. La parte interna della scatola è verniciata di nero al fine di massimizzare l'assorbimento di luce solare.

Sono collocati all'interno della scatola massimo quattro recipienti di cottura.

Una descrizione dettagliata del forno a scatola è illustrata in Fig. 6.

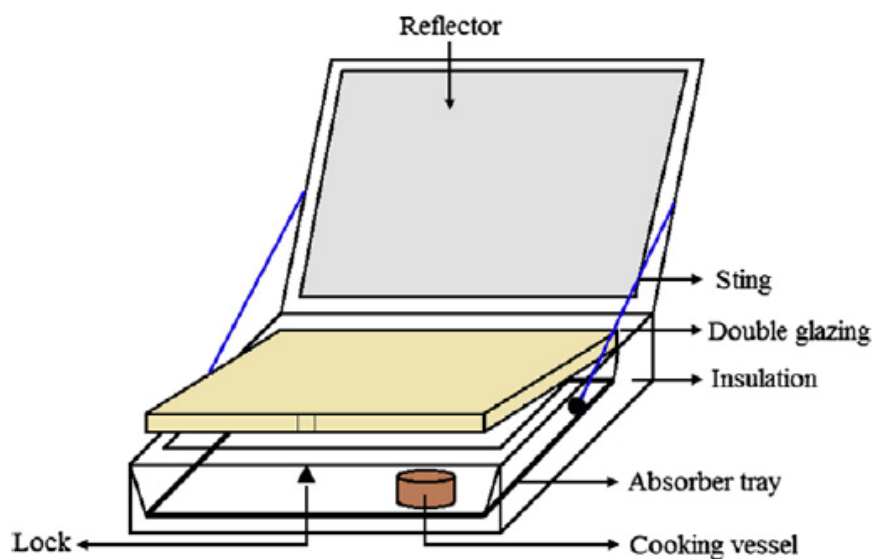


Fig. 6 - Componenti del forno solare a scatola

Ogni componente del forno a scatola ha una notevole influenza sulla potenza di cottura. Pertanto, l'ottimizzazione di questi parametri è vitale per ottenere la massima efficienza. Il cibo è direttamente esposto ai raggi solari.

Come vedremo di seguito, vari studiosi si sono interessati ad analizzare tale tipologia di forno solare, infatti si è notato che tale forno è lento a scaldarsi, ma funziona bene anche in presenza di radiazione diffusa, perdita di calore causata dal vento, nuvolosità intermittente e bassa temperatura dell'ambiente.

Dopo gli anni 1980, furono effettuate delle ricerche incentrate soprattutto sull'ottimizzazione dei parametri geometrici dei forni a scatola, dato che questi ultimi hanno un effetto dominante sulle prestazioni. In questo contesto, è stata spiegata l'importanza degli specchi in alluminio, i quali aumentano l'efficienza del forno solare, fornendo radiazione extra. I risultati hanno indicato che l'efficacia di concentrazione della radiazione dipende altamente dall'angolo degli specchi.

Altro elemento fondamentale è la scatola interna, chiamata assorbitore, la quale è una delle più significative componenti di un forno solare; la radiazione solare passa attraverso la parte vetrata ed è assorbita da questa superficie dipinta di nero.

Le cucine a scatola solare sono un argomento di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) della Scuola di Ingegneria dell'Università Politecnica delle Marche da alcuni anni. Molti studenti hanno già condotto progetti pratici e prove nel campo dell'energia solare e nelle sezioni seguenti vengono presentati i forni realizzati e testati.

### Forno solare a scatola ad alta concentrazione

Il forno solare a scatola ad alto rapporto di concentrazione introdotto nelle seguenti linee è stato realizzato presso il DIISM ed è illustrato in [2].

Questo forno solare a scatola, mostrato in Fig. 7 e Fig. 8, è composto da una grande scatola con la funzione di camera di cottura. La scatola ha una doppia copertura in vetro (diametro 46 cm) nella parte superiore, che consente la trasmissione della radiazione solare all'assorbitore. Nella parte superiore della scatola, c'è una doppia fila di specchi booster. Questi specchi consentono di riflettere una quantità aggiuntiva di radiazione solare e, quindi, concentrarsi verso il coperchio e la camera di cottura. Ogni fila comprende 12 specchi e presenta un angolo di inclinazione diverso rispetto al piano orizzontale.

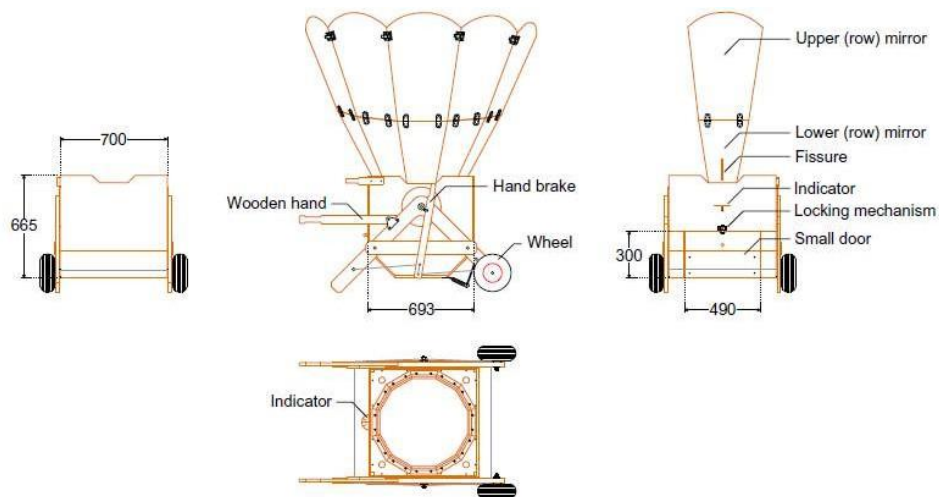


Fig. 7 - Viste del prototipo del forno solare a scatola

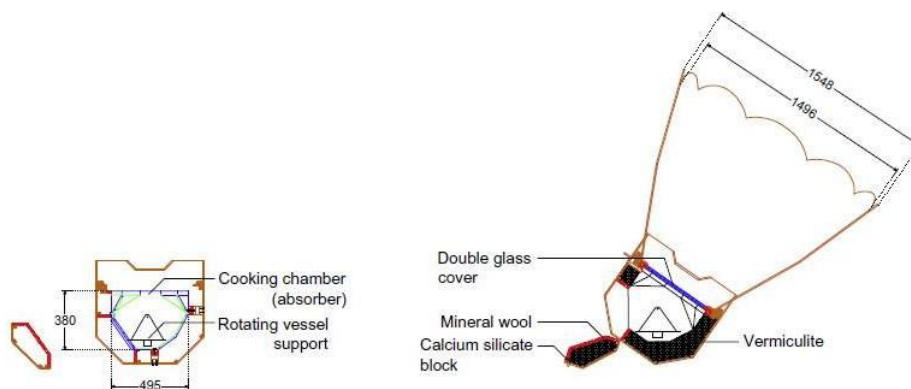


Fig. 8 - Sezioni del prototipo del forno solare a scatola



L'area della sezione massima degli specchi superiori rappresenta l'area di apertura della cucina,  $A_a$ , che è pari a  $1,89 \text{ m}^2$ .

Il rapporto di concentrazione geometrica del forno è:

$$C = \frac{A_a}{A_g} = \frac{1.89}{0.17} = 11.12$$

dove  $A_g$  è la superficie di copertura del vetro. Il valore del rapporto di concentrazione è piuttosto elevato per un forno solare a scatola e consente di classificare il prototipo tra forni a scatola e concentrazione.

La geometria speculare del ripetitore, ispirata a una pentola a forma di imbuto / cono, rende il prototipo quasi completamente dipendente dalla radiazione solare diretta. In altre parole, il forno non è in grado di sfruttare la radiazione solare diffusa, quindi richiede buone condizioni di cielo sereno per funzionare correttamente e raggiungere temperature elevate.

Il forno ha due mani di legno bordate e due ruote che ne consentono sia il movimento sia l'orientamento azimutale. Un orientamento zenitale è anche possibile in quanto la struttura principale (camera di cottura, copertura in vetro e specchi booster) è in grado di ruotare attorno all'asse orizzontale. Un freno a mano rimovibile mantiene fisso il forno quando non è necessario il monitoraggio zenitale. Uno sportello consente l'inserimento di alimenti nella camera di cottura, che è realizzata con lamiere di zinco verniciate con uno speciale rivestimento nero. Nella camera è presente un supporto per la pentola in grado di ruotare di  $360^\circ$ , in modo tale da mantenere in equilibrio le pentole posizionate su di esso quando cambia l'orientamento zenitale.

Il prototipo ha una massa di circa  $84 \text{ kg}$  e il suo volume è di circa  $2,6 \text{ m}^3$ .

### **Forno solare portatile a scatola**

Questo forno solare portatile a scatola è il principale argomento di indagine di questo lavoro, quindi è presentato in modo più dettagliato nel capitolo 5.

Il rapporto di concentrazione geometrica del forno solare portatile è:

$$C = \frac{A_a}{A_g} = \frac{0.681}{0.167} = 4.08$$

dove  $A_g$  è la superficie di copertura del vetro.

### **Forno solare portatile a basso costo**

Presso il DIISM è stato anche realizzato un forno a energia solare portatile semplice ed economico con un rendimento inferiore.

Questo forno solare a scatola (Fig. 9) è stato realizzato in modo tale da poter operare in situazioni di emergenza umanitaria a causa di catastrofi naturali, scenari di guerra ecc. Questo modello è caratterizzato da una funzionalità innovativa in quanto è smontabile, leggero e molto facilmente trasportabile

Le sue caratteristiche di leggerezza e manovrabilità sono il risultato di un'attenta scelta dei materiali utilizzati per la realizzazione, la negoziazione della necessità di maneggevolezza e basso costo e la necessità di garantire un certo standard di efficienza.

Per il corpo del forno, la scelta è stata un tipo di cartone a nido d'ape molto resistente, la cui struttura garantisce l'isolamento dell'assorbitore senza dover ricorrere all'uso di altri materiali. L'interno dell'assorbitore è stato quindi rivestito con nastro adesivo in alluminio, in modo da garantire l'effetto serra all'interno dell'assorbitore e mantenere la temperatura il più costante possibile. Per quanto riguarda lo specchio riflettente, nel nostro progetto, è stato usato un tipo di alluminio 3/10 MIRO-SUN Weatherproof Reflective 90 [3]. L'interno della cucina è stato quindi dipinto con una vernice nera ad alte prestazioni [4].

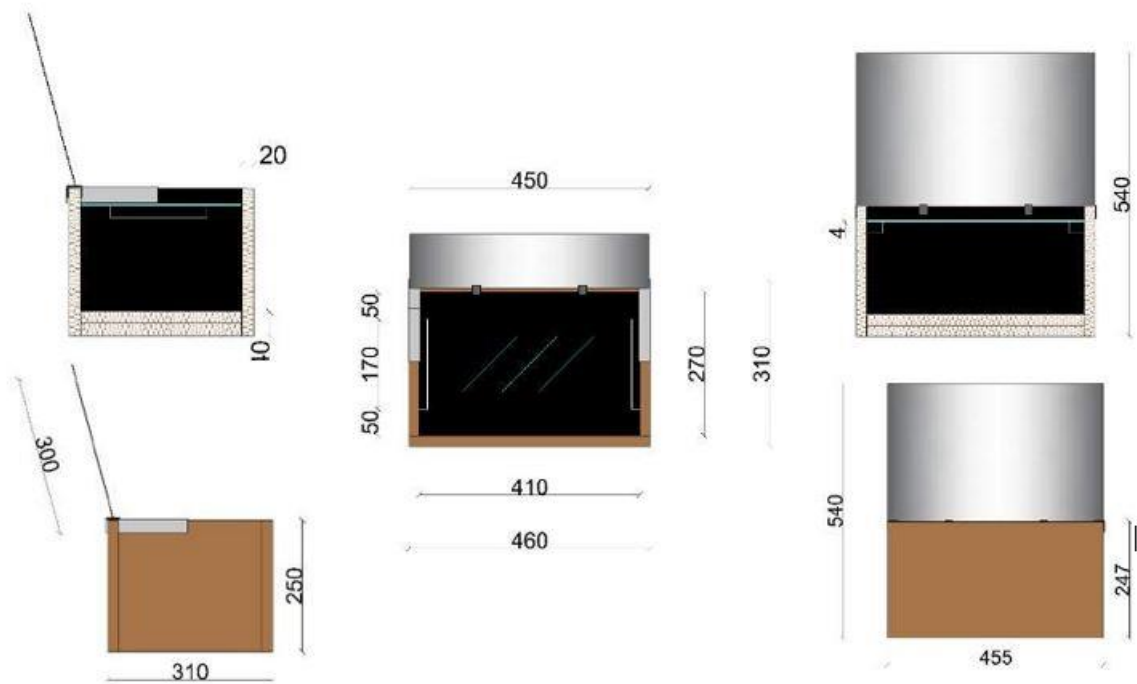
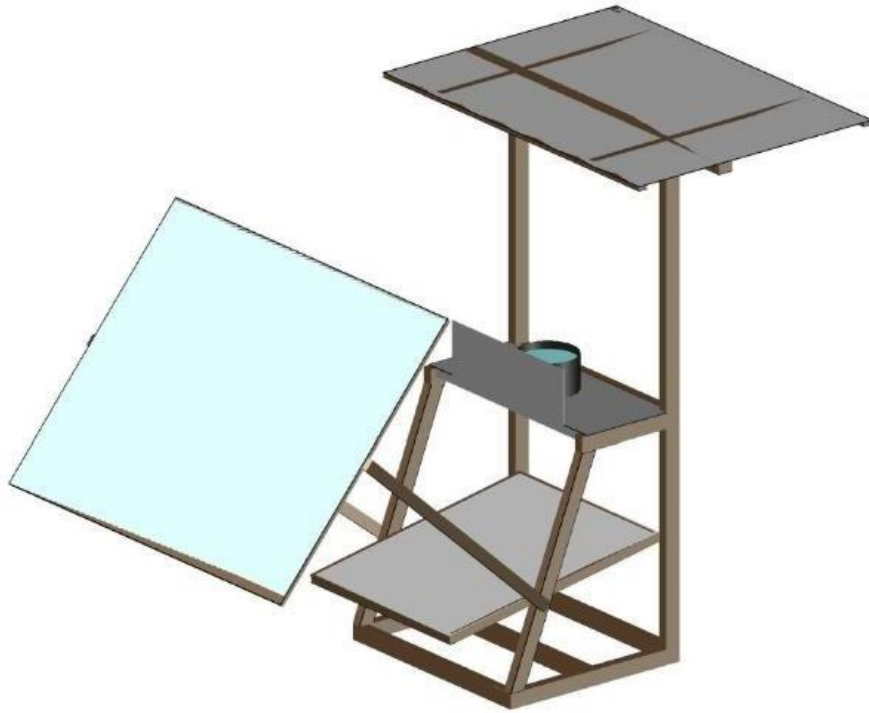


Fig. 9 - Dimensioni del forno portatile a scatola solare

### 1.3.4 Forni solari a concentrazione

Il forno solare a concentrazione funziona grazie all'utilizzo di una speciale lente rettangolare attraverso la quale i raggi solari vengono concentrati in un unico punto focale verso una superficie a specchio, che a sua volta riflette i raggi concentrati su un piano di cottura. La concentrazione dei raggi solari in un solo punto dà origine ad elevate temperature. Sfruttando la conversione dell'energia solare in energia termica sarà possibile cuocere o scaldare degli alimenti posizionati sull'apposito foro creato sul piano cottura. Se il sistema fisico alla base del forno solare è molto semplice, non altrettanto può dirsi

dell'aspetto tecnologico. Negli ultimi 40 anni la ricerca sta compiendo veri e propri passi da gigante per realizzare una tecnologia in grado di garantire efficacia di produzione ed efficienza nei costi. I primi esperimenti importanti di applicazione tecnologica del forno solare risalgono agli anni '60-70. Ad esempio, la centrale di Odeillo nei Pirenei francesi [5]. Un esempio di forno solare a concentrazione è quello proposto dall'azienda danese Heliac riportato in Fig.10.



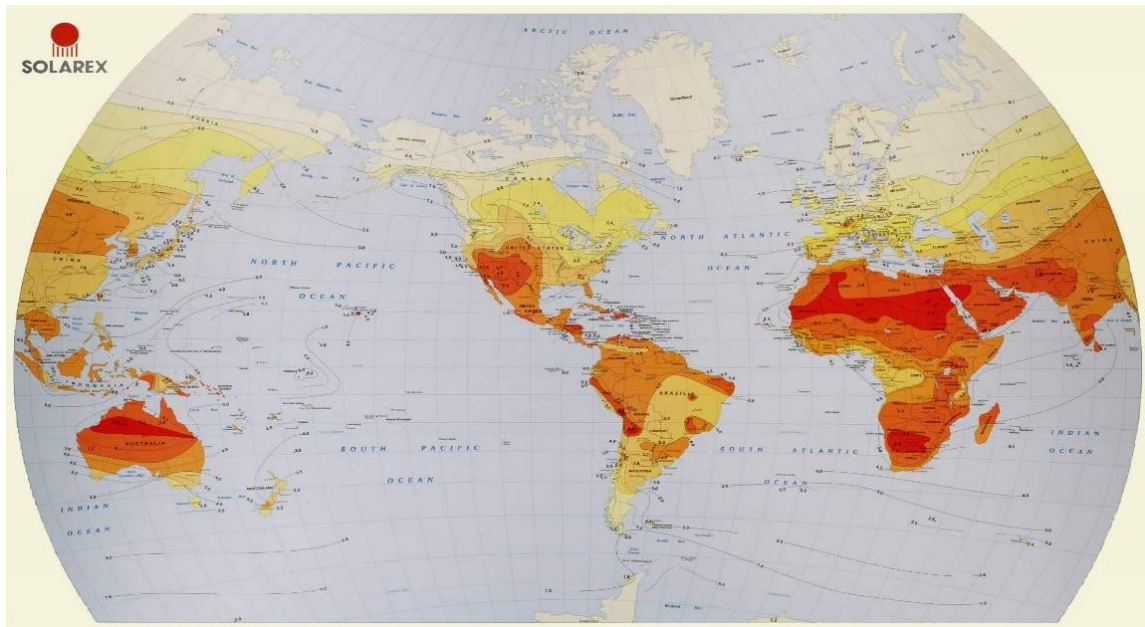
**Fig. 10** - Forno solare a concentrazione (Heliac ApS) [6]

## 1.4 Analisi di mercato

Oltre all'analisi generale dei vantaggi derivati dall'uso della cucina solare nel mondo, è particolarmente interessante domandarsi quali siano nello specifico i Paesi che potrebbero trarre maggior vantaggio dall'implementazione della cucina solare.

Il primo aspetto di cui tenere conto è che la cottura solare si rivela efficiente nei climi secchi e soleggiati per almeno sei mesi all'anno, quindi nei territori compresi tra l'equatore e il 40° parallelo Nord e Sud. Nei paesi con latitudine maggiore, la cucina solare è comunque possibile ma con sostanziali svantaggi energetici.

Si riporta, di seguito, una mappa indicante l'irraggiamento solare annuo medio nel mondo: le zone più scure sono più adatte alla cucina solare e viceversa.



Si possono dunque escludere tutte le zone a forte latitudine da quei Paesi con maggior potenziale vantaggio per l'uso della cucina solare. In merito a questo, si riporta uno studio condotto dalla Solar Cookers International (SCI), in cui si prendono in considerazione vari parametri per stilare una classifica dei Paesi con maggior potenziale vantaggio derivato dall'uso della cucina solare.

**Tabella 1** - Classifica dei Paesi con maggior potenziale vantaggio derivato dall'uso della cucina solare

|    | Paese           | Irraggiamento solare annuo (1) | Superficie Forestale (2) | Scarsità di carburante (3) | Popolazione nel 2020 (4) | Popolazione con scarsità di sole e carburante (5) | Popolazione con scarsità di carburante e sole nel 2020 (6) |
|----|-----------------|--------------------------------|--------------------------|----------------------------|--------------------------|---|--|
| 1  | India           | 1.2                            | 21                       | 2                          | 1,312                    | 12  | 157.4  |
| 2  | Cina            | 1                              | 16                       | 2                          | 1,402                    | 7   | 98.1   |
| 3  | Pakistan        | 1.5                            | 4                        | 2                          | 227                      | 20  | 45.4   |
| 4  | Etiopia         | 1.5                            | 5                        | 2                          | 105                      | 23  | 24.2   |
| 5  | Nigeria         | 0.5                            | 19                       | 1                          | 177                      | 7   | 12.4   |
| 6  | Sud Africa      | 2                              | 7                        | 1                          | 44                       | 20  | 11.0   |
| 7  | Brasile         | 0.75                           | 67                       | 1                          | 210                      | 4   | 8.4  |
| 8  | Uganda          | 1                              | 26                       | 2                          | 47                       | 16  | 7.5  |
| 9  | Tanzania        | 1                              | 45                       | 1                          | 50                       | 15  | 7.5  |
| 10 | Afghanistan     | 1                              | 2                        | 2                          | 40                       | 17  | 6.8  |
| 11 | Sudan           | 2                              | 30                       | 1                          | 93                       | 15  | 6.6  |
| 12 | Nepal           | 1                              | 33                       | 2                          | 35                       | 17  | 6.0  |
| 13 | Kenya           | 1                              | 32                       | 1                          | 39                       | 15  | 5.9  |
| 14 | Somalia         | 2                              | 13                       | 2                          | 18                       | 27  | 4.9  |
| 15 | Niger           | 2                              | 2                        | 1                          | 22                       | 22  | 4.8  |
| 16 | Mozambico       | 2                              | 40                       | 1                          | 24                       | 16  | 3.8  |
| 17 | Burkina Faso    | 0.5                            | 27                       | 1                          | 21                       | 16  | 3.4  |
| 18 | Haiti           | 2                              | 6                        | 2                          | 10                       | 31  | 3.1  |
| 19 | Madagascar      | 1                              | 22                       | 1                          | 27                       | 11  | 3.0  |
| 20 | Malawi          | 1                              | 34                       | 2                          | 17                       | 16  | 2.7  |
| 21 | Zimbabwe        | 2                              | 58                       | 2                          | 13                       | 20  | 2.6  |
| 22 | Sri Lanka       | 1                              | 35                       | 1                          | 21                       | 11  | 2.3  |
| 23 | Eritrea         | 2                              | 14                       | 2                          | 7                        | 27  | 1.9  |
| 24 | Rep. Dominicana | 2                              | 28                       | 1.5                        | 11                       | 15  | 1.7  |
| 25 | Zambia          | 1                              | 54                       | 1                          | 14                       | 8   | 1.1  |

Dettagli sugli indici utilizzati per stilare la classifica:

1. Irraggiamento solare annuo, quindi la quantità di luce solare che raggiunge il suolo, misurata in TWh/m<sup>2</sup>. Fino a 1.86 si assegna 1, con più di 2.09 si assegna 2. Dati NASA.
2. Percentuale di superficie ricoperta di vegetazione forestale. Dati FAO.
3. Stima sulla scarsità di carburante. Stima SCI.
4. Stima sulla popolazione nel 2020, misurata in milioni. Dati ONU.
5. Percentuale di popolazione con carenza di accessibilità al carburante.
6. Stima sulla popolazione con carenza di accessibilità a carburante nel 2020, in milioni.

Alla luce dei risultati di questo studio, si può dedurre che dal punto di vista del mercato, saranno probabilmente questi i Paesi in cui si svilupperà maggiormente in futuro la vendita, la produzione e la ricerca riguardo i forni solari.

## **Principali modelli di forni solari**




In questo paragrafo vengono elencati i principali modelli di forno solare esistenti sul mercato suddivisi secondo le tipologie illustrate nel capitolo precedente. Oltre al nome dell'azienda produttrice e relativo sito internet, quando disponibili, sono riportate informazioni sui materiali utilizzati, su dimensioni e peso, i tempi di montaggio, le potenze sviluppate, i prezzi e la tipologia di clientela per cui il prodotto è ideato.




## Forni parabolici

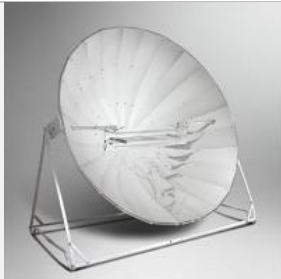

| Nome Modello            | Foto  | Azienda produttrice e riferimento web  | Materiale                       | Dimensioni (cm)                               | Peso (kg) | Montaggio   | Potenza (W)<br>Temperatura massima (°C) | Prezzo (\$) | Località e target di clientela              |
|-------------------------|---|--|---------------------------------|---|-----------|---|---|-------------|---|
| <b>AGE Solar Cooker</b> |    | TinyTech Plants (India)<br><a href="http://www.tinytechplant.com/domestic-solar-cooker-667075.html">http://www.tinytechplant.com/domestic-solar-cooker-667075.html</a> | Acciaio<br>Alluminio anodizzato | Confezione: 127x36x8.9<br>Riflettore: 120x120 | 17        | Da assemblare: telaio: 10 minuti, riflettore: 50 minuti | -<br>-                                  | -           | Privati cittadini indiani<br>Campi profughi |
| <b>ALSOL 1.2</b>        |   | ALSOL (Spagna)<br><a href="http://alsol.es/productos/cocina-alsol-1-2/">http://alsol.es/productos/cocina-alsol-1-2/</a>  | Alluminio<br>Acciaio zincato    | Confezione: 95x35x5<br>Diametro: 125          | 11        | Da assemblare in 2 ore                                  | 1300<br>200                             | 375         | Privati cittadini, soprattutto europei      |
| <b>ALSOL 1.4</b>        |  | ALSOL (Spagna)<br><a href="http://alsol.es/productos/cocina-alsol-1-4/">http://alsol.es/productos/cocina-alsol-1-4/</a>  | Alluminio                       | Confezione: 105x40x5<br>Diametro: 140         | 11        | Da assemblare in 2 ore                                  | 1500<br>200                             | 362         | Privati cittadini, soprattutto europei      |





|                           |   |   |                     |   |      |                        |              |     |  |
|---------------------------|---|---|---------------------|---|------|------------------------|--------------|-----|--|
| <b>ALSOL 14 COOP</b>      |    | ALSOL (Spagna)<br><a href="http://alsol.es/productos/cocina-alsol-k14/">http://alsol.es/productos/cocina-alsol-k14/</a> | Alluminio           | Confezione: 127x23x3<br>Ingombro: 150x150x70<br>Diametro: 140 | 9    | Da assemblare in 2 ore | 1500<br>200  | 297 | Privati cittadini, soprattutto europei       |
| <b>ALSOL K10</b>          |    | ALSOL (Spagna)<br><a href="http://alsol.es/productos/cocina-alsol-k10/">http://alsol.es/productos/cocina-alsol-k10/</a> | Acciaio zincato     | Confezione: 125x16x3<br>Ingombro: 110x110x50<br>Diametro: 100 | 8.7  | Da assemblare in 3 ore | 800<br>200   | 207 | Privati cittadini, soprattutto europei       |
| <b>BS-M1 Solar Cooker</b> |   | Bigstone Energy Science & Technology Co., Ltd. (Cina)   | Acciaio al carbonio | Diametro: 150   | 18.5 | Da assemblare          | -<br>800     | -   | Privati cittadini asiatici<br>Campi profughi |
| <b>BS-M2 Solar Cooker</b> |  | Bigstone Energy Science & Technology Co., Ltd. (Cina)   | Acciaio al carbonio | Diametro: 150   | -    | Da assemblare          | 1000<br>1000 | 32  | Privati cittadini asiatici<br>Campi profughi |






|                        |   |  |   |   |           |   |            |       |   |
|------------------------|---|--|---|---|-----------|---|------------|-------|---|
| <b>CookSack</b>        |    | Soltac (USA)<br><a href="http://www.soltac.com/html/cooksack.html">http://www.soltac.com/html/cooksack.html</a>  | Plastica,<br>alluminio  | Confezione<br>cilindrica:<br>17.3x10.7  | 0.34<br>0 | Assemblato<br>, da aprire e<br>posizionare            | -<br>100   | 59.95 | Situazioni<br>di<br>emergenza<br>e<br>campeggiatori |
| <b>COOKUP<br/>INOX</b> |    | IDCOOK<br>(Francia)<br><a href="http://www.idcook.com/it/80-barbecue-solare-cookup-inox.html">http://www.idcook.com/it/80-barbecue-solare-cookup-inox.html</a>                           | Struttura:<br>Acciaio<br>Riflettore:<br>PET   | Confezione:<br>105x20x11<br>Ingombro al<br>suolo:<br>125x72<br>Diametro:<br>105 | 8         | Da<br>assemblare                                      | -<br>200   | 280   | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>europei     |
| <b>COOKUP<br/>200</b>  |   | IDCOOK<br>(Francia)<br><a href="http://www.idcook.com/it/barbecue-solari/7-barbecue-solare-cookup200.html">http://www.idcook.com/it/barbecue-solari/7-barbecue-solare-cookup200.html</a> | Legno, S-<br>Reflect<br>250µ,<br>alluminio  | Confezione:<br>83x27x15<br>Ingombro al<br>suolo:<br>120x72<br>Diametro:<br>100  | 6.5       | Da<br>assemblare<br>senza<br>attrezzi in<br>10 minuti | -<br>200   | 448   | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>europei     |
| <b>Premium11</b>       |  | Sun And Ice<br>(Germania)<br><a href="http://sun-and-ice.de/en/pages/solarkocher-1.html">http://sun-and-ice.de/en/pages/solarkocher-1.html</a>   | Base:<br>acciaio<br>zincato<br>Riflettore:<br>alluminio<br>rivestito in<br>ceramica | Confezione:<br>117x58x12<br>Diametro:<br>110                                    | 8         | Da<br>assemblare:<br>dalle 2 alle<br>3 ore            | 450<br>350 | 364   | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>europei     |

|                                     |  |   |   |  |      |  |              |     |   |
|-------------------------------------|--|---|---|--|------|--|--------------|-----|---|
| <b>Premium14</b>                    |   | Sun And Ice<br>(Germania)<br><a href="http://sun-and-ice.de/en/pages/solarkocher-1.html">http://sun-and-ice.de/en/pages/solarkocher-1.html</a>                                      | Base:<br>acciaio<br>zincato<br>Riflettore:<br>alluminio<br>rivestito in<br>ceramica | Confezione:<br>117x55x10<br>Diametro:<br>140       | 14.5 | Da<br>assemblare:<br>dalle 2 alle<br>3 ore                             | 700<br>400   | 442 | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>europei         |
| <b>SOLAR<br/>COOKER 3<br/>SQ MT</b> |   | TinyTech<br>Plants (India)<br><a href="http://www.tinytechindia.com">http://www.tinytechindia.com</a>   | Acciaio   | Confezione:<br>114x30x23<br>Riflettore:<br>200x150 | -    | Da<br>assemblare:<br>telaio: 20<br>minuti,<br>riflettore:<br>80 minuti | -<br>-       | -   | Adatto a<br>gruppi di<br>persone e<br>campi<br>profughi |
| <b>SunFire 12</b>                   |  | SunFire<br>Solutions (Sud<br>Africa)<br><a href="http://www.sunfire.co.za/solar-cooking/solar-cooking-products/">http://www.sunfire.co.za/solar-cooking/solar-cooking-products/</a> | -   | Confezione:<br>65x60x10<br>Diametro:<br>120        | 10   | Da<br>assemblare:<br>dalle 3 alle<br>5 ore                             | 600<br>650   | 108 | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>africani        |
| <b>SunFire 15</b>                   |  |   |   | Confezione:<br>80x72x10<br>Diametro:<br>150        | 16   |  | 1200<br>750  | 182 |   |
| <b>SunFire 18</b>                   |  |   |   | Confezione:<br>75x75x14<br>Diametro:<br>180        | 24   |  | 2000<br>1000 |     |   |

|                                    |   |  |                                   |  |    |                                    |           |     |   |
|------------------------------------|---|--|-----------------------------------|--|----|------------------------------------|-----------|-----|---|
| <b>SunFire 14</b>                  |    | SunFire Solutions (Sud Africa)<br><a href="http://www.africa.org/">http://www.africa.org/</a>                                      | -                                 | Confezione: 130x24x6<br>Diametro: 140  | -  | Da assemblare: dalle 3 alle 5 ore  | 600<br>-  | 182 | Privati cittadini, soprattutto africani |
| <b>Olympus Flower Solar Cooker</b> |   | Olympus Flower (Sud Africa)<br><a href="http://olympusflower.com/solarcookers.html">http://olympusflower.com/solarcookers.html</a> | Acciaio zincato<br>Alluminio      | Confezione: 92x58x15<br>Diametro: 100  | 14 | Da assemblare                      | 1000<br>- | 156 | Privati cittadini, soprattutto africani |
|                                    |   |  |                                   | Confezione: 103x74x15<br>Diametro: 120 | 18 |                                    | 1200<br>- | 196 |   |
|                                    |   |  |                                   | Confezione: 174x74x34<br>Diametro: 180 | 34 | Da assemblare e fissare al terreno | 1800<br>- | 473 |   |
| <b>Solar Cooker LD-150</b>         |  | Sunrise Eenergy Co., Ltd (Cina)<br><a href="http://www.alibaba.com/">http://www.alibaba.com/</a>                                   | Acciaio inossidabile<br>Alluminio | Confezione: 85x75x10<br>Diametro: 180  | 21 | Da assemblare                      | 1800<br>- | 25  | Privati cittadini                       |

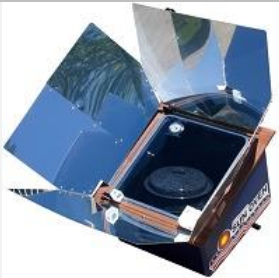

|                           |   |   |                                    |  |      |                  |          |       |   |
|---------------------------|---|---|------------------------------------|--|------|------------------|----------|-------|---|
| <b>Blazing Tube Solar</b> |    | Blazing Tube Solar (USA)<br><a href="http://blazingtubesolar.com/index.html">http://blazingtubesolar.com/index.html</a>   | Acciaio<br>Alluminio<br>Vetro      | Ingombro al suolo:<br>246x134  | -    | Da<br>assemblare | -<br>-   | 100   | Privati<br>cittadini e<br>campi<br>profughi<br>africani |
| <b>GoSun</b>              |    | GoSun (USA)<br><a href="http://www.gosunstove.com/products/gosun-sport">http://www.gosunstove.com/products/gosun-sport</a>  | Acciaio<br>inox                    | Aperto:<br>61x41x30<br>Chiuso:<br>61x20x13   | 3.18 | Assemblato       | -<br>290 | 279   | Privati<br>cittadini                                    |
| <b>SolSource</b>          |   | OneEarthDesigns (USA)<br><a href="https://www.oneearthdesigns.com/solsource/design/">https://www.oneearthdesigns.com/solsource/design/</a>  | Acciaio al<br>carbonio<br>Plastica | Confezione:<br>74x84x31<br>Ingombro al<br>suolo:<br>150x120x84<br>Diametro:<br>130 | 18.5 | Da<br>assemblare | -<br>-   | 549   | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>americani       |
| <b>Solar Flare</b>        |  | Solar Zenith (USA)<br><a href="http://mysolarcooker.com/show/solar-flare-single-parabolic-solar-cooker">http://mysolarcooker.com/show/solar-flare-single-parabolic-solar-cooker</a> | Plastica                           | Ingombro:<br>53x22x25  | 2.27 | Da<br>assemblare | -<br>-   | 69.99 | Privati<br>cittadini                                    |

|                       |  |  |                      |  |    |                  |              |           |  |
|-----------------------|--|--|----------------------|--|----|------------------|--------------|-----------|--|
| <b>Rudra SK-14</b>    |   | Rudra Solar Energy (India)<br><a href="http://www.rudrasolarenergy.com/product.html">http://www.rudrasolarenergy.com/product.html</a>                                    | Acciaio<br>Alluminio | Diametro:<br>140   | -  | Da<br>assemblare | -<br>-       | 130       | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>asiatici                             |
| <b>SuniCook</b>       |   | Sol Suffit (Belgio)<br><a href="http://www.sunicook.com/index.html">http://www.sunicook.com/index.html</a>   | Alluminio            | Confezione:<br>120x50x15<br>Diametro:<br>120                             | 10 | Da<br>assemblare | -<br>250     | Variabile | Campi<br>profughi e<br>terzo<br>mondo  |
| <b>Solario Cooker</b> |  | FOCALIS (Francia)<br><a href="http://www.focalis.net/solario-cooker/11-four-solaire-solario.html">http://www.focalis.net/solario-cooker/11-four-solaire-solario.html</a> | Acciaio<br>Alluminio | Confezione:<br>92x14x100<br>Diametro:<br>180<br>Ingombro:<br>180x110x140 | 25 | Da<br>assemblare | 1200<br>1000 | 559       | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>europei                              |
| <b>SK11</b>           |  | EG-Solar (Germania)<br><a href="http://www.eg-solar.de/english/products/products.htm">http://www.eg-solar.de/english/products/products.htm</a>                           | Alluminio            | Confezione:<br>124x67x8<br>Diametro:<br>110                              | 16 | Da<br>assemblare | 450<br>-     | 372       | Privati<br>cittadini<br>europei e<br>terzo<br>mondo a<br>prezzo<br>agevolato |
| <b>SK14</b>           |  |  |                      | Confezione:<br>117x42x7<br>Diametro:<br>140                              | 18 |                  | 700<br>-     | 451       |  |

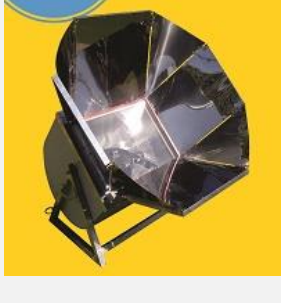


|   |   |   |                                    |  |   |   |          |      |  |
|---|---|---|------------------------------------|--|---|---|----------|------|--|
| <b>SK700</b>  |    |   |                                    | Confezione:<br>98x59x8<br>Diametro: 70 | - |   | 200<br>- | 225  |  |
| <b>SK350</b>  |   |   |                                    | Diametro:35                            | - |   | 50<br>-  | 112  |  |
| <b>2m<sup>2</sup><br/>Scheffler<br/>Reflector</b>   |    | Simply Solar<br>(Germania)<br><a href="http://www.simply-solar.de/index.php/products">http://www.simply-solar.de/index.php/products</a> | Alluminio                          | Superficie:<br>2m <sup>2</sup>         | - | Da<br>assemblare<br>Possibile<br>integrazione<br>e con un<br>edificio | -<br>-   | 2261 | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>africani |
| <b>2.7m<sup>2</sup><br/>Scheffler<br/>Reflector</b> |   |   |                                    | Superficie:<br>2.7m <sup>2</sup>       | - |   | -<br>-   | -    |  |
| <b>10m<sup>2</sup><br/>Scheffler<br/>Reflector</b>  |   |   |                                    | Superficie:<br>10m <sup>2</sup>        | - | Da<br>assemblare<br>in sito con<br>supervision<br>e tecnica           | -<br>-   | -    |  |
| <b>60m<sup>2</sup><br/>Scheffler<br/>Reflector</b>  |   |   |                                    | Superficie:<br>60m <sup>2</sup>        | - |   | -<br>-   | -    |  |
| <b>BIOGRI</b>                                       |  | <a href="http://www.biogri.com/specifiche.php">http://www.biogri.com/specifiche.php</a>   | Alluminio<br>anodizzato<br>Acciaio | -                                      | - | Da<br>assemblare  | -<br>240 | 158  | Privati<br>cittadini<br>europei                  |





|                          |   |  |           |   |    |                  |            |     |                                 |
|--------------------------|---|--|-----------|---|----|------------------|------------|-----|---------------------------------|
| <b>Ico-Sun 2<br/>150</b> |  | Generador-<br>Electrico.com<br>(Spagna)<br><a href="https://generador-electrico.com/tienda/en/solar-cooking-devices/687-icosun-2-parabolic-solar-oven.html">https://generador-<br/> electrico.com/tienda/en/solar-cooking-devices/687-icosun-2-parabolic-solar-oven.html</a> | Alluminio | Confezione:<br>75x90x15<br>Diametro:<br>150 | 9  | Da<br>assemblare | 650<br>260 | 100 | Privati<br>cittadini<br>europei |
| <b>Ico-Sun 2<br/>180</b> |   |  |           | Confezione:<br>75x90x15<br>Diametro:<br>180 | 15 |                  | 850<br>260 | 118 |                                 |

## Forni a scatola


| Nome Modello                   | Foto   | Azienda produttrice e riferimento web   | Materiale                      | Dimensioni (cm) | Peso (kg) | Montaggio     | Temperatura massima (°C) | Prezzo (\$) | Località e target di clientela            |
|--------------------------------|--|---|--------------------------------|-----------------|-----------|---------------|--------------------------|-------------|---|
| All American Sun Oven          |   | Sun Ovens International (USA)<br><a href="http://sunoven.com/product/global-sun-oven/">http://sunoven.com/product/global-sun-oven/</a>  | Alluminio<br>Plastica<br>Vetro | 48x48x28        | 9.5       | Assemblato    | -                        | 349         | Privati cittadini americani, Emergenze    |
| All Season Solar Cooker (ASSC) |  | All Season Solar Cooker (USA)<br><a href="http://www.allseasonsolarcooker.com/index.html">http://www.allseasonsolarcooker.com/index.html</a><br><a href="http://www.amazon.com/All-Season-Solar-Cooker-Trivet/dp/B00CURWARM/ref=sr_1_1?ie=UTF8&amp;qid=1442307153&amp;sr=8-1&amp;keywords=all+season+solar+cooker">http://www.amazon.com/All-Season-Solar-Cooker-Trivet/dp/B00CURWARM/ref=sr_1_1?ie=UTF8&amp;qid=1442307153&amp;sr=8-1&amp;keywords=all+season+solar+cooker</a> | Polietilene<br>Alluminio       | 60x60x60        | 1.15      | Da assemblare | 90                       | 149         | Privati cittadini americani e terzo mondo |





|                            |  |  |                    |   |   |            |     |     |   |
|----------------------------|--|--|--------------------|---|---|------------|-----|-----|---|
| <b>Catassol</b>            |   | Pleno Sol (Brasile)<br><a href="http://plenosol.com/fornos-solares-2/catassol-forno-solar-de-alta-performance/">http://plenosol.com/fornos-solares-2/catassol-forno-solar-de-alta-performance/</a>   | Alluminio<br>Vetro | - | - | Assemblato | 200 | 375 | Privati cittadini, soprattutto sudamericani |
| <b>Catassol Colossal</b>   |   | Pleno Sol (Brasile)<br><a href="http://plenosol.com/fornos-solares-2/catassol-colossal-forno-solar-de-alta-performance-e-grande-capacidade/">http://plenosol.com/fornos-solares-2/catassol-colossal-forno-solar-de-alta-performance-e-grande-capacidade/</a> | Alluminio<br>Vetro | - | - | Assemblato | -   | 516 | Privati cittadini, soprattutto sudamericani |
| <b>Catassol Compacto +</b> |  | Pleno Sol (Brasile)<br><a href="http://plenosol.com/fornos-solares-2/catassol-compacto-forno-solar-portatil-de-alta-performance/">http://plenosol.com/fornos-solares-2/catassol-compacto-forno-solar-portatil-de-alta-performance/</a>                       | Alluminio<br>Vetro | - | - | Assemblato | 200 | 257 | Privati cittadini, soprattutto sudamericani |


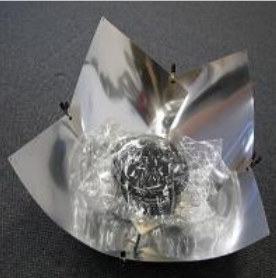

|                               |   |   |  |   |      |               |     |     |  |
|-------------------------------|---|---|--|---|------|---------------|-----|-----|--|
| <b>IcoSUN3</b>                |    | Generator-<br>Electrico.com<br>(Spagna)<br><a href="http://www.generator-electrico.com/">http://www.generator-electrico.com/</a>  | Polipropilene<br>Legno<br>Fibra di vetro | 50x50x30                                      | 9    | Assemblato    | -   | 183 | Privati cittadini, soprattutto europei |
| <b>Kyoto Box</b>              |    | Kyoto Energy<br>(Kenya)<br><a href="http://kyoto-energy.com/kyoto-box.html">http://kyoto-energy.com/kyoto-box.html</a>  | Polipropilene<br>Vetro<br>Alluminio      | -   | -    | Da assemblare | -   | 17  | Campi profughi africani                |
| <b>Rudra Solar Box Cooker</b> |   | Rudra Solar Energy (India)<br><a href="http://rudrasol arcooker.blogspot.it/p/rudra-solar-box-cooker.html">http://rudrasol arcooker.blogspot.it/p/rudra-solar-box-cooker.html</a> | Alluminio<br>Vetro                       | Confezione:<br>52x52x25<br>Forno:<br>50x50x17 | 13.5 | Assemblato    | 140 | 45  | Privati cittadini indiani              |
| <b>Sola Kooka</b>             |  | Sola Kooka's Ltd (Australia)<br><a href="http://solakookas.com.au/">http://solakookas.com.au/</a>   | Legno<br>Vetro                           | -   | -    | Assemblato    | -   | 945 | Privati cittadini australiani          |

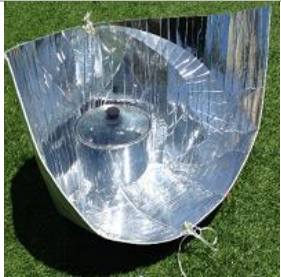



|                              |   |   |  |          |    |            |     |     |   |
|------------------------------|---|---|--|----------|----|------------|-----|-----|---|
| <b>Solar Oven<br/>PSO-10</b> |    | Qingdao<br>Lingding New<br>Energy Co.,<br>Ltd (Cina)<br><a href="http://www.topntm.com/">http://www.topntm.com/</a> | Alluminio<br>anodizzato<br>Plastica<br>Vetro | 48x48x28 | -  | Assemblato | 232 | -   | Privati<br>cittadini<br>asiatici                |
| <b>Solar Oven<br/>PSO-20</b> |    | Qingdao<br>Lingding New<br>Energy Co.,<br>Ltd (Cina)<br><a href="http://www.topntm.com/">http://www.topntm.com/</a> | Alluminio<br>anodizzato<br>Plastica<br>Vetro | 48x48x28 | -  | Assemblato | 232 | -   | Privati<br>cittadini<br>asiatici                |
| <b>Solar Oven<br/>PSO-30</b> |   | Qingdao<br>Lingding New<br>Energy Co.,<br>Ltd (Cina)<br><a href="http://www.topntm.com/">http://www.topntm.com/</a> | Alluminio<br>anodizzato<br>Plastica<br>Vetro | 48x48x28 | -  | Assemblato | 232 | -   | Privati<br>cittadini<br>asiatici                |
| <b>Solarofen<br/>Familia</b> |  | ULOG<br>Freiburg<br>(Germania)<br><a href="http://www.solarfood.de/">http://www.solarfood.de/</a>                   | Legno<br>Alluminio<br>Vetro                  | 75x40x45 | 14 | Assemblato | -   | 361 | Privati<br>cittadini,<br>soprattutto<br>europei |

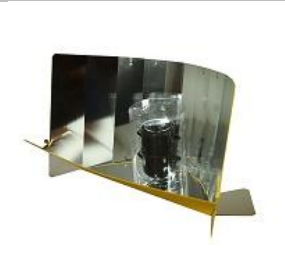
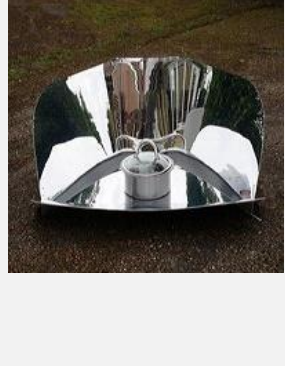

|                                  |   |   |                              |  |      |            |   |        |  |
|----------------------------------|---|---|------------------------------|--|------|------------|---|--------|--|
| <b>Solarofen Standard II</b>     |    | ULOG Freiburg (Germania)<br><a href="http://www.solarfood.de/">http://www.solarfood.de/</a>   | Legno<br>Alluminio<br>Vetro  | 50x40x45   | 11   | Assemblato | - | 316    | Privati cittadini, soprattutto europei |
| <b>Solavore Sport Solar Oven</b> |    | Solavore (USA)<br><a href="http://www.solavore.com/show/solavoresport-solar-oven">http://www.solavore.com/show/solavoresport-solar-oven</a> | Plastica<br>Metallo<br>Vetro | 68x43x30   | 9    | Assemblato | - | 229.50 | Privati cittadini americani            |
| <b>SunCook Premium</b>           |   | SunOK (Portogallo)<br><a href="http://www.sunok.eu/home/products/sun-cook">http://www.sunok.eu/home/products/sun-cook</a>                   | Plastica<br>Vetro            | Confezione: 37x69x65<br>Dimensione aperto: 56x56x80<br>Dimensione chiuso: 56x56x29 | 12.9 | Assemblato | - | 394    | Privati cittadini, soprattutto europei |
| <b>SunCook Tropical</b>          |  | SunOK (Portogallo)<br><a href="http://www.sunok.eu/home/products/sun-cook">http://www.sunok.eu/home/products/sun-cook</a>                   | Plastica<br>Vetro            | Confezione: 37x69x65<br>Dimensione aperto: 56x56x80<br>Dimensione chiuso: 56x56x29 | 11.8 | Assemblato | - | 338    | Privati cittadini, soprattutto europei |

|                          |   |  |                                |                            |     |            |     |    |  |
|--------------------------|---|--|--------------------------------|----------------------------|-----|------------|-----|----|--|
| <b>SunStove</b>          |  | Sunstove Organization<br>(Sud Africa)<br><a href="http://www.sustainable.co.za/sunstove-sunstove-2000-solar-oven-solar-cookers.html">http://www.sustainable.co.za/sunstove-sunstove-2000-solar-oven-solar-cookers.html</a> | Plastica<br>Vetro<br>Alluminio | 78x36x58                   | 4.3 | Assemblato | 115 | 57 | Privati cittadini, soprattutto africani            |
| <b>Villager Sun Oven</b> |  | Sun Ovens International<br>(USA)<br><a href="http://sunoven.com/around-the-world/sunovens/villagers-sun-ovens/">http://sunoven.com/around-the-world/sunovens/villagers-sun-ovens/</a>                                      | Acciaio<br>Alluminio<br>Vetro  | Altezza quando aperto: 287 | 444 | Assemblato | 260 | -  | Situazioni di emergenza, grandi gruppi, rifugiati. |




## Forni a pannelli




| Nome Modello                   | Foto  | Azienda produttrice e riferimento web   | Materiale                           | Dimensioni (cm)                                | Peso (kg) | Montaggio | Temperatura massima (°C) | Prezzo (\$)     | Località e target di clientela         |
|--------------------------------|---|---|-------------------------------------|--|-----------|-----------|--------------------------|-----------------|--|
| <b>CooKit</b>                  |    | Solar Cooker International (USA)<br><a href="http://shop.solarcookers.org/?pn=CooKit&amp;cn=Cookers&amp;p=621&amp;c=27">http://shop.solarcookers.org/?pn=CooKit&amp;cn=Cookers&amp;p=621&amp;c=27</a> | Alluminio<br>Carta                  | Chiuso:<br>33x33x5                             | 0.5       | Da aprire | 116                      | 39 (ai privati) | Campi profughi, terzo mondo            |
| <b>Copenhagen Solar Cooker</b> |   | Sharon Clausson (USA)<br><a href="http://www.solarcookers.com/Solar%20Oven.html">http://www.solarcookers.com/Solar%20Oven.html</a>  | Vinile                              | Chiuso:<br>38x38x2.5                           | 0.6       | Da aprire | 175                      | 44              | Privati cittadini                      |
| <b>Easycook</b>                |  | IDCOOK (Francia)<br><a href="http://www.idcook.us/solar-cookers/79-solar-cooker-easycook.html?pi=6">http://www.idcook.us/solar-cookers/79-solar-cooker-easycook.html?pi=6</a>                         | Tessuto<br>Alluminio<br>Polietilene | Confezione:<br>34x32x8<br>Montato:<br>91x55x35 | 0.3       | Da aprire | 120                      | 69              | Privati cittadini, soprattutto europei |

|                            |   |  |                                |  |     |           |     |                    |   |
|----------------------------|---|--|--------------------------------|--|-----|-----------|-----|--------------------|---|
| <b>Haines Solar Cooker</b> |    | Haines Solar Cooker (USA)<br><a href="http://www.hainessolarcooker.com/">http://www.hainessolarcooker.com/</a>                       | Poliestere metallizzato<br>PET | Confezione cilindrica: 60x10<br>Riflettore: 60x120 | 0.5 | Da aprire | 180 | 64.95              | Privati cittadini statunitensi e terzo mondo                              |
| <b>Hot Pot</b>             |    | Prodotto da un'azienda privata in Messico, sviluppato e distribuito da varie NGO   | Alluminio                      | Chiuso: 36x36x2<br>Aperto: 76x61x36                | 2.7 | Da aprire | 120 | 124.95 (a privati) | Terzo mondo, campi profughi, ma anche privati cittadini di tutto il mondo |
| <b>Lightoven I</b>         |   | Hartmut Ehmler (Germania)<br><a href="http://www.lightoven.de/lightoven-i-en.html">http://www.lightoven.de/lightoven-i-en.html</a>   | Alluminio                      | 114x45x45  | 1.6 | Da aprire | -   | 202                | Privati cittadini, soprattutto europei                                    |
| <b>Lightoven II</b>        |  | Hartmut Ehmler (Germania)<br><a href="http://www.lightoven.de/lightoven-ii-en.html">http://www.lightoven.de/lightoven-ii-en.html</a> | Policarbonato                  | -  | 2.9 | Da aprire | -   | 303                | Privati cittadini, soprattutto europei                                    |

|   |  |  |               |   |   |           |   |     |  |
|---|--|--|---------------|---|---|-----------|---|-----|--|
| <b>Lightoven III</b>                    |   | Hartmut Ehmler (Germania)<br><a href="http://www.lightoven.de/lightoven-iii-en.html">http://www.lightoven.de/lightoven-iii-en.html</a>   | Policarbonato | - | 1 | Da aprire | - | 134 | Privati cittadini, soprattutto europei |
| <b>Rollins Standard Deluxe Cooker</b>   |   | Applied Green Technology (UK)<br><a href="http://appliedgreentechnology.com/solar-cookers/product-details.asp?SectionID=3&amp;AutoID=1">http://appliedgreentechnology.com/solar-cookers/product-details.asp?SectionID=3&amp;AutoID=1</a> | -             | - | - | -         | - | -   | Campi profughi e terzo mondo           |
| <b>Rollins Universal Economy Cooker</b> |  | Applied Green Technology (UK)<br><a href="http://appliedgreentechnology.com/solar-cookers/product-details.asp?SectionID=3&amp;AutoID=2">http://appliedgreentechnology.com/solar-cookers/product-details.asp?SectionID=3&amp;AutoID=2</a> | -             | - | - | -         | - | -   | Campi profughi e terzo mondo           |



|                        |  |  |               |          |      |           |   |    |  |
|------------------------|--|--|---------------|----------|------|-----------|---|----|--|
| <b>Solar Stove 1.0</b> |   | Solar Prepper (USA)<br><a href="http://www.solarprepper.com/shop/solar-stove-1/">http://www.solarprepper.com/shop/solar-stove-1/</a>           | -             | 89x89x50 | 0.03 | Da aprire | - | 35 | Privati cittadini                              |
| <b>Solar Stove 2.0</b> |   | Solar Prepper (USA)<br><a href="http://www.solarprepper.com/shop/solar-stove/">http://www.solarprepper.com/shop/solar-stove/</a>               | -             | -        | -    | Da aprire | - | 45 | Privati cittadini                              |
| <b>Sun2Cook</b>        |  | Sun2Steam (Australia)<br><a href="http://www.sun2steam.com.au/index.php/solar-cooker/">http://www.sun2steam.com.au/index.php/solar-cooker/</a> | Polipropilene | -        | -    | Da aprire | - | 18 | Campi profughi, terzo mondo, privati cittadini |

|                          |  |   |                                     |  |      |           |     |        |   |
|--------------------------|--|---|-------------------------------------|--|------|-----------|-----|--------|---|
| <b>SunFlair Mini</b>     |   | SunFlair (USA)<br><a href="http://sunflair.net/products/">http://sunflair.net/products/</a>   | Mylar<br>Poliestere<br>PVC          | Chiuso:<br>5x28x33                             | 0.06 | Da aprire | 140 | 79.99  | Campeggiatori,<br>soprattutto<br>statunitensi |
| <b>SunFlair Standard</b> |  |   |                                     | Chiuso:<br>5x39x48                             | 0.5  |           | 140 | 119.99 |   |
| <b>SunFlair Deluxe</b>   |  |   |                                     | Chiuso:<br>5.8x40x48                           | 0.5  |           | 140 | 199.99 |   |
| <b>Suncatcher</b>        |   | Richard Pocock (Sud Africa)<br><a href="http://www.africa.org/">http://www.africa.org/</a>  | Plastica<br>Alluminio               | Chiuso:<br>80x60x3<br>Aperto:<br>45x25x60      | -    | Da aprire | -   | 18     | Terzo mondo e<br>campi<br>profughi            |
| <b>Trotter Cooker</b>    |  | IDCOOK (Francia)<br><a href="http://www.idcook.us/solar-cookers/56-solar-cooker-trotter-cooker.html?pi=7">http://www.idcook.us/solar-cookers/56-solar-cooker-trotter-cooker.html?pi=7</a> | Tessuto<br>Alluminio<br>Polietilene | Confezione:<br>50x30x3<br>Montato:<br>90x50x50 | 0.9  | Da aprire | 120 | 129    | Privati cittadini,<br>soprattutto<br>europei  |

## 1.5 Utilizzo dei forni solari nei campi profughi

Negli ultimi anni, un contesto in cui si è rivelato fondamentale l'utilizzo della cucina solare è quello dei campi profughi, soprattutto nel continente Africano, dove a causa delle numerose guerre e conflitti tra i vari popoli, molte persone si ritrovano costrette a fuggire dai propri villaggi per rifugiarsi in stati limitrofi, dove il rischio di persecuzione è più basso. Nei campi profughi allestiti in varie zone dell'Africa e del medio oriente, si fondono numerosi progetti di solidarietà portati avanti da organizzazioni di tutto il mondo. Tra queste, sono presenti delle ONG che si occupano dell'implementazione della cucina solare nella vita dei residenti dei campi, in modo da far ottenere tutti quei benefici già analizzati nei capitoli precedenti.

La maggior parte di questi progetti sono finanziati da donazioni da parte di privati, e si occupano principalmente di fornire il materiale necessario alla produzione di semplici forni solari (spesso a pannelli), rifacendosi al design del CooKit, che è un forno solare prodotto e distribuito dalla Solar Cookers International (SCI) costituito solo da cartone e fogli d'alluminio. La SCI produce il CooKit e lo vende online ad un costo di 39\$, il ricavato serve per finanziare l'acquisto dei materiali che vengono distribuiti nelle zone disagiate, in modo che i residenti possano costruirlo autonomamente.

La distribuzione di questo forno consente a migliaia di famiglie di cucinare due pasti al giorno senza l'utilizzo di combustibile.

Uno studio condotto nel 2015 nei campi di Touloum e Iridimi (in Chad), ha rivelato un drastico declino dell'utilizzo del forno CooKit per diverse ragioni:

- Bassa resistenza del forno nel tempo
- Scarsa formazione dei nuovi utenti dei campi
- Necessità di nuovi sacchetti resistenti al calore per contenere la pentola, che vanno sostituiti ogni mese

Per poter garantire il massimo risparmio di combustibile, in molti campi dell'Africa Orientale e del Nepal, si è adottata la cosiddetta "cucina integrata" che consiste nell'utilizzare i forni solari quando la radiazione solare è sufficiente e stufe a legna a basso consumo quando non lo è. In tutti due i casi si utilizzano dei contenitori termici per migliorare l'efficienza di entrambi i metodi, poiché si possono introdurre i cibi già a temperature abbastanza alte sia nel forno solare che nella stufa.

In molti campi, i rifugiati (soprattutto le donne), sono costrette a percorrere anche 30 km al giorno per raccogliere legna da ardere, poiché al campo può non essere presente o non essere sufficiente, ma allontanarsi dal campo può comportare gravi rischi per le persone, e possono quindi crearsi situazioni di violenza tra i residenti.

L'adozione della cucina solare diminuisce drasticamente tutta questa serie di disagi, e le ragazze possono impiegare il tempo, prima dedicato alla raccolta di legna, in modo più intelligente, come il frequentare la scuola. Tutto ciò è anche emerso da uno studio del 2012 condotto dalla Jewish World Watch, che riferisce una diminuzione di violenza in molti campi del Chad e del Sudan.

Volgendo lo sguardo al futuro, le principali esigenze che si richiedono ai forni solari utilizzati in questi contesti, sono una maggiore durabilità e una maggiore capacità di accumulo termico, per ottenere una maggiore diffusione della cucina solare.

### **1.5.1 Modelli di forni solari più utilizzati nei campi profughi**

#### **AGE Solar Cooker**

Si tratta di un forno solare parabolico quadrato, prodotto dall'azienda indiana Tiny Tech Plants. La sua popolarità è dovuta alla sua praticità nell'uso e nel trasporto, poiché:

- Viene spedito in una scatola di dimensioni 127x35x9 cm
- Sono stipabili 600 forni in un container di 6 m
- Il suo peso è di 17 kg
- Il forno è assemblabile in 10 minuti, più 50 minuti per montare le lamine del riflettore
- Il riflettore è quadrato di dimensioni 1.2x1.2 m
- Il telaio di sostegno è costituito da tubi a sezione rettangolare di dimensioni 40x20 mm
- Il riflettore è costituito da fogli di alluminio anodizzato, quindi ha un'alta efficienza
- Si può cucinare per 8 – 10 persone in 40 minuti
- Può depurare l'acqua
- Nella confezione è compresa una guida all'uso in formato CD

#### **BS-M1 Solar Cooker**

È un forno solare parabolico sviluppato dall'azienda cinese Bigstone Energy Science & Technology Co., Ltd.

Il riflettore è circolare con un diametro di circa 1.5 m e il fuoco si trova a 76 cm dalla base della parabola.

La riflettore è costituito da sei pannelli in acciaio rigidi ricoperti da un adesivo vinilico che ne aumenta l'efficienza.

Il telaio consente l'inclinazione della parabola e lo spostamento del supporto della pentola. Per utilizzare questo forno non è necessaria un'apposita pentola (in genere di colore scuro), quindi non è compresa con il forno.

Il peso di questo forno è di 18.5 kg e l'azienda ne garantisce una vita di circa 10 anni.

#### **BS-M2 Solar Cooker**

È il modello successivo al BS-M1, che ne rappresenta la versione migliorata, quindi sempre prodotto dalla Bigstone Energy Science & Technology Co., Ltd.

Specifiche tecniche:

- Riflettore in acciaio al carbonio spesso 0.6 mm e 1.5 m di diametro
- Fuoco a 0.7 m dalla base della parabola
- Peso: 15 kg
- Potenza 1000 W
- Capacità del supporto di 25 kg di cibo
- Prezzo: 32 \$

## **CooKit**

È un forno a pannelli, sviluppato e prodotto da un team di ingegneri associati alla Solar Cookers International. È senza dubbio il forno più utilizzato nei campi profughi di tutto il mondo, per la sua praticità e semplicità d'installazione.

Il CooKit è costituito da cartone ricoperto d'alluminio, che riflette la radiazione solare su una apposita pentola nera inserita all'interno di un sacchetto di plastica resistente alle alte temperature. Questo forno si monta semplicemente aprendo le alette dei pannelli e posizionando la pentola sulla sua base, e in caso di vento, si posizionano delle pietre sulle porzioni esterne della base.

La Solar Cookers International propone online numerose guide sull'autocostruzione di questo forno, in modo da massimizzare la diffusione di esso in tutto il mondo.

I principali limiti di questo forno sono la sua durabilità nel tempo e la reperibilità dei sacchetti resistenti al calore.

Molte associazioni, hanno organizzato in molti campi profughi, dei laboratori per insegnare alle persone come costruire questo forno, e sull'utilizzazione di materie prime locali per migliorare o riparare il CooKit.

Il CooKit, misura da aperto 91x122 cm, ed è semplicemente richiudibile dopo l'utilizzo.

Viene proposto al pubblico al prezzo di 39 \$, ma ai campi profughi a 5 \$.

## **Diamond Solar Cooker**

Si tratta di un forno a pannelli molto semplice e pratico, costituito da pannelli pieghevoli, che una volta aperti si fissano con delle clip a molla. Il Diamond Solar Cooker è stato sviluppato da Andreas Fasoulides e Kyriakos Antoniou, che hanno poi organizzato un workshop chiamato Re-Newcy a Cipro sulla costruzione e montaggio di questo forno.

## **HotPot**

Un modello di forno, che rappresenta un'evoluzione del CooKit è l'HotPot.

Sempre pieghevole, ma molto più efficiente, l'HotPot è prodotto in Messico e sta riscontrando molto successo in Africa grazie alla sua velocità di cottura.

## **Kyoto Box**

Il Kyoto Box è un forno solare a scatola, prodotto dalla Kyoto Energy, in Kenya.

Il corpo del forno è in polipropilene con un vetro acrilico sul lato superiore. Anche questo forno è pieghevole, quindi per montarlo occorre solamente aprirlo seguendo le istruzioni stampate sulla parte esterna del forno.

Il forno è completamente bianco, e ha un coperchio superiore che funge da riflettore, anche se è abbastanza instabile in caso di vento.

## **Rollins Standard Deluxe Cooker**

Il Rollins standard Deluxe Cooker è un forno solare a pannelli, prodotto nel Regno Unito dalla Applied Green Technology.

Questo forno è molto simile al CooKit, come forma e funzionamento, ma ha il pannello posteriore curvo anziché piano.

Viene prodotto in grandi quantità, ed è distribuito soprattutto nei campi profughi.

## **Sun2Cook**

Il Sun2Cook è un forno a pannelli, progettato da Heinz-Joachim Muller per la sua azienda australiana Sun2Steam.

È costituito da un doppio strato di polipropilene, simile ad un cartone ondulato, e il forno si monta semplicemente aprendo i lati pieghevoli. È un forno facilmente replicabile, poiché basta tracciare sul materiale solamente sette linee rette. Inoltre non è necessario inserire la pentola in un sacchetto.

Le istruzioni per il montaggio sono stampate sul retro del pannello.

Uno degli svantaggi di questo forno è la sua instabilità in caso di vento.

## **1.5.2 Principali progetti d'implementazione della cucina solare nei campi profughi**

### **➤ Chad**

#### **Campo profughi di Farchana**

Dalla fine del 2011, l'organizzazione statunitense Jewish World Watch, ha avviato un progetto di cucina solare in questo campo profughi che ospita principalmente rifugiati sudanesi, in collaborazione con l'organizzazione inglese Cord. Il progetto consiste nel fornire il forno CookIt ai rifugiati del campo.

#### **Campo profughi di Gaga**

Questo campo ospita circa 20.000 rifugiati provenienti dal Darfur, in Sudan.

È attivo in questo campo, un progetto sviluppato dalla Household Solar Energy, che fornisce il forno solare a pannelli HotPot, e forma alcuni residenti del campo per l'utilizzo di questo forno.

Attualmente la Lutheran World Foundation ha stimato che sarebbero necessari altri 2.500 HotPot per coprire l'80% delle famiglie residenti.

#### **Campo profughi di Iridimi**

Sono 18.000 i rifugiati provenienti dal Darfur residenti in questo campo. È partito nel 2005 grazie alla fondazione olandese Kozon, il progetto che ha iniziato ad implementare la cucina solare in questo campo. Dal 2006 il progetto di sviluppo è passato alla Jewish World Watch che ha aperto dei laboratori di produzione di forni solari e formazione all'uso. Ora sono circa 14.000 i forni solari presenti in questo campo.

La zona su cui sorge il campo è priva di vegetazione, e le precipitazioni sono molto scarse (dai 7,5 ai 12,5 cm all'anno).

Gli alimenti disponibili sono principalmente: farina di mais, lenticchie, fagioli e piselli. Questi alimenti richiedono circa tre ore per la cottura tramite forno solare.

#### **Campo profughi di Kounoungou**

Si tratta di un piccolo campo profughi per l'accoglienza dei rifugiati provenienti dal Darfur. È partito solamente a settembre 2014 un progetto per portare la cucina solare in questo campo, da parte della Jewish World Watch.

### **Campo profughi di Mile**

Questo campo si trova a 20 miglia a nord dal campo di Kounoungou. Da settembre 2014 sono 21.000 i residenti del campo. È attualmente in fase di sviluppo da parte della Jewish World Watch un progetto per portare la cucina solare in questo campo.

### **Campo profughi di Oure Cassoni**

Il campo ospita circa 29.000 rifugiati, ed è iniziato nel 2008 un progetto per portare la cucina solare nel campo. Sono circa 8.000 i forni solari nel campo e sono stati organizzati dei laboratori per la produzione di forni solari e per la formazione di personale.

Quasi la totalità delle donne presenti sul campo è ora capace ad usare i forni solari.

### **Campo profughi di Touloum**

Il campo ospita oltre 24.000 rifugiati provenienti dal Darfur, soprattutto donne e bambini. Dopo i risultati positivi ottenuti nel campo di Iridimi, le associazioni: Kozon, Tchad Solaire, Jewish World Watch e Solar Cookers International hanno deciso di operare anche in questo campo per sviluppare l'uso della cucina solare.

Attualmente, circa 16.000 forni solari sono stati distribuiti ai residenti e 5.000 donne sono state formate per l'utilizzo di questi. Nel campo è presente soprattutto il modello Cookits.

## ➤ **Nepal**

### **Campo profughi di Beldangi**

Dal 1995, la Vajra Foundation Holland è impegnata a portare la cucina solare in Nepal.

Nel 2013 questo campo accoglie circa 85.000 persone formate per l'utilizzo di forni solari. Questi progetti sono finanziati dalla Dutch Lottery e dalla Stichting Vluchteling.

## ➤ **Sudan**

### **Campo profughi di El Serief**

Il campo di El Serief ospita circa 13.000 rifugiati appartenenti a circa 21 differenti gruppi etnici. Essendo un campo interno ad una zona soggetta a conflitti, l'attività delle associazioni di volontariato è maggiormente difficoltosa rispetto ai campi in Ciad.

In questo campo, è attualmente in fase di sviluppo un progetto per l'implementazione della cucina solare. Attualmente, sono ancora solo 10 le donne che hanno seguito dei corsi di formazione per l'utilizzo dei forni solari.

### **Campo profughi di Sakali**

Stephen e Sheila Harrigan, i coordinatori della Darfur Peace and Development Organization, hanno portato in questo campo profughi 275 forni chiamati Poly-Furnace, che producono personalmente. Sono forni a pannelli molto simili al CookKit.

## ➤ Uganda

### **Campo profughi di Orukiga**

Nella seconda metà del 2006, la Solar Connect Association ha distribuito 300 forni solari Cookit in varie zone rurali dell'Uganda, precisamente, nei villaggi di Kikokwa, Ruharo e nel campo profughi di Orukiga. Successivamente, grazie al sostegno della Solar Cooking Netherlands ha distribuito altri 2.000 forni nel campo.

L'attenzione ora si concentra nel reperire alluminio per la costruzione di ulteriori forni.

### **1.5.3 Organizzazioni non governative per la promozione della cucina solare**

Si riportano in questo paragrafo, le principali 135 organizzazioni non governative che si occupano della promozione della cucina solare nel mondo.

Queste associazioni operano direttamente sui territori interessati, soprattutto del terzo mondo e nelle zone colpite da calamità o soggette a stato di emergenza.

Le loro attività principali consistono nella raccolta di fondi, nel fornire le strumentazioni necessarie agli utenti finali per consentirgli di sfruttare a pieno le potenzialità di questa tecnologia, quindi dell'educazione e formazione di personale per cucinare, ma soprattutto per auto costruirsi i propri forni solari, sfruttando al meglio le materie prime del territorio.

Ovviamente, molte di queste organizzazioni, non si occupano solo ed esclusivamente della cucina solare come strumento di cottura, ma trattano anche dispositivi solari adibiti alla depurazione dell'acqua, pompe solari e pannelli fotovoltaici o più in generale si occupano della promozione delle energie rinnovabili.

Queste organizzazioni rappresentano un punto di congiunzione fondamentale tra le aziende produttrici (esaminate nel capitolo precedente), e le persone che possono trarre vantaggio dall'utilizzo dei forni solari, considerando che molte di esse non sono ancora oggi a conoscenza di questa tecnologia. Quindi alcune aziende, si appoggiano a queste associazioni per poter espandere il proprio marchio e investire nella ricerca volta alla produzione di forni solari sempre più semplici ed economici, e a volte, anche facilmente replicabili.



| <b>Nome NGO</b>   | <b>Sito Internet</b>  | <b>Nazione</b>     | <b>Zona Di Attività</b> |
|---|---|--------------------|-------------------------|
| ACCESO  | <a href="http://cocinasolarparabolica.blogspot.it/">http://cocinasolarparabolica.blogspot.it/</a> | Spagna             | Spagna                  |
| Adventist Development And Relief Agency Somalia               | <a href="http://www.adrasom.org/">http://www.adrasom.org/</a>                                     | Kenya              | Somalia                 |
| Adventures In Health, Education, And Agricultural Development | <a href="http://aheadinc.org/">http://aheadinc.org/</a>   | USA                | Gambia                  |
| AfriAfya  | <a href="http://www.afriafya.org/">http://www.afriafya.org/</a>                                   | Kenya              | Kenya                   |
| African King Foundation                                       |   | Ghana              | Ghana                   |
| African Millennium Foundation                                 | <a href="http://1amf.org/">http://1amf.org/</a>   | USA                | Mozambico               |
| Aftarkeia Network   | <a href="http://www.aftarkeia.org/">http://www.aftarkeia.org/</a>                                 | Grecia             | Grecia                  |
| Alliance 3000   | <a href="http://www.alliance3000.org/">http://www.alliance3000.org/</a>                           | Francia            | Burkina Faso            |
| Altener Energy  | <a href="http://www.altenersolar.co.ke/">http://www.altenersolar.co.ke/</a>                       | Kenya              | Kenya                   |
| APROTEC   | <a href="http://www.aprotec.org/">http://www.aprotec.org/</a>                                     | Colombia           | Colombia                |
| Aridité Prospère  | <a href="http://www.ariditeprospere.org/">http://www.ariditeprospere.org/</a>                     | Niger              | Niger                   |
| Association Boara   |   | Madagascar         | Madagascar              |
| Association For Renewable Energy Cooking Appliances           | <a href="http://www.afreca.org/">http://www.afreca.org/</a>                                       | Sud Africa         | Sud Africa              |
| Association For The Reduction Of Carbon Emission              |   | Nigeria            | Nigeria                 |
| Association Pour Le Développement De l'Energie Solaire        | <a href="http://www.adesolaire.org/">http://www.adesolaire.org/</a>                               | Svizzera           | Madagascar              |
| Atouts Soleil   | <a href="http://tablesol.free.fr/">http://tablesol.free.fr/</a>                                   | Francia            | Burkina Faso            |
| Barli Development Institute For Rural Women                   | <a href="http://www.barli.org/">http://www.barli.org/</a>   | India              | India                   |
| Blik Op Afrika  | <a href="http://www.blikopafrika.be/">http://www.blikopafrika.be/</a>                             | Belgio             | Congo                   |
| Bolivia Inti-Sud Soleil                                       | <a href="http://www.boliviainti-sudsoleil.org/">http://www.boliviainti-sudsoleil.org/</a>         | Francia            | Bolivia                 |
| Brahma Kumaris  | <a href="http://www.bkwsu.com/">http://www.bkwsu.com/</a>   | USA                | India                   |
| Canelo De Nos   | <a href="http://www.elcanelo.cl/">http://www.elcanelo.cl/</a>                                     | Cile               | Cile                    |
| CECAM Bolivia   |   | Bolivia            | Bolivia                 |
| CEDESOL Foundation  | <a href="http://www.cedesol.org/">http://www.cedesol.org/</a>                                     | Bolivia - Paraguay | Bolivia                 |
| Climate Healers   | <a href="http://climatehealers.org/">http://climatehealers.org/</a>                               | USA                | India                   |
| Compassion Care Foundation                                    | <a href="http://www.compassion-care.org/">http://www.compassion-care.org/</a>                     | USA                | USA                     |
| Cord  | <a href="http://www.cord.org.uk/">http://www.cord.org.uk/</a>                                     | Inghilterra        | Chad                    |
| Cucinare Con Il Sole  | <a href="http://www.cucinareconilsole.com/">http://www.cucinareconilsole.com/</a>                 | Italia             | Senegal                 |
| Darfur Peace And Development Organization                     | <a href="http://www.darfurpeacefund.org/">http://www.darfurpeacefund.org/</a>                     | USA                | Sudan                   |
| Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit       | <a href="http://www.giz.de/">http://www.giz.de/</a>   | Germania           | Afghanistan             |

|  |  |                       |                        |
|--|--|-----------------------|------------------------|
| Döbra Solar Development Project                      | <a href="http://www.solarcooker-namibia.org/">http://www.solarcooker-namibia.org/</a>  | Namibia               | Namibia                |
| Earth Passengers                                     | <a href="http://earthpassengers.org/">http://earthpassengers.org/</a>  | Taiwan                | Taiwan                 |
| Eastern Oregon Renewable Energies Association        | <a href="http://www.solwest.org/">http://www.solwest.org/</a>  | USA                   | USA                    |
| Eco-Green Technologies Ltd                           |  | Nigeria               | Nigeria                |
| Eden Foundation                                      | <a href="http://edenfoundation.org/">http://edenfoundation.org/</a>  | Nuova Zelanda         | Papua Nuova Guinea     |
| EG-Solar   | <a href="http://www.eg-solar.de/">http://www.eg-solar.de/</a>  | Germania              | Medio Oriente e Africa |
| El Fuego Del Sol                                     | <a href="http://forceofthesun.com/">http://forceofthesun.com/</a><br><a href="http://www.elfuegodelsol.com/">http://www.elfuegodelsol.com/</a> | Repubblica Dominicana | Haiti                  |
| Energía Libre  | <a href="http://www.cocinasolar.net/">http://www.cocinasolar.net/</a>  | Messico               | Messico                |
| ET-Solar Tech  |  | Etiopia               | Etiopia                |
| ExSol  | <a href="http://www.cuisinesolaire.com/exsol">http://www.cuisinesolaire.com/exsol</a>  | Svizzera              | Svizzera               |
| Florida Solar Energy Center                          | <a href="http://www.fsec.ucf.edu/">http://www.fsec.ucf.edu/</a>  | USA                   | Africa                 |
| Fondo Mexicano Para La Conservación De La Naturaleza | <a href="http://www.fmcn.org/">http://www.fmcn.org/</a><br><a href="http://www.ollasolar.com.mx/">http://www.ollasolar.com.mx/</a>             | Messico               | Messico                |
| Foundation For Sustainable Technologies              | <a href="http://www.fost-nepal.org/">http://www.fost-nepal.org/</a>  | Nepal                 | Nepal                  |
| Friends Of Haiti Organization                        | <a href="http://friendsofhaiti.org/">http://friendsofhaiti.org/</a>  | USA                   | Haiti                  |
| Friends Of The Old                                   |  | Kenya                 | Kenya                  |
| Fundación EcoAndina                                  | <a href="http://www.ecoandina.org/">http://www.ecoandina.org/</a>  | Argentina             | Argentina              |
| Fundación Inti Uma Ecuador                           | <a href="http://www.ucuenca.edu.ec/">http://www.ucuenca.edu.ec/</a>  | Ecuador               | Ecuador                |
| Garden Of God Naturestead                            |  | Nigeria               | Nigeria                |
| Girl Guides Association Of Malaysia                  | <a href="http://www.panduputeri.org.my/">http://www.panduputeri.org.my/</a>  | Malesia               | Malesia                |
| Girl Guides Association Of Zimbabwe                  |  | Zimbabwe              | Zimbabwe               |
| Global Hope Network International                    | <a href="http://globalhopenetwork.org/">http://globalhopenetwork.org/</a>  | Svizzera              | Afghanistan            |
| GloboSol   | <a href="http://www.globosol.ch/">http://www.globosol.ch/</a>  | Svizzera              | Svizzera               |
| GoSol.org  | <a href="http://www.gosol.org/">http://www.gosol.org/</a>  | Finlandia             | Globale                |
| Greenpop - Solar For Trees                           | <a href="http://www.greenpop.org/">http://www.greenpop.org/</a>  | Sud Africa            | Zambia                 |
| Grupo De Energías Renovables Aplicadas               | <a href="http://www.fim.uo.edu.cu/gera">http://www.fim.uo.edu.cu/gera</a>  | Cuba                  | Cuba                   |
| Grupo Fenix  | <a href="http://www.grupofenix.org/">http://www.grupofenix.org/</a>  | Nicaragua             | Nicaragua              |
| Haiti Solar Oven Partners                            | <a href="http://www.haitisolarovens.org/">http://www.haitisolarovens.org/</a>  | USA                   | Haiti                  |
| Haryana Renewable Energy Development Agency          | <a href="http://www.hareda.gov.in/">http://www.hareda.gov.in/</a>  | India                 | India                  |
| Heifer China   | <a href="http://www.heifer.org/">http://www.heifer.org/</a>  | USA                   | Cina                   |

|  |  |                 |                  |
|--|--|-----------------|------------------|
| Horn Of Africa Regional Environment Centre And Network                     | <a href="http://www.hoarec.org/">http://www.hoarec.org/</a>  | Corno D' Africa | Corno D' Africa  |
| Horn Relief  |  | Kenya           | Somalia          |
| Inner Wheel Club Of Pune Middtown  |  | India           | India            |
| International Center For Networking, Ecology, Education And Re-Integration | <a href="http://www.pciaonline.org/node/674">http://www.pciaonline.org/node/674</a>  | India           | India            |
| International Organization For Migration                                   | <a href="http://www.iom.int/">http://www.iom.int/</a>  | Sudan           | Sudan            |
| International Solar Energy Society   | <a href="http://www.ises.org/">http://www.ises.org/</a>  | Globale         | Globale          |
| Inti Illimani  | <a href="http://asointiillimani.wordpress.com/">http://asointiillimani.wordpress.com/</a>  | Bolivia         | Bolivia          |
| Japan Solar Cooking Association  |  | Giappone        | Giappone – Kenya |
| Japan Solar Energy Education Association                                   | <a href="http://solarcooker.blog10.fc2.com/">http://solarcooker.blog10.fc2.com/</a>  | Giappone        | Giappone – Kenya |
| Jewish World Watch   | <a href="http://www.jewishworldwatch.org/">http://www.jewishworldwatch.org/</a><br><a href="http://www.solarcookerproject.org/">http://www.solarcookerproject.org/</a> | USA             | Africa           |
| Jordanian Renewable Energy Society   |  | Giordania       | Giordania        |
| Kagera Development And Credit Revolving Fund                               |  | Tanzania        | Tanzania         |
| Keshav Srushti   | <a href="http://www.keshavsrushti.com/">http://www.keshavsrushti.com/</a>  | India           | India            |
| KoZon Foundation   | <a href="http://kozon.org/">http://kozon.org/</a>  | Paesi Bassi     | Centro Africa    |
| Kyoto Twist Solar Cooking Society  | <a href="http://www.kyototwist.org/">http://www.kyototwist.org/</a>  | Canada          | Africa           |
| Las Mujeres Solares De Totogalpa   | <a href="http://www.mujeressolares.org/english">http://www.mujeressolares.org/english</a>  | Nicaragua       | Nicaragua        |
| Least Of These International   | <a href="http://www.lotint.org/">http://www.lotint.org/</a>  | USA             | Tanzania         |
| Lejofonds  | <a href="http://lejofonds.nl/">http://lejofonds.nl/</a>  | Paesi Bassi     | Uganda           |
| Lernen - Helfen - Leben e.V.   | <a href="http://www.l-h-l.org/">http://www.l-h-l.org/</a>  | Germania        | Ghana            |
| Light Gives Heat   | <a href="http://www.lightgivesheat.org/">http://www.lightgivesheat.org/</a>  | USA             | Uganda           |
| Malaviya Solar Energy Consultancy  | <a href="http://www.malaviya.in/">http://www.malaviya.in/</a>  | India           | India            |
| MéxicoSOL  | <a href="http://mexicosol.over-blog.com/">http://mexicosol.over-blog.com/</a>  | Messico         | Messico          |
| Mixtec Children's Project  |  | Messico         | Messico          |
| Morpho Solar   | <a href="http://morphosolar.com/">http://morphosolar.com/</a>  | Norvegia        | Africa           |
| Mozambique Association For Urban Development                               |  | Mozambico       | Mozambico        |
| MWAYEO KENYA   |  | Kenya           | Kenya            |
| Naandi Foundation  | <a href="http://www.naandi.org/">http://www.naandi.org/</a>  | India           | India            |

|  |   |                       |                                |
|--|---|-----------------------|--------------------------------|
| Namib Desert Environmental Education Trust                     | <a href="http://www.nadeet.org/">http://www.nadeet.org/</a>   | Namibia               | Namibia                        |
| NAREWAMA   | <a href="http://www.mueller-solartechnik.com/narewama/">http://www.mueller-solartechnik.com/narewama/</a> | Kenya                 | Kenya                          |
| Nevada Solar Cookers Association                               |   | USA                   | USA                            |
| O'paybo  | <a href="http://www.opaybo.org/">http://www.opaybo.org/</a>   | Argentina             | Argentina                      |
| Organisation For Rural Education Simplicity                    | <a href="http://www.geocities.ws/orescameroon/">http://www.geocities.ws/orescameroon/</a>                 | Camerun               | Camerun                        |
| Pakistan Council For Renewable Energy Technologies             | <a href="http://www.pcret.gov.pk/">http://www.pcret.gov.pk/</a>   | Pakistan              | Pakistan                       |
| Partnership For Integrated Sustainable Development Association |   | Paesi Bassi - Etiopia | Etopia                         |
| Planters Energy Network  | <a href="http://www.pen.solar/">http://www.pen.solar/</a>   | India                 | India                          |
| Power From The Sun   | <a href="http://powerfromthesun.us/">http://powerfromthesun.us/</a>                                       | USA                   | Haiti                          |
| Project Gettysburg-León  | <a href="http://www.gettysburg-leon.org/">http://www.gettysburg-leon.org/</a>                             | Nicaragua             | Nicaragua                      |
| PROMOSOL   | <a href="http://www.promosol.letchad.org/">http://www.promosol.letchad.org/</a>                           | Chad                  | Chad                           |
| Promoters And Researchers In Non-Conventional Energy           | <a href="http://www.princeindia.org/">http://www.princeindia.org/</a>                                     | India                 | India                          |
| Rescue Mission Gambia  |   | Gambia                | Gambia                         |
| Royal Botanic Garden Of Jordan                                 | <a href="http://royalbotanicgarden.org/">http://royalbotanicgarden.org/</a>                               | Giordania             | Giordania                      |
| Samaritan's Purse  | <a href="http://www.samaritanspurse.org/">http://www.samaritanspurse.org/</a>                             | Kenya                 | Kenya                          |
| Sentinelles Dell'Energia                                       | <a href="http://www.grupposelene.net/">http://www.grupposelene.net/</a>                                   | Italia                | Italia                         |
| Shahjee Solar International                                    | <a href="http://shahjeesolar.com/">http://shahjeesolar.com/</a>   | USA                   | Globale                        |
| Sizzling Solar Systems   | <a href="http://www.sizzlingsolarsystems.com/">http://www.sizzlingsolarsystems.com/</a>                   | Australia             | Australia                      |
| Sol De Vida  | <a href="http://www.soldevida.org/">http://www.soldevida.org/</a>   | Costa Rica            | Costa Rica                     |
| Sol Solidari   | <a href="http://www.solsolidari.org/">http://www.solsolidari.org/</a>                                     | Spagna                | Africa                         |
| Sol Suffit   | <a href="http://www.solarcooking.be/">http://www.solarcooking.be/</a>                                     | Belgio                | Africa – Europa                |
| Solar Circle   | <a href="http://www.solar-circle.org/">http://www.solar-circle.org/</a>                                   | USA                   | Tanzania                       |
| Solar Clutch   | <a href="http://solarclutch.com/">http://solarclutch.com/</a>   | Globale               | Africa                         |
| Solar Connect Association                                      | <a href="http://www.solarconnectassociation.com/">http://www.solarconnectassociation.com/</a>             | Uganda                | Africa                         |
| Solar Cooker Workgroup Sliedrecht NL                           | <a href="http://www.solarcooker.nl/">http://www.solarcooker.nl/</a>                                       | Paesi Bassi           | Paesi Bassi – Africa - Vietnam |
| Solar Cookers International                                    | <a href="http://solarcookers.org/">http://solarcookers.org/</a>   | Globale               | Globale                        |
| Solar Cooking Netherlands                                      | <a href="http://www.solarcooking.nl/">http://www.solarcooking.nl/</a>                                     | Paesi Bassi           | Africa                         |
| Solar Energy Enterprises Company                               |   | Sudan                 | Sudan                          |
| Solar Freedom International                                    | <a href="http://www.solarfreedominternational.com/">http://www.solarfreedominternational.com/</a>         | Canada                | Canada                         |
| Solar Household Energy   | <a href="http://www.she-inc.org/">http://www.she-inc.org/</a>   | USA                   | Globale                        |
| Solar Oven Society   | <a href="http://www.solarovens.org/">http://www.solarovens.org/</a>                                       | USA                   | Globale                        |
| SolarAfrica.network  | <a href="http://solarafricanetwork.wordpress.com/">http://solarafricanetwork.wordpress.com/</a>           | Tanzania              | Tanzania                       |
| Solar-Global   | <a href="http://www.solarglobal-ev.de/">http://www.solarglobal-ev.de/</a>                                 | Germania              | Germania                       |

|                                       |   |             |              |
|---------------------------------------|---|-------------|--------------|
| Solvatten                             | <a href="http://www.solvatten.se/">http://www.solvatten.se/</a>                   | Svezia      | Globale      |
| Sonnenenergie Für Westafrika          | <a href="http://www.solar-afrika.de/">http://www.solar-afrika.de/</a>             | Germania    | Burkina Faso |
| Stichting Vluchteling                 | <a href="http://www.vluchteling.org/">http://www.vluchteling.org/</a>             | Paesi Bassi | Nepal        |
| Sun Cooking Australia                 | <a href="http://www.suncooking.com.au/">http://www.suncooking.com.au/</a>         | Australia   | Australia    |
| Sun Ovens International               | <a href="http://www.sunoven.com/">http://www.sunoven.com/</a>                     | USA         | Africa       |
| SunFire Solutions                     | <a href="http://www.sunfire.co.za/">http://www.sunfire.co.za/</a>                 | Sud Africa  | Africa       |
| SUN-LIFE                              | <a href="http://sunlifeafrica.org/">http://sunlifeafrica.org/</a>                 | Ghana       | Ghana        |
| Sunstove Organization                 | <a href="http://www.sungravity.com/">http://www.sungravity.com/</a>               | Sud Africa  | Africa       |
| TchadSolaire                          | <a href="http://www.tchadsolaire.com/">http://www.tchadsolaire.com/</a>           | Chad        | Chad         |
| The NOMAD Foundation                  | <a href="http://nomadfoundation.org/">http://nomadfoundation.org/</a>             | Niger       | Niger        |
| TrinySol                              | <a href="http://trinysol.over-blog.com/">http://trinysol.over-blog.com/</a>       | Messico     | Messico      |
| Trust In Education                    | <a href="http://www.trustededucation.org/">http://www.trustededucation.org/</a>   | Afghanistan | Afghanistan  |
| ULOG Freiburg                         | <a href="http://www.solarfood.de/">http://www.solarfood.de/</a>                   | Germania    | Germania     |
| Vajra Foundation Holland              | <a href="http://www.vajra.nl/">http://www.vajra.nl/</a>                           | Paesi Bassi | Nepal        |
| Vietnam Solar Serve                   | <a href="http://www.vietnamsolarserve.org/">http://www.vietnamsolarserve.org/</a> | Vietnam     | Vietnam      |
| Welfare Society For Solar Development |   | Uganda      | Uganda       |
| VISIONS Of Sustainability             | <a href="http://visions.net/">http://visions.net/</a>                             | Germania    | Germania     |
| World Central Kitchen                 | <a href="http://worldcentralkitchen.org/">http://worldcentralkitchen.org/</a>     | Haiti       | Haiti        |

## 2. Principi fisici di funzionamento

---

### 2.1 Funzionamento di un forno solare

Con il crescente utilizzo dei forni solari, scienziati da tutto il mondo hanno concentrato la loro attenzione su questa tecnologia. Si sono ideate differenti tipologie di forni solari, ognuna con caratteristiche proprie e quindi con prestazioni associate differenti. Nonostante le innumerevoli tipologie, il meccanismo principale sul quale si basa la cucina solare è sempre lo stesso, ovvero la riflessione dei raggi del Sole, i quali vengono concentrati in un unico punto, detto punto focale, o più genericamente, in un'area circoscritta. I raggi, sia diretti che riflessi, entrano quindi nel contenitore attraverso la copertura superiore composta da doppio strato vetrato, vengono poi assorbiti dal rivestimento nero che ricopre la scatola di cottura in alluminio, detta assorbitore e trasformati così in energia termica che, per l'appunto, provoca un innalzamento della temperatura interna e di conseguenza anche del cibo da riscaldare, posizionato all'interno del contenitore. Tale energia termica viene riemessa nel forno ad una maggiore lunghezza d'onda, la quale non consente all'energia di ripassare attraverso il vetro, restando concentrata nello spazio chiuso, cioè nell'assorbitore stesso.

Pertanto la buona qualità del forno dipende dalla sua capacità di trasferimento del calore dal corpo nero al contenitore con il cibo.

Per limitare il più possibile la perdita di calore per convezione e per conduzione, si isola la camera di cottura e si riducono le fessure che possono provocare dei flussi di aria calda verso l'esterno.

Allo stesso tempo, possiamo avere perdita di calore per irraggiamento dovuta ai raggi riflessi dal tegame che, in questo caso, possono uscire ripassando attraverso il vetro poiché non hanno cambiato la loro lunghezza d'onda. La maggior parte delle superfici trasparenti riescono a riflettere all'interno la maggior parte di calore irradiato, ma una buona parte riesce comunque ad uscire all'esterno.

### 2.2 Orientamento

E' fondamentale, ai fini delle prestazioni del prototipo, l'orientamento. Il forno può essere disposto in direzione Nord-Sud o in direzione Est-Ovest, vediamo ora quale risulta essere la posizione più vantaggiosa. Degli studi effettuati da Padovan A. e Del Col D., dimostrano che, confrontando la radiazione misurata su una superficie orizzontale, quella su una superficie inclinata orientata ad Est e quella su una superficie inclinata orientata a Sud, nella prima parte della mattinata la radiazione incidente più cospicua è quella sulla superficie inclinata orientata ad Est; quest'ultima risulta circa il doppio di quella relativa alla superficie orientata a Sud.

Da questa considerazione, possiamo affermare che un orientamento in direzione Est-Ovest sarà più vantaggioso dal punto di vista energetico, ma anche da punto di vista tecnico poiché per mantenere il fuoco sono necessari solo piccoli aggiustamenti di inclinazione durante il giorno. Tuttavia, durante le prime ed ultime ore della giornata, si registrerà un calo della radiazione misurata a causa dell'ombreggiamento dovuto all'ampio angolo di incidenza. Analizzando un orientamento Nord-Sud, questo avrà, al contrario, delle perdite massime nella tarda mattinata e delle perdite minime a inizio e fine giornata.

Considerando, però, uno studio globale che si basa su dati raccolti durante tutto l'anno (redatto da Stine W.B. e Geyer M.), possiamo aggiungere che un orientamento Nord-Sud consente di raccogliere più energia nel periodo estivo, minimizzando gli effetti dovuti all'ombreggiamento, mentre un orientamento Est-Ovest garantisce una maggiore radiazione nel periodo invernale.

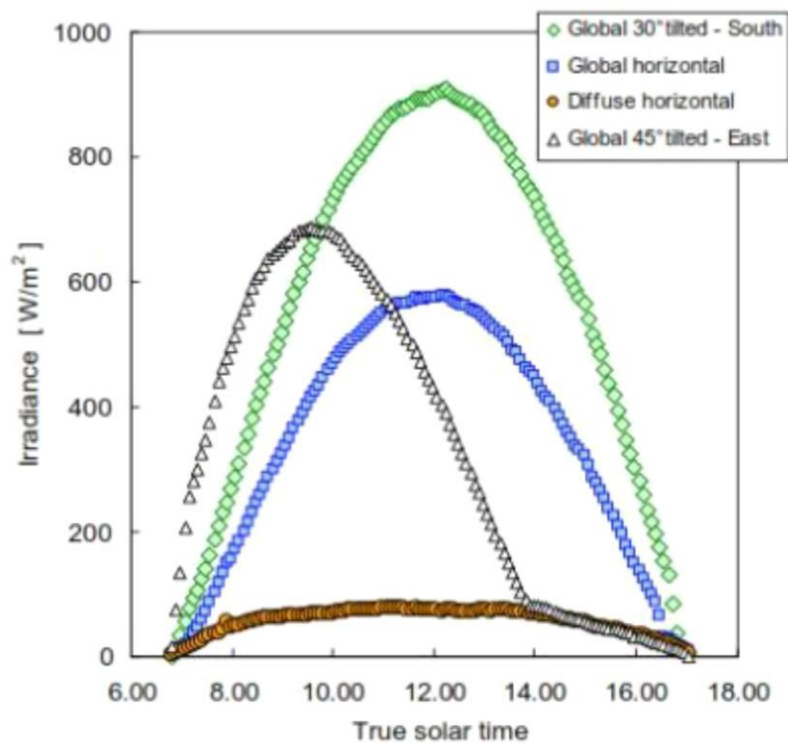
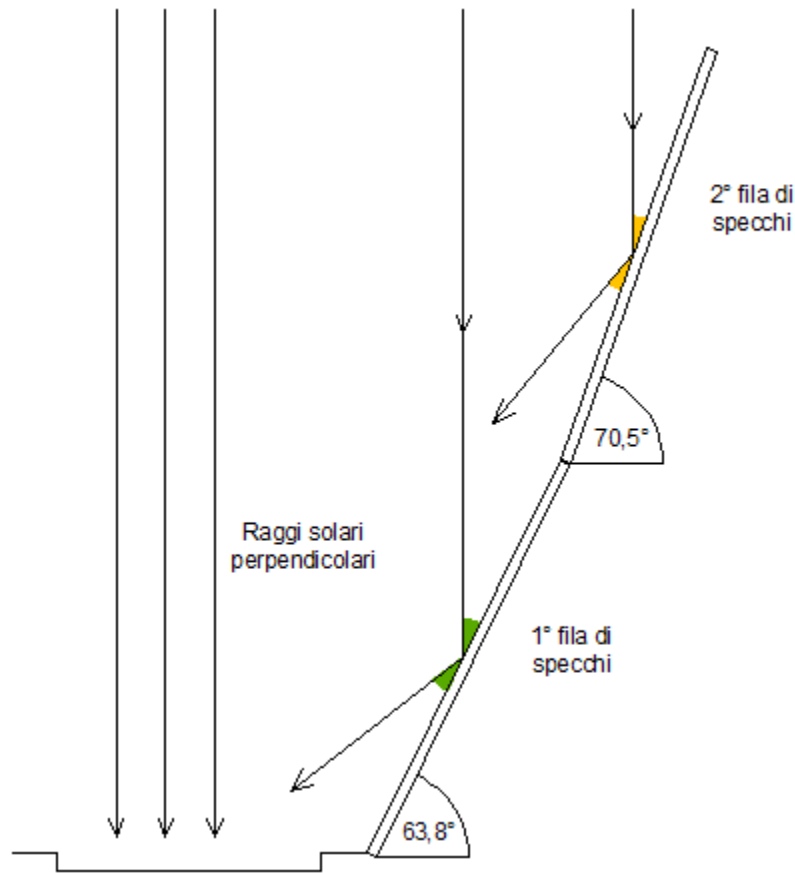


Fig. 11 - Differenza tra le direzioni di orientamento

### 2.3 Ottica del forno e calcolo del rendimento

Da quanto esposto nel capitolo precedente, il requisito essenziale del forno è l'efficienza che, nel nostro caso, è garantita da una doppia fila di specchi. La capacità di un forno solare è direttamente proporzionale all'area del collettore proiettata perpendicolarmente alla radiazione incidente, chiamata superficie utile.

La figura sottostante mostra l'inclinazione dei due tipi di pannelli riflettenti "P1" e "P2" rispetto ai raggi solari e dove questi vengono riflessi.



**Fig. 12** - Studio dell'ottica

Tornando alla superficie utile, per poterla calcolare basterà sommare l'area del ricevitore, che corrisponde all'area del vetro, alla somma delle aree degli specchi moltiplicate per il coseno del loro angolo di inclinazione. In tal caso stiamo supponendo che il forno sia ben orientato, ovvero che i raggi cadano perpendicolarmente al vetro, e nell'ipotesi di perfetta riflessione dei raggi solari, cioè che l'angolo di incidenza dei raggi solari sia uguale all'angolo di riflessione.

Quindi l'area di apertura utile totale sarà:

$$A_{AP} = A_{VETRO} + A_{SPECCHIO1^{\circ}FILA} \times 12 \times \cos(63,8^{\circ}) + A_{SPECCHIO2^{\circ}FILA} \times 12$$

x

$$\begin{aligned} & \cos(70,45^{\circ}) = \\ & = [(23,2)^2 \pi + 1412,5 \times 12 \times 0,44 + 2095,8 \times 12 \times 0,33] \text{ cm}^2 = \\ & = [1690,9 + 7458 + 8299,4] \text{ cm}^2 = 1,74 \text{ m}^2 \end{aligned}$$



A questo punto possiamo calcolare il rapporto di concentrazione, definito come il rapporto tra la superficie totale utile e la superficie di captazione della radiazione solare.

$$C = A_{AP}/A_R = [1,74/0,17] m^2 = 10,2$$

Ora si vuole calcolare il rendimento ottico globale nelle migliori condizioni possibili; dobbiamo, prima di tutto, fare delle considerazioni sulla radiazione solare.

L'intensità della radiazione solare, come visto nei paragrafi precedenti, che raggiunge gli strati superiori dell'atmosfera terrestre è di 1366,1 W/m<sup>2</sup>.

Basandoci su degli studi effettuati all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche, si è visto che la radiazione diretta, attenuata dall'atmosfera, raggiunge valori pari a 900 W/m<sup>2</sup> sul livello del mare, con il sole a 45° rispetto all'orizzonte e cielo terso. Questo dato può essere considerato valido nel nostro Paese dalle ore 10 alle ore 15 nella stagione primaverile/estiva.

La radiazione assorbita dal forno sarà pari alla somma della radiazione diretta, che passa attraverso i vetri (abbiamo due vetri in serie con le medesime caratteristiche), e quella riflessa dagli specchi, anche questa che attraversa i vetri.

Bisogna quindi tenere conto dei seguenti parametri: la trasmittanza dei vetri  $\tau$  (pari a 0,9), l'assorbanza della vernice nera  $\alpha$  (pari a 0,9) e la riflettanza dell'alluminio  $\rho$  (pari a 0,94).

La radiazione assorbita sarà:

$$\begin{aligned}
 S &= G_{BN} \times A_{VETRO} \times \tau_1^{VETRO} \times \tau_2^{VETRO} \times \alpha_{VERNICE} + \\
 &G_{BN} \times (A_{TOT1^{FILASP.}} + A_{TOT2^{FILASP.}}) \times \rho_{SPECCHI} \times \tau_1^{VETRO} \times \tau_2^{VETRO} \times \\
 &\alpha_{VERNICE} = \\
 &= 900 \text{ W/m}^2 \times 0,17 \text{ m}^2 \times 0,9 \times 0,9 + 900 \text{ W/m}^2 \times (0,75 \text{ m}^2 + 0,83 \text{ m}^2) \times 0,94 \\
 &\quad \times \\
 &\quad 0,92 \times 0,9 = 1083,3 \text{ W}
 \end{aligned}$$

Il rendimento ottico è dato da:

$$\mu_0 = \frac{\text{radiazione solare assorbita all'interno del forno in W} \quad S}{\text{radiazione solare che colpisce il forno e i pannelli in W} \quad G_{BN} \times A_{AP}}$$

$$= 1/C \times \tau_1^{\circ}\text{VETRO} \times \tau_2^{\circ}\text{VETRO} \times \alpha_{\text{VERNICE}} + (1 - 1/C) \times \rho_{\text{SPECCHI}} \times \tau_1^{\circ}\text{VETRO} \times \tau_2^{\circ}\text{VETRO} \times \alpha_{\text{VERNICE}} = 0,69 \text{ cioè } 69 \%$$

Questo significa che il rendimento ottico è dato da due aliquote: una dovuta alla radiazione diretta e una dovuta alla radiazione riflessa; inoltre questo non è dipendente dalla radiazione, che viene infatti semplificata nell'equazione, ma dipende dalle caratteristiche di ciascun materiale e dal rapporto di concentrazione, che esprime un rapporto tra aree.

Infine, possiamo precisare che parte dei raggi solari riflessi cadono anche sul bordo del coperchio, tuttavia è stato conveniente non fare un foro dodecagonale poiché la concentrazione dei raggi solari non è uniforme ed aumentando la superficie del foro entrerebbe solo il 3% in più di energia ma aumenterebbero le perdite, per convezione e irradiazione del 5%. Il diametro del foro rappresenta un compromesso fra energia che entra, perdite termiche e robustezza del coperchio in vetro.

## **2.4 Sfruttamento di forni solari in assenza di radiazione solare**

### **2.4.1 Miglioramento delle prestazioni**

Un evidente problema a cui si può andare incontro è quello di dover interrompere la cottura o addirittura di non riuscire a cuocere del cibo a causa di condizioni ambientali sfavorevoli. Per far fronte a tale problematica, è stato proposto di adottare un sistema di accumulo di energia termica che consisterebbe nell'utilizzo dei PCM (Phase Change Materials, materiali a cambiamento di fase) per l'accumulo di energia solare, in modo da consentire lo sfruttamento del forno solare lontano dalle ore di picco della radiazione solare, ad esempio nelle ore notturne o nei giorni particolarmente nuvolosi.

### **2.4.2 Materiali a cambiamento di fase (PCM)**

Come già accennato sopra l'uso dei Phase Change Material (PCM) come supporto per i solar cookers permette di cucinare il cibo nelle giornate nuvolose o nelle ore notturne.

Ci sono diverse tecnologie, la più usata è quella basata sull'assorbimento e sul rilascio di calore durante il cambiamento di fase del PCM, questa tecnologia prende il nome di latent heat storage (LHS). Grazie a questa tecnologia si può ottenere un'elevata quantità di energia immagazzinata con la possibilità di accumulare energia con una temperatura costante pari a quella di fusione del PCM.

Ci sono tre possibili cambiamenti di fase:

- Solido-Solido: passaggio da una forma cristallina ad un'altra accompagnato da modesti valori di calore latente e piccole variazioni di volume;

- Solido-Gas / Liquido-Gas: presenta un elevato valore di calore latente assorbito ed importanti variazioni di volume;
- Solido-Liquido: modesto calore latente assorbito e modeste variazioni di volume.

Delle tre tipologie quella più utilizzata è la terza, ovvero quella Solido-Liquido poiché è caratterizzata da una modesta variazione di volume, la quale permette di usare contenitori di dimensioni contenute e di limitare la pressione massima per la quale deve essere dimensionato, così facendo si contengono i costi.

La quantità di calore immagazzinata può essere calcolata come segue:

$$Q = \int_{T_{iniz}}^{T_m} m \cdot C_{ps} \cdot dT + m \cdot a_m \cdot \Delta h_m + \int_{T_m}^{T_{fin}} m \cdot C_{pl} \cdot dT$$

Dove:

- $T_m$ : temperatura di fusione del materiale;
- $T_{iniz}$ : temperatura iniziale del materiale;
- $T_{fin}$ : temperatura finale del materiale;
- $m$ : massa del materiale;
- $C_{ps}$ : calore specifico del materiale solido;
- $C_{pl}$ : calore specifico del materiale liquido;
- $a_m$ : frazione di materiale fuso;
- $\Delta h_m$ : calore latente di fusione del materiale per unità di massa

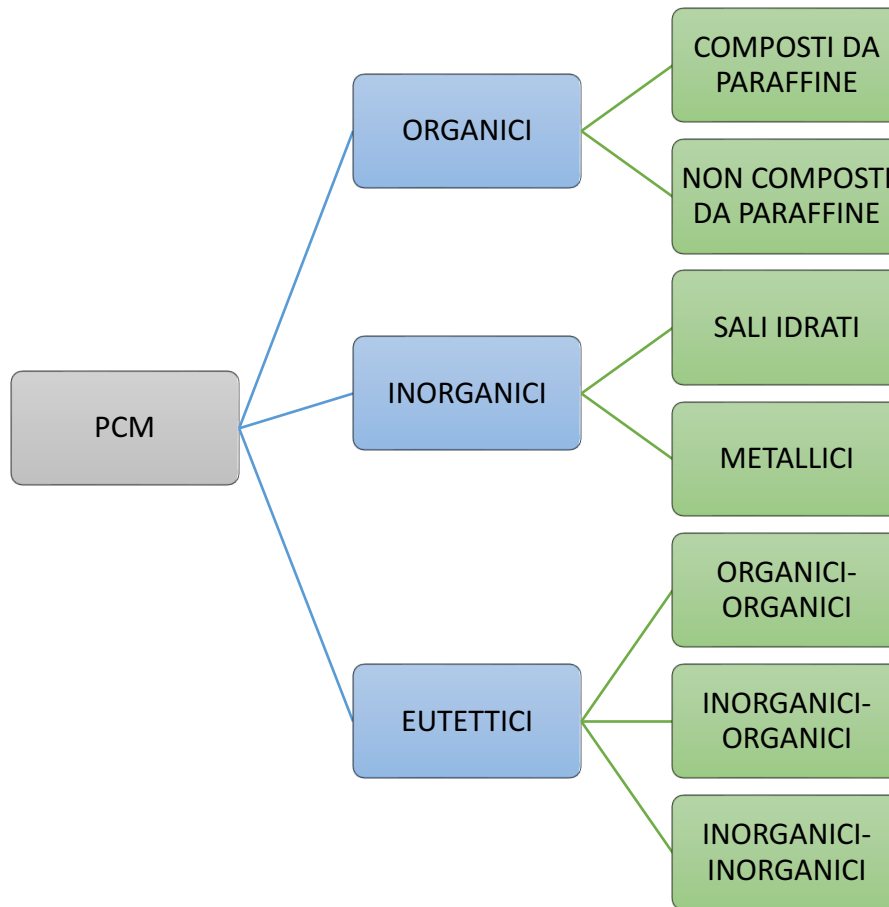
### 2.4.3 Classificazione dei PCM

Esistono diversi tipi di PCM, la loro scelta deve essere fatta in base all'applicazione, così che la temperatura di fusione ricada nel range operativo.

I fluidi che hanno temperatura di fusione compresa tra 15 °C e 90 °C, trovano applicazione nel riscaldamento solare ed essendo i mezzi maggiormente impiegati, risultano essere anche i più studiati negli ultimi 40 anni.

Riportiamo nella tabella seguente la classificazione redatta da Sharma et al. [7].

**Tabella 2** - Classificazione dei PCM



I PCM organici sono suddivisi in paraffine e non paraffine; questi tipi di fluidi non sono soggetti alla segregazione e alla degradazione e possono essere usati per molti cicli consecutivi di transizione, non sono corrosivi e la loro temperatura di fusione si mantiene per lo più costante.

- **Paraffine:** le cere paraffiniche sono una miscela di catene di n-alcani, la cui temperatura di fusione ed il calore latente aumentano all'aumentare della lunghezza della catena. Risultano essere sicure ed affidabili, sono economiche e non sono corrosive. Dal punto di vista tecnico i loro vantaggi sono una limitata variazione di volume in fase di fusione, stabilità al di sotto di 500 °C, il loro essere chimicamente inerti, una fusione congruente senza segregazioni, delle buone proprietà di nucleazione e la loro riciclabilità, inoltre coprono un vasto range di temperature che vanno dai 5,5 °C a 80 °C. Da contro hanno una bassa conducibilità termica, sono incompatibili con i contenitori in plastica e sono moderatamente infiammabili.
- **Non paraffine:** questa categoria è quella che racchiude la maggior parte dei materiali a cambiamento di fase, gli aspetti comuni sono un elevato calore di fusione, un assente sotto-raffreddamento, tossicità medio-alta, bassa conducibilità termica,

instabilità alle alte temperature, infiammabilità, costo più elevato rispetto alle paraffine. Sono a loro volta suddivise in acidi grassi e altre non paraffine.

I materiali a cambiamento di fase inorganici oltre ad essere più degradabili, hanno un calore latente di fusione più elevato rispetto ai precedenti.

- **Sali idrati:** sono dei solidi cristallini formati da leghe di acqua e sali, sono la categoria di PCM inorganici più interessante e studiata per il loro accumulo di materiale latente. Risultano vantaggiosi per l'elevata conducibilità termica, la ridotta variazione di volume durante la variazione di fase, la bassa corrosività e, infine, per la loro economicità. Tuttavia presentano una fusione incongruente con dei sotto-raffreddamenti che portano alla segregazione di fase.
- **Materiali metallici:** hanno una bassa temperatura di fusione e sono poco utilizzati a causa del loro peso elevato. Le loro principali proprietà sono basso calore latente per unità di peso, basso calore specifico, elevato calore latente per unità di volume, elevata conducibilità termica.

Gli eutettici sono una miscela di sostanze il cui punto di fusione è più basso di quello delle singole sostanze che la compongono. In un materiale eutettico tutti i suoi elementi fondono e solidificano congruente e simultaneamente, senza cioè segregazione. Sono dati dalla miscelazione di composti organici e inorganici; presentano caratteristiche molto simili ai materiali metallici.

#### 2.4.4 Metodi per incrementare le prestazioni dei PCM

Come abbiamo visto, un problema comune che caratterizza la maggior parte dei PCM è la bassa conducibilità termica, che si traduce in un elevato gradiente di temperatura all'interno del mezzo. Sono quattro i metodi principali per ovviare tale problema:

- Alette metalliche: permettono un'elevata conducibilità termica del metallo, permettendo al calore di penetrare all'interno del mezzo più efficacemente. Secondo degli studi, redatti da Pankaj et al. [4], aumentando lo spessore delle alette si avrà solo un lieve aumento delle prestazioni termiche, mentre, con alette più alte, si aumenta la superficie di scambio ed aumenterà il flusso di calore ceduto al PCM.
- Nanofibre di grafite: permettono delle prestazioni simili a quelle delle alette metalliche, ma incrementando la massa del sistema in misura minore rispetto a queste ultime, il che rappresenta un grande vantaggio.
- Schiume metalliche: sono delle strutture cellulari costituite da un metallo solido, la cui buona parte dei volumi è costituita da pori d'aria. Le schiume a celle aperte, che formano una rete interconnessa, possono essere utilizzate come scambiatori di calore; la matrice metallica viene riscaldata ed un fluido, passando attraverso di essa, assorbe calore. I principali vantaggi sono la bassa densità e l'elevata resistenza della struttura.

- **Incapsulamento:** si intende l'inclusione del PCM in un contenitore opportunamente progettato. In tal modo si incrementa l'area di scambio termico, si controlla il volume durante il cambiamento di fase e si riduce la reattività del materiale verso l'esterno. A seconda della dimensione del contenitore abbiamo due tipologie di incapsulamento (macro-incapsulamento e micro-incapsulamento). Il contenitore solitamente ha forma cilindrica o parallelepipedica e può essere costituito di plastica o metallo.

## 2.4.5 Applicazione dei PCM ai forni solari

Esistono diversi modi per integrare i PCM ai forni solari, essi sono differenti per ogni tipologia di forno, vediamo ora i principali:

- Quello più usato consiste nell'usare un doppio contenitore con un vuoto dove verrà inserito il fluido a cambiamento di fase;
- Un altro è rappresentato dalla costruzione di un doppio fondo che conterrà il PCM;
- Infine è possibile far scorrere il fluido all'interno di tubazioni in modo che il calore arrivi al cibo da cuocere, tale metodo è utilizzato principalmente nei collettori, dove il ricevitore di raggi solari ed il piano cottura sono separati.

## 2.4.6 PCM scelti

I PCM utilizzati per eseguire i test rientrano tutti nella famiglia degli zuccheri, in particolare eritritolo e xilitolo nella composizione pura e mannitolo e xilitolo usati insieme come miscela. La scelta dei PCM è stata fortemente limitata dalla temperatura di fusione del materiale stesso poiché sono stati testati con il forno a scatola solare portatile, ampiamente descritto nel capitolo 5 di questa tesi, che è in grado di raggiungere temperature dell'ordine di 130 °C.

I dettagli di ciascun materiale sono presentati nelle seguenti sezioni.

### **Eritritolo**

L'eritritolo,  $C_4H_{10}O_4$ , appartiene alla categoria dei PCM organici, ma non è composto da paraffina. È un polialcol naturalmente presente nella frutta e negli alimenti fermentati. Come riportato nella classificazione generale, l'eritritolo ha il vantaggio di fondersi in modo congruente e ha un valore ad alta densità. Durante le indagini sperimentali è stato riscontrato che l'intervallo di solidificazione per questo materiale è tra 60 °C e 100 °C, ma è stata osservata anche la necessità di un leggero raffreddamento. È stato anche osservato che i campioni di eritritolo sottoposti a ripetuti cicli termici accelerati non mostrano segni di degradazione fino a 75 cicli [7].

Esistono diversi studi sulle proprietà dell'eritritolo. Cohen et al. [8] hanno stabilito un'igroscopicità molto bassa, che è molto importante per la gestione della PCM in condizioni

ambientali, mentre Kaizawa et al. [9] ha determinato una temperatura di decomposizione di 160 °C, che è il limite di temperatura per l'uso dell'eritritolo come materiale di accumulo di energia termica. Lopes Jesus et al. [10] hanno invece osservato il comportamento generale di fusione e cristallizzazione e hanno segnalato la presenza di due diverse forme cristalline di eritritolo solidificato con diversi punti di fusione. Per quanto riguarda invece l'uso dell'eritritolo come PCM per la cottura solare, è necessario fare riferimento agli studi di Sharma et al. [7] e da Pawar et al. [11].



**Fig. 13** - Confezione di eritritolo

## **Xilitolo**

Lo xilitolo,  $C_5H_{12}O_5$ , appartiene alla categoria dei PCM organici, ma non è composto da paraffina. È un alditolo estratto da betulla, fragole, lamponi, prugne e grano, che viene anche usato come sostituto dello zucchero tradizionale (saccarosio). Inoltre, come l'eritritolo, si scioglie in modo congruente, a circa 95 °C circa, e ha una densità ancora maggiore, ma a differenza della prima la sua temperatura di fusione è piuttosto bassa. Per lo xilitolo sono disponibili solo poche pubblicazioni nella letteratura relativa all'uso come PCM. La temperatura di decomposizione di 200 °C, che è il limite di temperatura per il suo utilizzo come materiale di accumulo di energia termica, è stata nuovamente determinata da Kaizawa et al. [9] e Höhlein et al. [12], mentre Seppälä et al. [13] hanno provato vari additivi per aumentare la velocità di cristallizzazione e il rilascio di calore latente e hanno misurato le proprietà termiche: il metanolo porta ad una cristallizzazione 33-170 volte più veloce del xilitolo puro in uno stato super-condensato a 22 °C.



Fig. 14 - Confezione di xilitolo

Tabella 3 - Riepilogo delle proprietà di eritritolo e xilitolo [12]

|                     | Eritritolo     | Xilitolo      |
|---------------------|----------------|---------------|
| $T_m$ (°C)          | 117 – 120      | 92 - 94       |
| $C_{ps}$ (J/g K)    | 1.38 (20 °C)   | 1.33          |
| $C_{pt}$ (J/g K)    | 2.76 (140 °C)  | 2.36          |
| $\lambda_s$ (W/m K) | 0.733 (20 °C)  | -             |
| $\lambda_l$ (W/m K) | 0.326 (140 °C) | -             |
| $\rho_s$ (g/cm)     | 1.480 (20 °C)  | 1.500 (20 °C) |
| $\rho_l$ (g/cm)     | 1.300 (20 °C)  | -             |

### Xilitolo e mannitolo

Un altro PCM che è stato testato è una miscela di xilitolo e mannitolo.

Il mannitolo,  $C_6H_{12}O_6$ , è una sostanza classificabile come zucchero, che si trova naturalmente nelle alghe e nei funghi. Il suo nome deriva dalla manna (la linfa del frassino) da cui può essere estratto. È utilizzato nelle industrie farmaceutiche e alimentari poiché ha un'alta dolcezza e un basso contenuto energetico. Appartiene alla categoria dei PCM organici, ma non è composta da paraffina. Il mannitolo ha una temperatura di fusione che varia da 162,15 °C a 167,80 °C con un'entalpia di fusione di  $326,8 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$  per  $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ , mentre dalle curve TG-DTA (termogravimetria-analisi termica differenziale) era possibile per derivare la temperatura di decomposizione, che corrisponde a 300.15 °C. Il mannitolo, per le sue caratteristiche (in particolare la differenza di temperatura tra la temperatura di



fusione e la temperatura di decomposizione) è considerato il PCM più adatto per applicazioni a media temperatura [9].



**Fig. 15** - Confezione di mannitolo

Il mannitolo e lo xilitolo sono stati miscelati per non avere una temperatura di fusione troppo elevata, poiché il mannitolo ha una temperatura di fusione troppo elevata per le possibilità del forno portatile a scatola solare con cui abbiamo effettuato i test. In laboratorio abbiamo creato la miscela di xilitolo e mannitolo in proporzioni 70:30.

La preparazione della miscela avviene in 2 fasi: i due zuccheri, opportunamente pesati nelle percentuali sopra descritte, vengono uniti nella loro composizione naturale che risulta essere in grani e lasciati asciugare per eliminare l'attuale contenuto di umidità. Dopo questa operazione, la miscela viene posta nella pentola che a sua volta viene posizionata all'interno del forno elettrico a 200 °C fondendo i grani. La pentola con il composto fuso viene raffreddata gradualmente lasciandola all'interno del forno fino a quando non diventa un blocco duro. A causa della riduzione del volume della miscela, poiché abbiamo modificato la struttura chimica, è necessario ripetere la procedura una seconda volta per ottenere la giusta quantità di PCM all'interno della pentola. È necessario verificare che la quantità finale ottenuta copra perfettamente e incorpori le due termocoppie precedentemente fissate all'interno dei tubi di acciaio inossidabile in modo da non effettuare misurazioni di temperatura false durante la fase di raccolta dei dati.

#### **2.4.7 Calcolo della massa dei PCM**

Al fine di stimare la quantità di PCM necessaria per cucinare in assenza di radiazione solare, Sharma, Buddhi et al. [14] non partono dal volume disponibile, ovvero dalle dimensioni effettive del forno solare, ma dalla quantità di energia necessaria per garantire che la temperatura di cottura raggiunga il punto di solidificazione del PCM in un determinato intervallo di tempo. In questo modo determinano la massa necessaria di PCM dall'equilibrio

tra l'energia rilasciata dal PCM stesso e il cibo presente con quello perso dal forno. Ciò è facilmente comprensibile dalla seguente equazione in cui la massa PCM ( $M_{PCM}$ ) sarà la nostra incognita:

$$M_c C_w (T_c - T_m) + M_{PCM} C_{PCM} (T_{PCM} - T_m) + M_{PCM} L = U_l A (T_c - T_a) \Delta t$$

Dove:

- $M_c$ : massa dell'alimento considerato [kg];
- $M_{PCM}$ : massa del PCM [kg];
- $C_w$ : calore specifico dell'acqua [hJ/kg °C];
- $C_{PCM}$ : calore specifico del PCM [hJ/kg °C];
- $T_c$ : temperatura di cottura [°C];
- $T_m$ : temperatura di fusione PCM [°C];
- $T_{PCM}$ : temperatura PCM durante la cottura [°C];
- $T_a$ : temperatura ambiente media nel periodo di tempo  $\Delta t$  [° C];
- $L$ : calore latente del PCM [kJ/kg];
- $U_l$ : coefficiente di perdita di calore del forno [ $W/m^2$  °C];
- $A$ : area di cottura;
- $\Delta t$ : intervallo di tempo.

Per sfruttare questa equazione, dovrebbero essere fatte ipotesi e misurazioni, e quindi bisogna essere consapevoli di quanto segue:

- radiazione solare media [ $W/m^2$ ]: facilmente disponibile attraverso il sistema di acquisizione;
- temperatura media ambiente [°C]: facilmente disponibile tramite la termocoppia;
- PCM e temperatura del cibo, prima di essere caricato per la cottura in assenza di radiazione solare (ad es. Alle 15:00) [°C];
- il tempo in cui la radiazione solare cessa di essere presente (ad esempio 16:00);
- PCM e temperatura del cibo durante la cottura [°C].

## 2.4.8 Realizzazione pentola a doppio fondo

Per sfruttare le proprietà dei PCM, è necessario realizzare una pentola a doppio fondo. Il nostro lavoro mira a identificare per quanto tempo il PCM utilizzato è in grado di rilasciare calore una volta che ha avuto luogo il cambiamento di fase. Un fluido (acqua o olio di silicio) viene quindi inserito nella pentola più piccola, che acquisisce calore dal PCM e di cui misuriamo la variazione di temperatura durante il processo nel forno solare.

Il primo problema riscontrato durante la progettazione della pentola era dove posizionare il composto PCM. Le due opzioni più plausibili erano o di creare un vassoio pieno del composto che sarebbe servito da supporto per la pentola o di creare una pentola con una cavità interna riempita con PCM. La decisione finale è ricaduta su quest'ultima opzione per due motivi principali: la prima è la facilità nel fare una pentola con queste caratteristiche e

in secondo luogo, con questa soluzione, il PCM "avvolge" completamente il liquido in esame.

## Pentole

Le prime cose da valutare erano il materiale e le dimensioni della pentola di nuova costruzione. Considerando le alte temperature da raggiungere, è essenziale utilizzare un materiale adeguato ad eliminare i problemi durante il processo di cottura. Per quanto riguarda le dimensioni del vaso, sono state prese in considerazione le dimensioni dell'aggressore e la quantità di PCM richiesto. Dopo un'attenta valutazione abbiamo optato per due pentole in acciaio inossidabile con un diametro di 23 cm e 19 cm rispettivamente.

**Tabella 4** - Parametri principali delle due pentole

|               | Pentola esterna | Pentola interna |
|---------------|-----------------|-----------------|
| Diametro [cm] | 23              | 19              |
| Altezza [cm]  | 15              | 13              |
| Capacità [l]  | 5.2             | 3.2             |
| Peso [kg]     | 1.02            | 0.53            |

La prima operazione è stata svitare le maniglie di plastica e le due pentole sono state sovrapposte, cercando di centrarle e allinearle all'estremità superiore. Uno spazio di circa 2 cm per lato è stato lasciato tra le due pentole con l'aiuto di piccole strisce di legno, come si può facilmente vedere nella figura seguente:



**Fig. 16** - Posizione delle strisce di legno come distanziali

## Bullonatura

Una volta definita la posizione ottimale delle pentole, sono stati praticati quattro fori, diametralmente opposti, per contenere i bulloni e fissare tutto.

Sono stati installati bulloni in acciaio inossidabile per garantire un buon risultato. I dadi, anch'essi in acciaio inossidabile, vengono utilizzati per mantenere la struttura il più possibile solida.

Una volta montate le due pentole, abbiamo analizzato varie soluzioni su come posizionare le due termocoppie da immergere all'interno del PCM. Il problema da risolvere era evitare che il PCM cadesse dai bordi della pentola una volta raggiunta la fase liquida, inoltre le due termocoppie dovevano rimanere nella loro posizione originale e non entrare in contatto con le pareti della pentola, altrimenti le misure sperimentali sarebbero state compromesse. Abbiamo deciso di utilizzare due piccoli tubi in acciaio inossidabile (vedi Fig. 18), all'interno dei quali sono state inserite le termocoppie, facendole uscire dal tubo solo di 1 cm. Il tubo di acciaio inossidabile è stato saldato nel bullone che blocca le due pentole (Fig. 17).



**Fig. 17** - Fissaggio delle due pentole e del tubo della termocoppia



**Fig. 18** - Tubi in acciaio inossidabile saldati ai dadi

## **Pittura**

Una volta fissate le due pentole, quella esterna è stata dipinta utilizzando la vernice nera precedentemente utilizzata per l'assorbitore.



**Fig. 19** - Pentola a doppio fondo dipinta

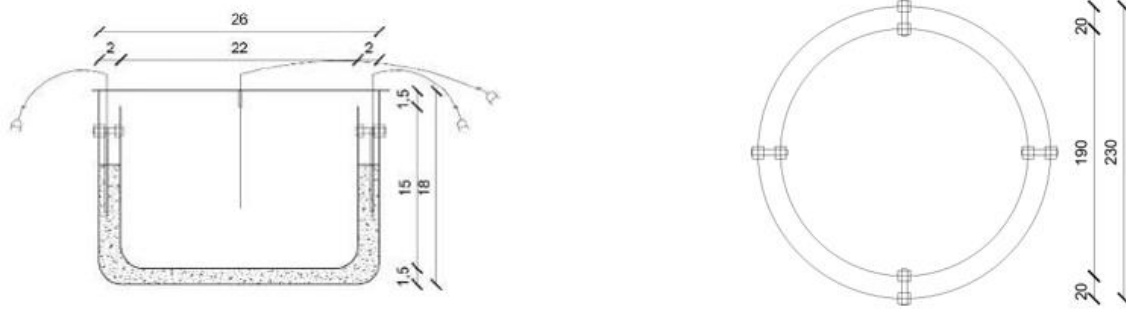
## **Posizionamento delle termocoppie**

L'ultima operazione è stata quella di posizionare le termocoppie: abbiamo optato per termocoppie di tipo K, in grado di resistere alle alte temperature). Per l'acquisizione della temperatura PCM le termocoppie sono state inserite all'interno dei tubi sopra descritti, mentre la termocoppia per l'acquisizione della temperatura del fluido contenuta all'interno della pentola è posizionata nella parte centrale di questa attraverso un'asta d'acciaio e fissata con un elemento metallico in modo tale che la parte finale della termocoppia, dove ha luogo la misurazione, sia posizionata a 4 cm dal fondo della pentola.



**Fig. 20** - Pentola a doppio fondo completata

Di seguito sono riportati lo schema e la sezione della pentola:



**Fig. 21** - Schema e sezione della pentola a doppio fondo

### 2.4.9 Descrizione del fluido di prova (olio di silicone)

Il fluido di prova utilizzato è un olio siliconico: Rhodorsil Oils 47 V 100 (dove 47 è il riferimento per i siliconi Bluestar per oli di polidimetilsilossano; V sta per viscosità; 100 indica la viscosità in  $\text{mm}^2/\text{s}$  a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ ) [15].

Le caratteristiche principali di questo olio sono:

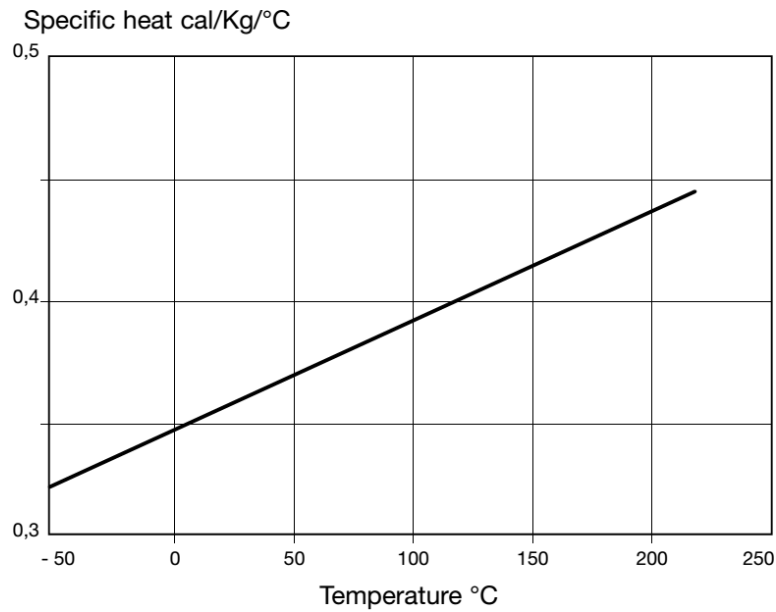
- bassa viscosità
- alta tensione superficiale
- elevata comprimibilità
- resistenza alle alte e basse temperature
- resistenza all'ossidazione e all'idrolisi
- mancanza di invecchiamento dovuta agli agenti atmosferici
- chimicamente inerte
- combustibilità molto limitata.

La tensione di vapore è molto bassa con una viscosità di oltre  $50\text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ . Oltre i  $200\text{ }^\circ\text{C}$  l'olio di silicone, in presenza di aria, non è più stabile e iniziano i fenomeni di ossidazione.

La capacità termica specifica degli oli Rhodorsil® 47 di viscosità compresa tra 50 e  $1000\text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ , è indipendente dalla viscosità e pari a  $0,35\text{ cal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  (o  $1,46\text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) a  $25\text{ }^\circ\text{C}$ . Questa aumenta con la temperatura secondo la seguente legge generale:

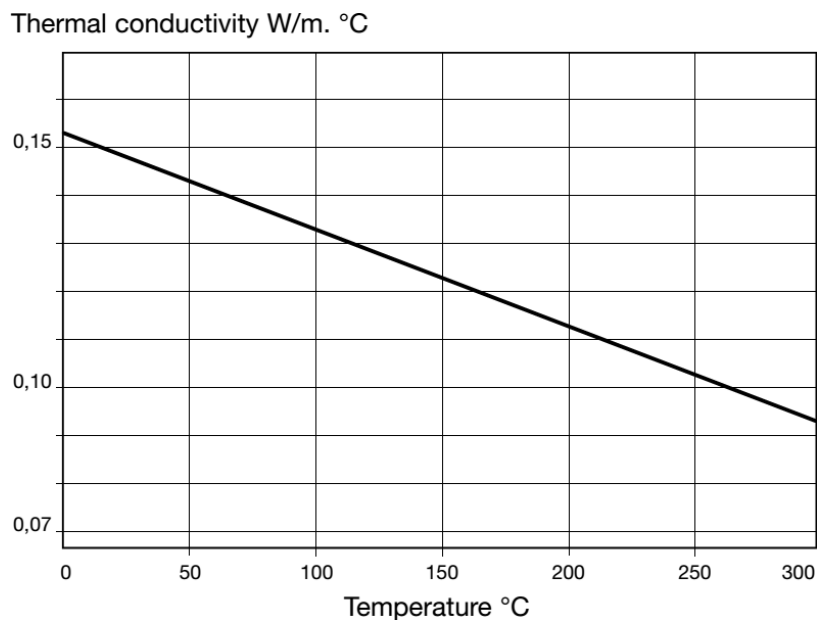
$$c_p = a + b \cdot 10^{-5}T$$

con  $a = 0,34708$  e  $b = 43$ ,  $T$  misurata in  $^\circ\text{C}$ ,  $c_p$  in  $\text{kcal} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$  (vedere la Figura 22). Questa legge è valida tra  $-50\text{ }^\circ\text{C}$  e  $+220\text{ }^\circ\text{C}$  [15].



**Fig. 22** - Variazione del calore specifico degli oli Rhodorsil® 47 in funzione della temperatura [15]

La conduttività termica degli oli Rhodorsil® 47 varia leggermente con la temperatura nell'intervallo da +20 a +250 °C (vedere la Fig. 23). Cambia solo in funzione della viscosità per oli molto fluidi e rimane sostanzialmente costante da una viscosità di  $50 \text{ mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ : la conduttività termica degli oli Rhodorsil® 47 è sostanzialmente identica a quella degli oli minerali [15].



**Fig. 23** - Variazione della conducibilità termica degli oli Rhodorsil® 47 V 50 a V 1000 in funzione della temperatura [15]

## 3. Realizzazione di un forno ad elevata efficienza

---

### 3.1 Premessa

Il forno solare di cui tratteremo è un prototipo ad elevata efficienza costruito all'interno del Dipartimento "DIISM" della facoltà di Ingegneria, presso l'Università Politecnica delle Marche. Per la realizzazione sono stati seguiti i disegni e dettagli realizzativi del prototipo ideato dall'Ing. Gianni Crovato. Lo scopo imposto è quello di ottimizzare il forno, che è stato precedentemente costruito in officina, aumentandone l'isolamento, la potenza e di conseguenza l'efficienza, utilizzando e studiando materiali più idonei allo scopo.

Le principali modifiche apportate al prototipo realizzato da quello dell'Ingegnere Crovato, sono la vernice con la quale è stato dipinto l'assorbitore, gli specchi di riflessione, il doppio vetro attraverso il quale passano i raggi solari e l'isolamento interno.

Il forno da noi studiato (Fig. 24) è costituito da un contenitore interno che funge da camera di cottura con un coperchio superiore vetrato, affinché entrino all'interno dell'assorbitore i raggi solari. Per garantire una elevata efficienza, nella parte superiore del contenitore è presente una doppia fila di specchi, ciascuna ad un differente angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale.



**Fig. 24** – Forno solare realizzato presso il DIISM



### 3.2 Caratteristiche geometriche del forno

Il forno nel suo insieme (contenitore più specchi), mostrato in Fig. 25, presenta un diametro massimo di 1,2 m e un'altezza massima di 1,8 m. Ha un peso di circa 84 kg ed un ingombro di circa 2,6 m<sup>3</sup>.

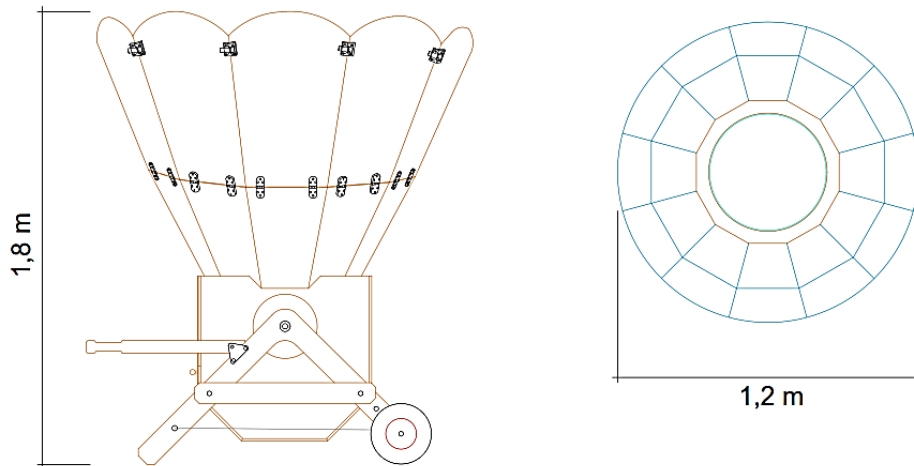


Fig. 25 - Dimensioni forno solare

Il forno è dotato di due impugnature laterali in legno e di due ruote che permettono lo spostamento e il trasporto del forno stesso. Inoltre, attraverso un freno, viene reso possibile un orientamento manuale, che consente una rotazione da 0° a 30° attorno al solo asse orizzontale, in modo tale da poter inseguire costantemente il sole. Il tutto è facilmente deducibile dalla Fig. 26.

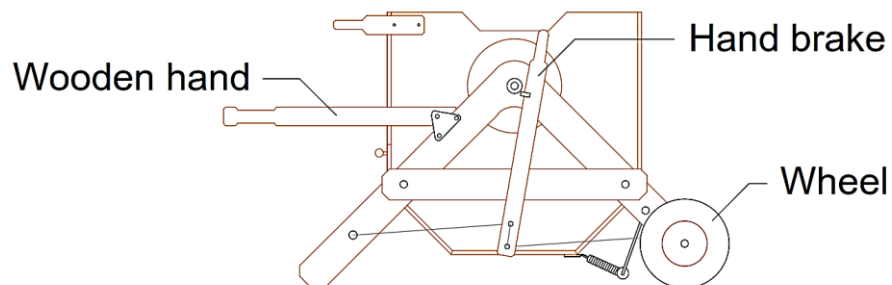


Fig. 26 - Tavola 1, schematizzazione del corpo del forno

Presenta inoltre due file di specchi facilmente richiudibili: quella inferiore di forma trapezoidale ha un'altezza di 61,6 cm; la fila di specchi superiore, che presenta un arrotondamento nella parte superiore, ha invece un'altezza di 63 cm ed è possibile, attraverso delle giunzioni specifiche, ripiegarlo sulla fila sottostante per facilitare il trasporto del forno stesso riducendo l'ingombro e aumentandone di conseguenza la visibilità. L'area totale occupata da entrambe le file di pannelli riflettenti è circa 4,2 m<sup>2</sup>. Con l'utilizzo di entrambe le file di specchi è possibile così beneficiare, non solo della radiazione solare diretta captata del vetro, ma anche della radiazione solare diretta riflessa dagli specchi stessi (Fig. 27).

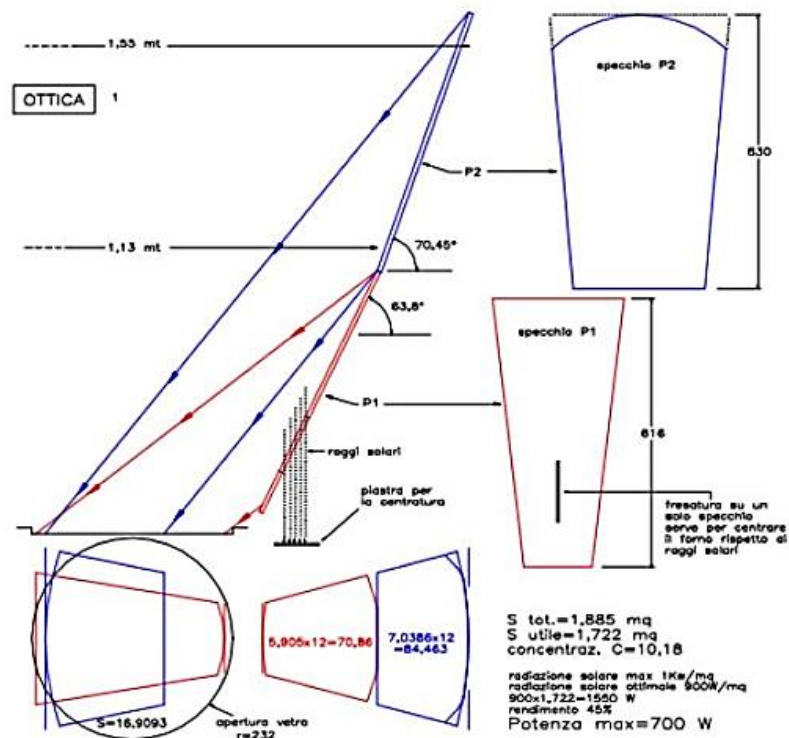
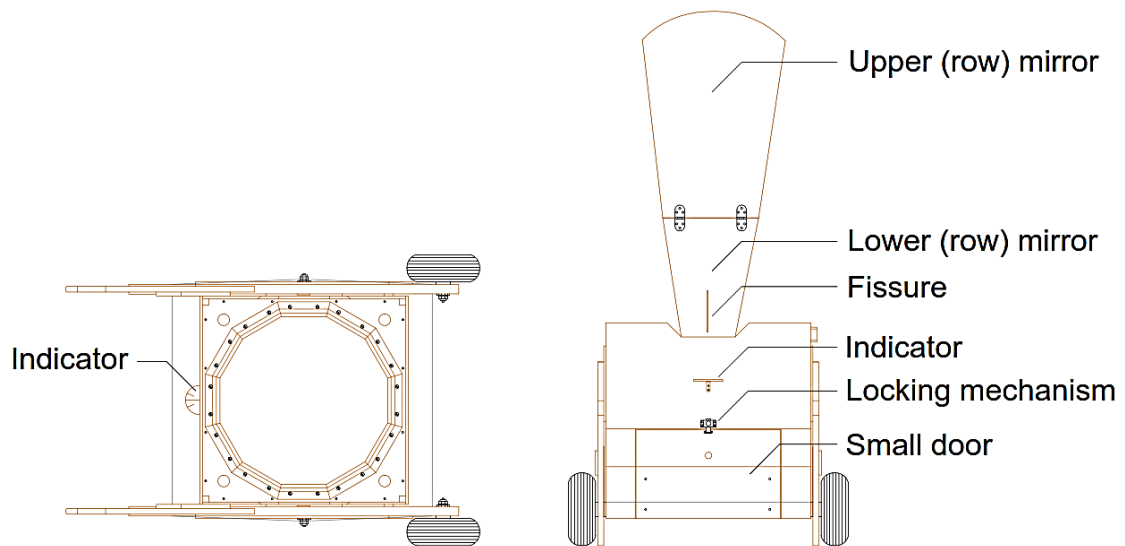


Fig. 27 - Tavola 2, dimensionamento ed inclinazione specchi

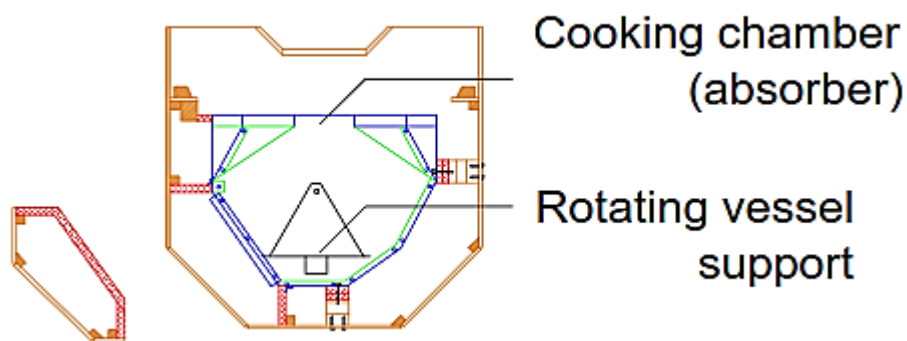
Come si può notare dalla Fig. 24, uno degli specchi della fila inferiore presenta una fessura attraverso la quale è possibile far passare un raggio solare che andrà a focalizzarsi su un indicatore fissato alla parete frontale del nostro forno e che ci permette, attraverso il freno descritto precedentemente, di orientare lo stesso in maniera puntuale in relazione alla rotazione del sole stesso avendo perciò un inseguimento costante.

Gli specchi di entrambe le file sono posizionati seguendo una forma dodecagonale intorno alla superficie vetrata (Fig. 28).



**Fig. 28** - Tavola 3, coperchio dodecagonale parte superiore assorbitore e vista frontale forno con individuazione della fessura nella prima fila degli specchi, specchio centrale e relativo indicatore

La parte frontale del forno è dotata di uno sportello (35 cm x 70 cm) che permette l'inserimento del cibo all'interno dell'assorbitore, realizzato con una lamiera zincata verniciata di nero. L'assorbitore ha una capienza di 7 dm<sup>2</sup>, all'interno di esso è fissato un supporto basculante, con area di 8,64 m<sup>2</sup>, dove verranno appoggiate le varie pentole (Fig. 29). La caratteristica principale di tale supporto è quella di poter ruotare a 360° mentre il forno viene inclinato o spostato, in modo da poter mantenere in una posizione di equilibrio le pentole che saranno appoggiate proprio su tale supporto.



**Fig. 29** - Tavola 4, sezione assorbitore e dettaglio del supporto basculante

Di seguito verranno elencate le caratteristiche dei materiali e degli elementi e degli elementi che costituiscono tale forno solare e le principali differenze tra il nostro forno e il prototipo dell'Ingegnere Crovatto.

## 3.3 Materiali utilizzati

### 3.3.1 Vernice

Nel progetto dell'Ingegnere Crovato la vernice utilizzata è una comune vernice nera. Quella che è stata utilizzata nel nostro forno solare, è un rivestimento ottico specifico per applicazioni nel campo del solare termico. Le principali differenze tra le due vernici sono che quest'ultima ha un'elevata tolleranza alle alte temperature, è resistente all'umidità e al degrado dei raggi UV e, infine ha delle eccellenti proprietà ottiche quali:

- Emissività  $\epsilon$  (capacità di un materiale di irraggiare energia) compresa tra 0,20 e 0,49 a seconda dello spessore dello strato, come è possibile vedere in Fig. 30;

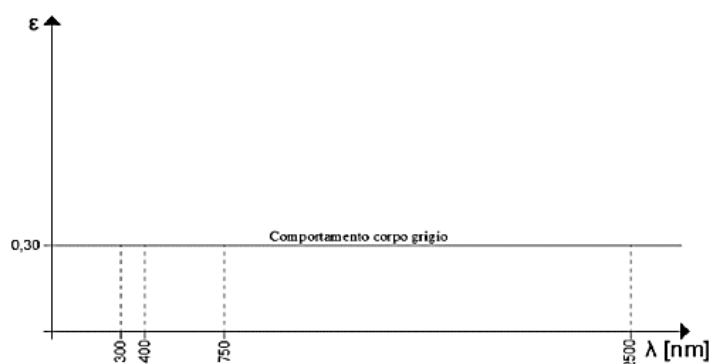


Fig. 30 - Emissività

- Assorbimento (capacità di un oggetto di catturare) compreso tra 0,88 e 0,94, mostrato in Fig. 31;

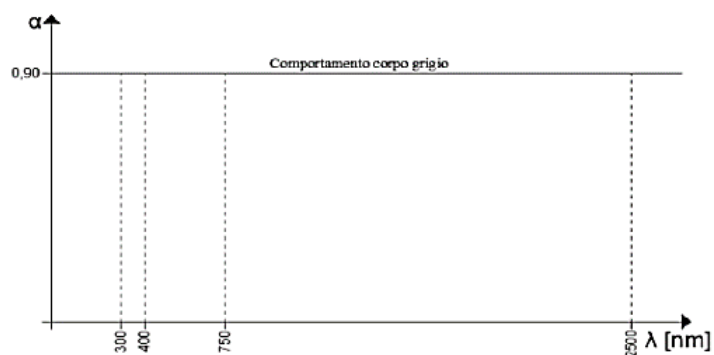


Fig. 31 - Assorbimento

- Termicamente tollerante a temperature comprese tra  $-73^{\circ}\text{C}$  e  $+538^{\circ}\text{C}$ .

### 3.3.2 Specchi in alluminio

Per cercare di aumentare al massimo l'efficienza del forno in relazione alla concentrazione dei raggi solari, è stata adottata una doppia fila di specchi in alluminio, che differiscono però dalle lastre di alluminio comunemente usate. In Fig. 32 si nota la stratigrafia di tali lastre, con alluminio del tipo MIRO-SUN Weatherproof Reflective 90, le quali garantiscono una riflessione dei raggi solari pari al 94%, mentre il restante 6% viene assorbito dallo specchio, surriscaldandolo.

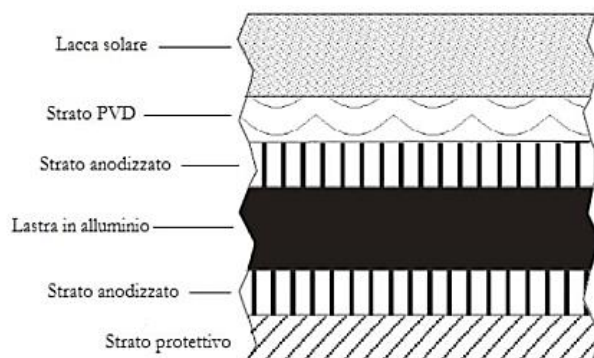
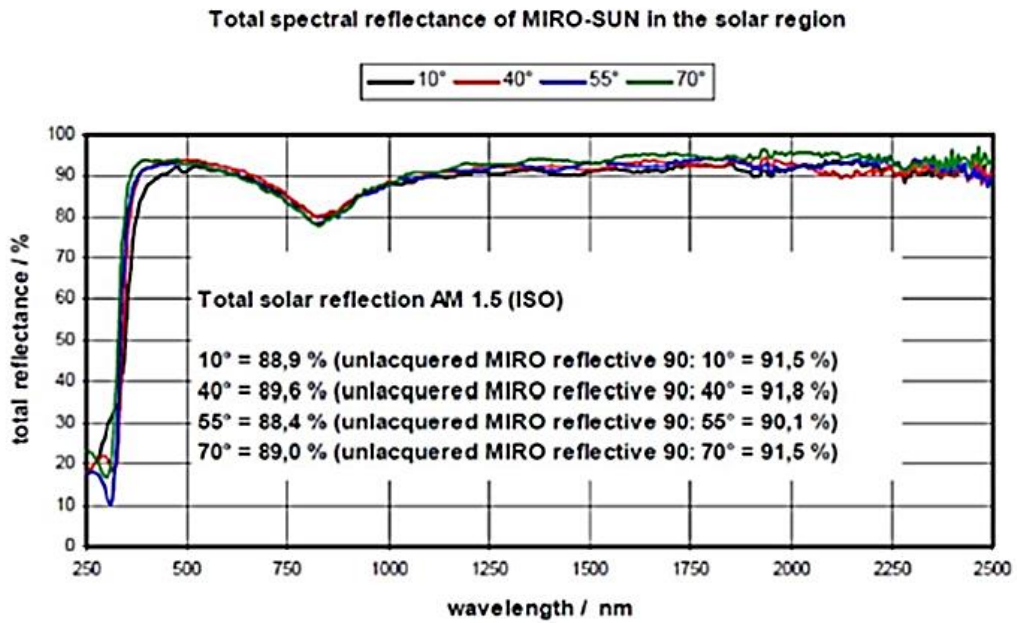


Fig. 32 - Stratigrafia della composizione dei fogli di alluminio

Lo strato in PVD è utile, in quanto, grazie a questo, i fogli in alluminio ottengono una luce di riflessione totale massima. È importante che, nonostante la possibile diversificazione dell'angolo di incidenza che potrebbe variare da  $0^\circ$  a circa  $80^\circ$ , tale strato abbia un colore neutro. Al fine di ottenere i massimi risultati e di rispettare i parametri imposti, è fondamentale concentrarsi su lunghezze d'onda più corte, ad esempio tra 480 e 500 nm. Facendo riferimento a queste considerazioni, la riflessione massima viene raggiunta con un angolo di incidenza pari a circa  $40^\circ$ . Per l'efficienza di questo foglio di alluminio è importante considerare l'area di assorbimento dei fogli. Nel grafico in figura 33 viene esplicitata la totale riflessione spettrale degli specchi in questione in riferimento al campo visivo. Tale grafico relativo agli specchi in alluminio, preso dalla scheda tecnica del materiale utilizzato, mette in relazione la riflettanza totale in percentuale e la lunghezza d'onda in nanometri riferita allo spettro solare.



**Fig. 33** - Riflessione alluminio

### 3.3.3 Vetro

Per il coperchio superiore dell'assorbitore, è stato utilizzato un doppio vetro temprato di spessore 4 mm e con trasmittanza pari al 90%, cioè molto resistente e avente capacità di scambiare molto più calore di un comune vetro. La riflettenza e l'assorbanza sono invece rispettivamente del 8% e del 2%.

Questo doppio vetro andrà a formare un coperchio, avente struttura dodecagonale in legno con al centro i due vetri circolari di raggio 23,2 cm e 23,6 cm.

Nelle tabelle seguenti, vengono riportate le caratteristiche energetiche del materiale.

**Tabella 5** - Caratteristiche luminose del vetro

| CARATTERISTICHE LUMINOSE (EN 410)            | EN 410 |
|--|--------|
| Trasmisione luminosa - $t_v$ (%)             | 92     |
| Riflessione luminosa - $\rho_v$ (%)          | 8      |
| Riflessione interna - $\rho_{vi}$ (%)        | 8      |
| Indice di resa dei colori - RD65 - $R_a$ (%) | 100    |

**Tabella 6 - Caratteristiche energetiche del vetro**

| CARATTERISTICHE ENERGETICHE                   | EN 410 | ISO 9050 |
|---|--------|----------|
| Fattore solare - g (%)                        | 91     | 91       |
| Riflessione energetica - pe (%)               | 8      | 8        |
| Trasmissione energetica diretta - te (%)      | 91     | 90       |
| Assorbimento energetico - ae (%)              | 1      | 2        |
| Coefficiente di shading - SC                  | 1.05   | 1.05     |
| Trasmissione dei raggi ultravioletti - UV (%) | 85     |          |
| Selettività                                   | 1.01   | 1.01     |

**Tabella 7 - Altre caratteristiche del vetro**

| ALTRE CARATTERISTICHE                               |     |
|---|-----|
| Resistenza al fuoco - EN 13501-2                    | NPD |
| Reazione al fuoco - EN 13501-1                      | A1  |
| Resistenza ai proiettili - EN 1063                  | NPD |
| Resistenza agli attacchi manuali - EN 356           | NPD |
| Resistenza agli urti (Prova del pendolo) - EN 12600 | NPD |

**Tabella 8 - Riduzione acustica del vetro**

| RIDUZIONE ACUSTICA  |                            |
|---|----------------------------|
| Isolamento al rumore aereo diretto (Rw (C;Ctr) - EN 12758) - dB | 30 (-2; -4) <sup>(1)</sup> |

**Tabella 9 - Spessore e peso del vetro**

| SPESSORE E PESO           |    |
|---------------------------|----|
| Spessore nominale (mm)    | 4  |
| Peso (kg/m <sup>2</sup> ) | 10 |

### 3.3.4 Isolamento e modifiche apportate

Per fare in modo che all'interno del dispositivo la temperatura sia sufficientemente alta, le pareti del contenitore sono state inizialmente isolate in modo da ridurre al minimo le perdite di calore. E' stata quindi riempita l'intercapedine tra il legno strutturale, di spessore 7 mm e la lamiera, di spessore 6 mm, con uno strato di circa 10 cm di lana di vetro con conducibilità compresa tra 0,032 e 0,053 W/(m K). Si sono però riscontrati dei problemi con l'utilizzazione della lana di vetro durante i test sperimentali, in quanto raggiungendo temperature elevate (ordine di qualche centinaia di gradi), essa ha iniziato ad incenerirsi creando fumi (Fig. 34).



**Fig. 34** - Lana di vetro bruciata durante un test sperimentale

Sono state così apportate delle modifiche in modo da evitare questo fenomeno, sostituendo i blocchetti in legno che fungevano da supporto strutturale all'assorbitore con blocchetti di silicati e completando il tutto con l'inserimento della vermiculite (attraverso i quattro fori che fungono da sfiato), ottenendo dei risultati estremamente positivi a livello di isolamento del forno solare. Per migliorare ancora di più questo aspetto sono state reinserte le cerniere della porta del forno che è tornato a chiudere regolarmente nelle battute dedicate andando a sigillare l'apertura. Sono state sostituite tutte le parti in lana di vetro che facevano da tenuta sulle pareti del coperchio del forno e sulle tenute del vetro. È stato implementato notevolmente il quantitativo di vermiculite all'interno del forno stesso in quanto avendolo aperto per il cambio della lana di vetro, abbiamo potuto raggiungere parti che nel precedente riempimento (forno chiuso, solo attraverso i quattro fori) non erano state raggiunte. In questo modo il forno risulta maggiormente isolato e nelle parti dove le fughe di calore sono possibili sono stati ripristinati i giusti contatti con conseguenti fughe di calore ridotte al minimo.



## Vermiculite

La vermiculite è un prodotto assolutamente naturale, molto impiegato per le sue proprietà meccaniche e fisiche: in edilizia (come isolante o nelle finiture), in agricoltura (come materiale di drenaggio, di veicolo o “carrier” per pesticidi, fertilizzanti e altri), in alcune industrie (ignifugo, lubrificante solido). La normale vermiculite, utilizzata in edilizia si presenta come una “ghiaia” grossolana e molto leggera, fatta di “croste” irregolari della dimensione normalmente di 1-2 cm di diametro, come è facilmente visibile dalla sottostante figura (Fig. 35).



**Fig. 35** - Vermiculite

I singoli frammenti hanno un colore grigio-giallo e sono luccicanti come se fossero dorati o ricoperti di una patina metallica. Ad un esame più attento, le singole “croste” sono formate da molte lamelle tutte impilate, e se premute con le dita si schiacciano molto facilmente, risultando tenere.

Tutte queste caratteristiche derivano dal fatto che la vermiculite altro non è che una normalissima idromica, cioè un composto appartenente alla classe dei filosilicati; più in dettaglio è la forma laminare idratata di un comune filosilicato a ferro, magnesio e alluminio. I filosilicati e le idromiche sono una categoria di minerali che possono essere molto complessi, ma che hanno in comune un certo tipo di struttura e alcune caratteristiche chimiche. Le lamine di vermiculite, riscaldate rapidamente ad una temperatura di circa 300°C, perdono acqua, che si trasforma in vapore, e si sfogliano, espandendosi (anche 25 volte il volume originario) in direzione perpendicolare ai piani di sfaldatura e assumono forme contorte di aspetto vermiculare e appunto presentano questa luminosità giallo-dorata.

**Tabella 10** - Caratteristiche fisiche della vermiculite utilizzata

| <b>DATI TECNICI</b>               |  |
|-----------------------------------|--|
| peso specifico                    | 70 - 130 kg/m <sup>3</sup> (in relazione alle frazioni)                |
| densità                           | 2,6 kg/m <sup>3</sup>  |
| conduttività di calore            | 0,049 W/mK   |
| calore specifico                  | 0,8 do 1,1kJ/KgK (0,2-0,26 kcal/kg/K)                                  |
| scambio cationico                 | 50 do 150 me/100g  |
| capacità di ritenzione dell'acqua | 220%-235% in relazione al peso<br>oz. 60 do 90% in relazione al volume |

E' un materiale di notevole importanza industriale; sottoposta a parziale cottura, da un prodotto molto leggero, utilizzato da solo o mescolato a sostanze cementizie nell'edilizia, come isolante termico e acustico. Trova impiego anche nell'industria della plastica, dei colori, cartaria e agraria. Viene anche utilizzata sotto forma di polvere per raffreddare gradualmente saldature che vanno oltre 700 gradi in modo che non si formino né crepe né shock termici. Trova impiego anche come isolante antincendio.

Nella figura 36 che segue è possibile notare l'utilizzo che abbiamo fatto della vermiculite per poter aumentare le capacità di isolamento termico del nostro forno solare, il quale raggiunge temperature molto elevate.



**Fig. 36** - Vermiculite inserita nello sportello del nostro forno solare

### **Lastre di silicati**

Le lastre a base di silicato di calcio a matrice minerale idrata, sono ottenute attraverso un sistema di produzione brevettato, con una massa volumica di circa  $875 \text{ kg/m}^3$ .

Le proprietà principali di questo minerale sono: leggerezza, stabilità in caso di incendio, incombustibilità (classe A1 di Reazione al Fuoco secondo le Euroclassi), alti spessori e grandi dimensioni, resistenza nel tempo ed eccellente prestazione al fuoco.

La composizione dei blocchi che sono stati utilizzati per migliorare l'isolamento del nostro forno solare è caratterizzata da calcio silicato e additivi selezionati.

Tali lastre in silicato sono applicate nelle più usuali protezioni al fuoco dove si richiedono contemporaneamente leggerezza ed alte prestazioni. In particolare viene utilizzato nelle seguenti applicazioni:

- a protezione dei solai di uso più comune, sia in aderenza/semiaderenza che come controsoffitto pendinato fino ad una resistenza di 120 minuti in accordo alla norma EN 1365-2;
- come controsoffitto indipendente fino ad una resistenza di 120 minuti in accordo alla norma EN 1364-2;
- a protezione di pareti, in mattoni, cemento o come tramezzature autoportanti, fino ad una resistenza di 180 minuti in accordo alla norma EN 1364-1;
- a protezione di pareti portanti in legno fino ad una resistenza di 60 minuti in accordo alla norma EN 1365-1.

La tabella 11 seguente mostra le caratteristiche tecniche dei silicati da noi utilizzati.

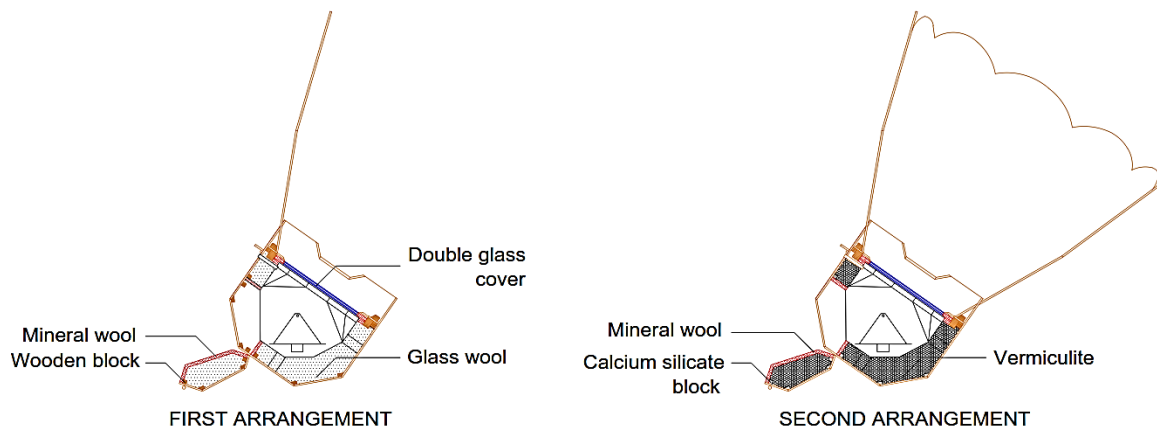
**Tabella 11** - Dati tecnici delle lastre in silicato

| <b>DATI TECNICI</b>                        |  |
|--|--|
| <b>Massa volumica</b>                      | c.a. 875 kg/m <sup>3</sup>   |
| <b>Dimensioni</b>                          | 1200 x 2500 mm   |
| <b>Spessori</b>                            | 8, 9, 10, 15, 18, 20, 25 mm  |
| <b>Tolleranza in larghezza</b>             | +/- 3 mm   |
| <b>Tolleranza in spessore delle lastre</b> | +/- 0,5 mm   |
| <b>Resistenza al fuoco</b>                 | Fino ad R/REI 120 ed EI 180 per le più comuni applicazioni in orizzontale e verticale  |
| <b>Modulo di elasticità</b>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>• longitudinale 2500 N/mm<sup>2</sup></li> <li>• trasversale 2700 N/mm<sup>2</sup></li> </ul> |
| <b>Resistenza alla flessione</b>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• longitudinale 6,0 N/mm<sup>2</sup></li> <li>• trasversale 4,0 N/mm<sup>2</sup></li> </ul>   |
| <b>Resistenza alla trazione</b>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• longitudinale 2,0 N/mm<sup>2</sup></li> <li>• trasversale 1,7 N/mm<sup>2</sup></li> </ul>   |
| <b>Resistenza alla compressione</b>        | 9 N/mm (10%)   |
| <b>Conducibilità termica</b>               | c.a. 0,285 W/m*K   |
| <b>Grado di acidità (pH)</b>               | c.a. 7   |



**Fig. 37** - Vista interna dello sportello del forno solare con ai lati le lastre di silicato utilizzate

Subito sotto vengono inserite le sezioni del forno prima e dopo le modifiche. In questo modo è facilmente riscontrabile quello descritto sopra in termini di inserimento di vermiculite e blocchetti di silicato:



**Fig. 38** - Tavola 5, sezioni esplicative isolamento

## 4. Realizzazione di un forno a concentrazione

---

### 4.1 Premessa

Il forno solare a cui si fa riferimento in questo capitolo è un tipo di forno solare a concentrazione costruito sempre all'interno del Dipartimento di Ingegneria Industriale e Scienze Matematiche (DIISM) dell'Università Politecnica delle Marche. Tale forno solare prende spunto da un progetto di un'azienda danese, la Heliac ApS, la quale si occupa di ricercare metodi nuovi, ecosostenibili e poco costosi per poter fornire energia a più persone possibili e nel modo più veloce possibile.

### 4.2 Tipologia di forno realizzato

Il forno Heliac, Fig.39, ha una struttura reticolare stabile in legno realizzata per permettere diverse inclinazioni della lente utilizzata per concentrare i raggi e della superficie riflettente. Il forno in esame è stato oggetto di studio al fine di creare un modello ad alta efficienza.

Il prototipo è costituito principalmente da un supporto reticolare in legno montato su ruote per consentire un facile trasporto della struttura che risulta pesante e ingombrante per essere trasportata manualmente.

Di fondamentale importanza sono due cornici posizionate in maniera strategica:

- la prima, più grande, contenente la lente necessaria alla concentrazione dei raggi. Più grande è la lente, più raggi è possibile convogliare nello stesso punto. La lente è costituita da un unico foglio in plastica, molto sottile e leggero;
- la seconda, più piccola, in cui è posizionata la superficie riflettente in grado di orientare i raggi solari concentrati dalla lente nel punto scelto.

Il piano cottura, è realizzato con una piastra in acciaio, è forato al centro per permettere il passaggio della radiazione solare concentrata e dunque riscaldare la pentola che viene posizionata su tale foro. Infine, all'estremità superiore è stata realizzata una copertura con un telo per creare una zona d'ombra. Questo è stato pensato per un maggiore comfort dell'utente in quanto l'utilizzo di tale forno è limitato alle ore di sole e caldo intensi.



**Fig. 39** - Prototipo Heliac realizzato in laboratorio

### **4.3 Caratteristiche geometriche del forno**

Per una buona funzionalità del forno le dimensioni del prototipo sono uno degli aspetti più importanti. Il forno nel suo insieme ha una altezza di circa 205 cm, una larghezza di 140 cm, per una profondità di 96 cm. Queste misure fanno riferimento al forno in condizione di non utilizzo, quando cioè la lente non si trova in funzione (Fig.40).

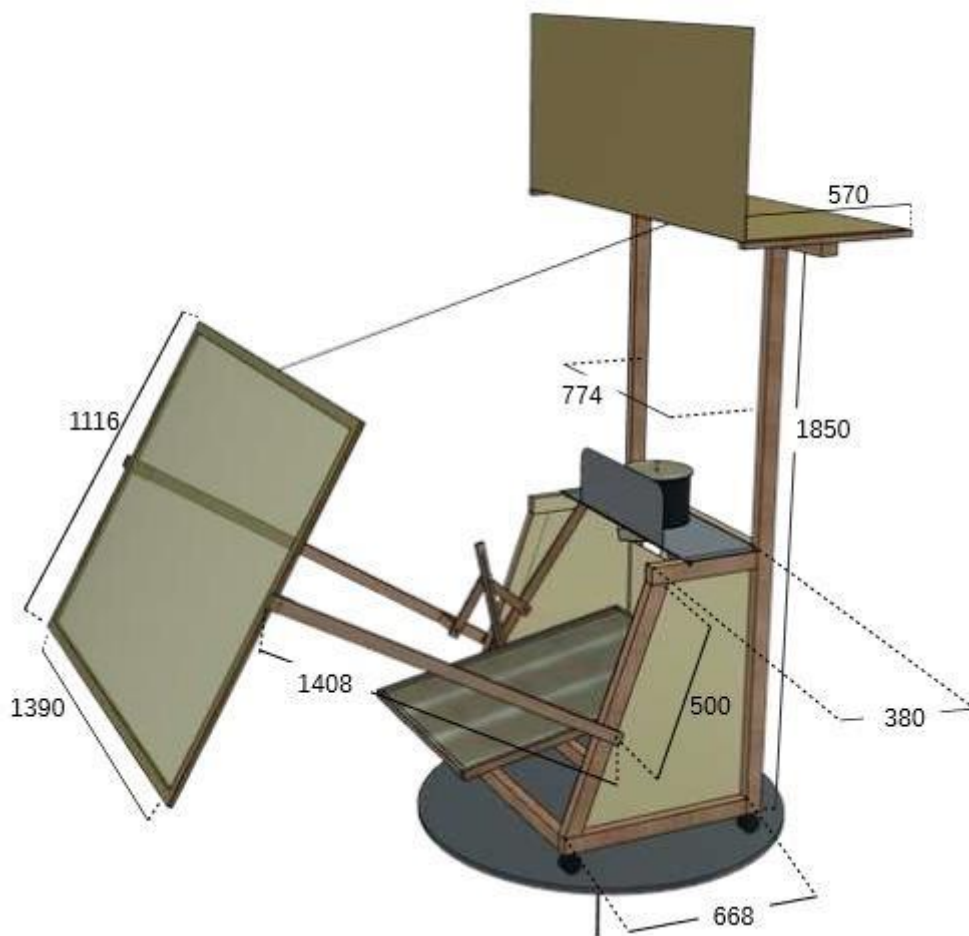


**Fig. 40** - Foto del forno Helioac chiuso

La lente ha dimensioni 112x139 cm ed è collegata alla struttura principale grazie a due assi in legno, di lunghezza 141 cm, che ne consentono la rotazione da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  per far sì che la lente si trovi perpendicolare ai raggi solari. Una volta ruotata la lente secondo la massima angolazione, la profondità del forno sarà di 235 cm circa. La lente è di fondamentale importanza in quanto, essendo il suo compito quello di concentrare i raggi solari, maggiori sono le sue dimensioni e maggiore sarà la potenza del forno stesso.

È chiaro che l'ingombro totale del forno cambia a seconda che ci si trovi nella situazione di utilizzo oppure no. Considerate le grandi dimensioni del forno solare, sono state montate delle ruote alla base della struttura per consentirne un trasporto più facile e la rotazione di tutto il telaio durante le fasi di test. Una schematizzazione della struttura nelle sue dimensioni è riportata in Fig. 41.





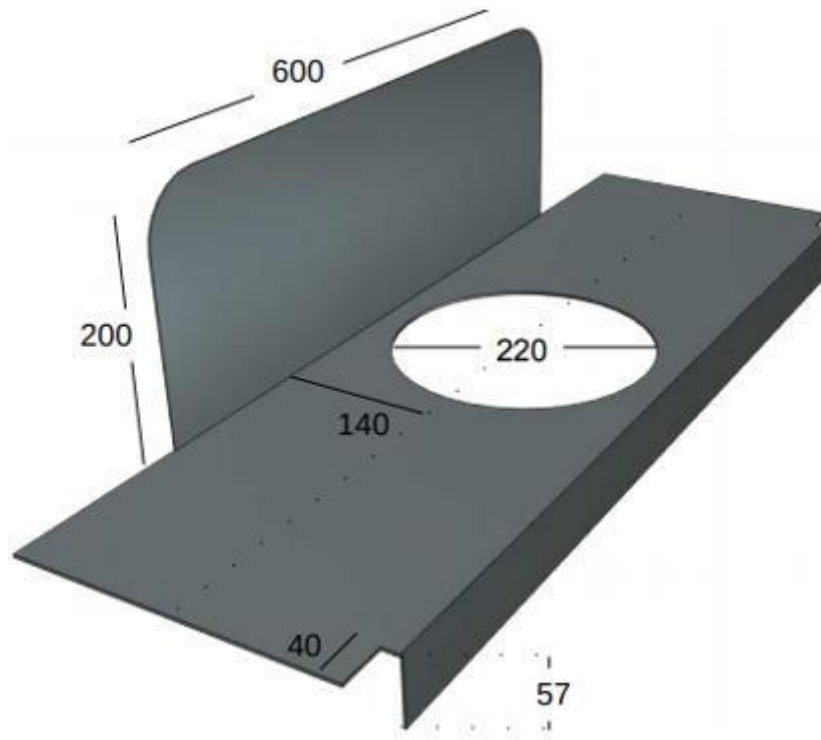
**Fig. 41** - Dimensioni forno Heliac [6]

Il forno è composto frontalmente, oltre che da una lente, anche da una superficie riflettente. Tale superficie è fissata ad una cornice di dimensioni 73x90 cm (Fig. 42) a cui è stato incollato un pannello in legno compensato delle stesse dimensioni, ma di spessore 3 mm, per rendere il foglio riflettente più stabile e preciso.



**Fig. 42** - Cornice della superficie riflettente [6]

Il piano cottura è stato ricavato da una lastra di alluminio di spessore 2 mm e dimensioni di 337x850 mm. Agli angoli sono stati ritagliati quadrati di uguali dimensioni (40x67 mm) per rendere possibile l'appoggio della lamiera al supporto in legno, mentre al centro è stato realizzato un foro di diametro 220 mm per consentire il passaggio dei raggi solari. Infine, un'altra piastra verticale avente una lunghezza di 600 mm e un'altezza di 200 mm è stata fissata alla prima (Fig. 43).



**Fig. 43** - Piano di cottura [6]

#### **4.4 Materiali utilizzati**

Per la realizzazione del forno sono stati utilizzati per lo più materiali facilmente reperibili e dai bassi costi per fare in modo che lo strumento ottenuto sia il più efficiente possibile e per consentire di produrre calore a costi così bassi che i pannelli Heliac possono competere con qualsiasi altro metodo di produzione di calore quasi ovunque nel mondo [6].

La struttura portante è composta esclusivamente da legno. Le assi di legno sono state ricavate da materiale di riciclo, tagliate, piallate e levigate in laboratorio in modo da renderle idonee all'assemblaggio. Sono stati creati listelli di varie dimensione e forma (Fig. 44).



**Fig. 44** - Assi di legno di diverse misure

Per fare in modo che queste assi di legno fossero più resistenti al calore dei raggi solari, si è provveduto a verniciare ogni componente con una speciale vernice ignifuga a base di resine acriliche/siliconiche, applicate come unico prodotto nella protezione della superficie, Fig. 45. Tale vernice ha la capacità di resistere a temperature fino a 450 °C.



**Fig. 45** - Verniciatura delle assi di legno

L'assemblaggio è avvenuto per mezzo di viti e bulloni che hanno permesso di creare una struttura reticolare solida.

Non essendo una struttura di piccole dimensioni, si è reso necessario l'utilizzo di ruote per facilitare il trasporto.

L'elemento utilizzato per la realizzazione del piano cottura è una lastra di alluminio di spessore 2 mm e dimensioni 337x850 mm. Al centro di tale lastra è stato praticato un foro di diametro 220 mm per permettere il passaggio del fascio di luce (Fig. 46). Anche la copertura del foro è stata realizzata con una lastra in alluminio.



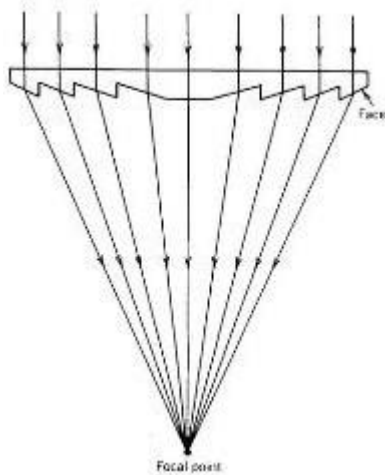
**Fig. 46** - Lastra in alluminio

Per quanto riguarda la lente che ha il compito di rifrangere, ovvero di concentrare, i raggi solari su una superficie ridotta, così come farebbe una lente di ingrandimento, è stato utilizzato un sottile foglio di materiale polimerico. L'azienda Heliac ha sviluppato un processo per creare un film trasparente con un profilo che imita la forma della lente di fresnel tradizionale ma a costi più bassi. La lente utilizzata ha dimensioni 1116x1390 mm, come quella in Fig. 47.



**Fig. 47** - Lente di materiale polimerico

Il principio di rifrazione è riportato nella Fig. 48.

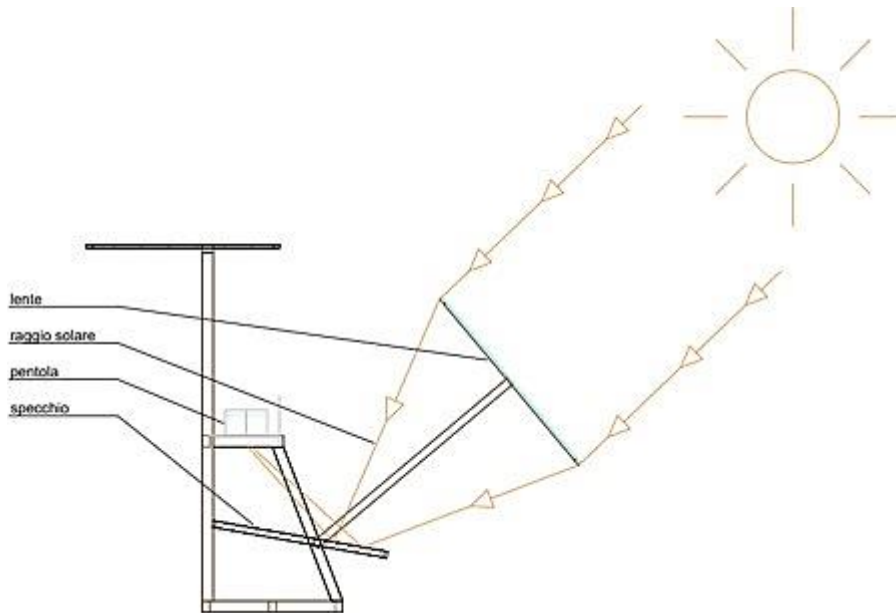


**Fig. 48** - Principio di rifrazione della lente [6]

Infine, lo specchio usato per il forno Heliac è una pellicola speciale che riflette non soltanto la frazione di radiazione solare cosiddetta visibile, ovvero quella che anche i nostri occhi sono in grado di percepire, ma anche le frazioni ultravioletta ed infrarossa che rappresentano un contributo non trascurabile all'energia totale trasmessa. Per poter ottenere il massimo risultato, è necessario che tale pellicola sia sempre pulita e in tensione, altrimenti il fascio di luce risulta essere meno concentrato e quindi, dissipando energia, meno efficace.

## 4.5 Principio di funzionamento

Il forno studiato è stato realizzato secondo le specifiche riportate da Heliac ApS, azienda specializzata nel solare termico. Il funzionamento alla base dello strumento è semplice (Fig. 49): grazie all'utilizzo della speciale lente rettangolare, il forno Heliac concentra un fascio luminoso in direzione di una superficie a specchio, che a sua volta riflette i raggi solari verso un piano di cottura [6].



**Fig. 49** - Schematizzazione del funzionamento di un forno Heliac [6]

Il principio fisico che regola il funzionamento della lente plastificata è lo stesso delle lenti in vetro che si utilizzano per vedere i dettagli più minuti. Se la lente è ben allineata con il sole sarà possibile concentrare l'energia solare in un unico fascio e indirizzarlo in una superficie più ristretta che corrisponde, all'incirca, al centro della superficie dello specchio posto nella parte inferiore del forno. Lo specchio, inclinato secondo un preciso angolo, sarà in grado di riflettere la radiazione solare verso il punto scelto che in questo caso è il piano di cottura e più precisamente il fondo della pentola. Per far sì che il fascio di luce arrivi sempre a colpire il punto prestabilito è necessario l'intervento di un operatore che si occupi di mantenere la lente inclinata in direzione del sole e regoli di conseguenza il riflesso dello specchio. Sarà inoltre necessario ruotare periodicamente, circa ogni 5/10 minuti, l'intera struttura per fare in modo che le prestazioni siano sempre massime. In questo modo e con dei tempi idonei, sarà possibile la cottura dei cibi o il loro riscaldamento.

## 5. Realizzazione di un forno a media efficienza

---

### 5.1 Premessa

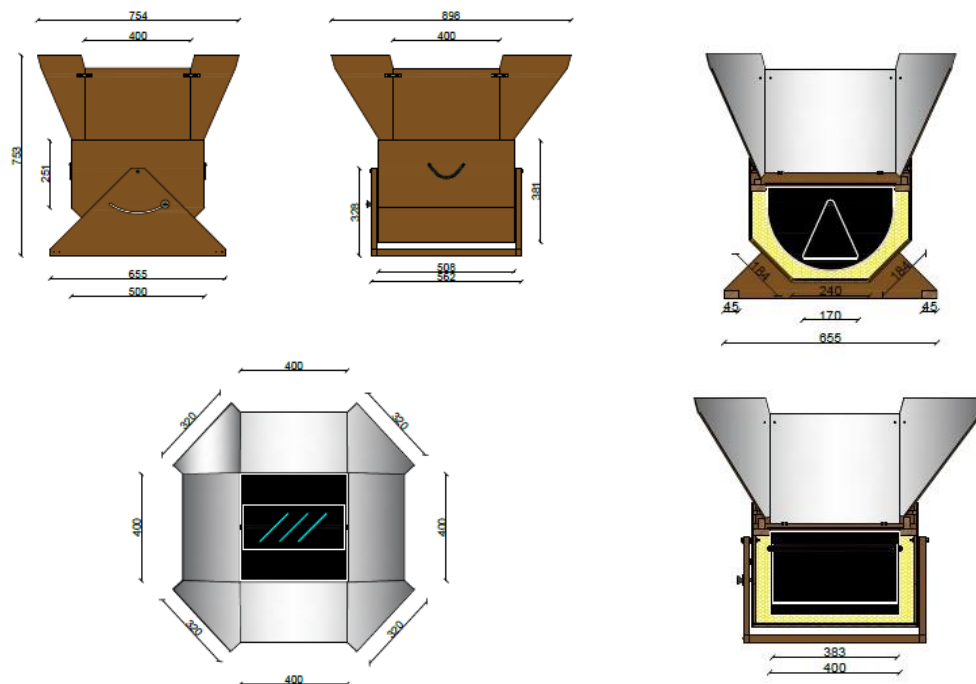
Il forno solare di cui tratteremo è un prototipo a media efficienza costruito all'interno del Dipartimento "DIISM" della facoltà di Ingegneria, presso l'Università Politecnica delle Marche.

Per la realizzazione sono stati seguiti i disegni e dettagli realizzativi del prototipo ideato dall'Ing. Gianni Crovatto [16].



**Fig. 50** - Prototipo dell'Ing. Crovatto [16]

Il forno ha una altezza massima di 753 mm e pesa 20,1 Kg. Al fine di migliorare le prestazioni e quindi ottimizzare l'utilizzo di questo forno, sono state progettate, e successivamente messe in atto, alcune modifiche utilizzando e studiando materiali più idonei allo scopo. Le principali modifiche apportate al prototipo iniziale, sono la vernice con la quale è stato dipinto l'assorbitore, l'alluminio utilizzato per la realizzazione degli specchi di riflessione ed il vetro attraverso il quale passano i raggi solari. Il forno da noi studiato è costituito da un contenitore interno che funge da camera di cottura con un coperchio superiore vetrato, affinché entrino all'interno dell'assorbitore i raggi solari. Dopo aver definito l'oggetto e i requisiti che esso deve possedere, si andranno ad analizzare le fasi principali della progettazione, svizzerando il processo che ha portato alla creazione di questo manufatto.



**Fig. 51** - Dimensioni forno a media efficienza

## 5.2 Fasi di lavorazione

La costruzione del nostro prototipo prevede 4 principali fasi di lavorazione, ovvero:

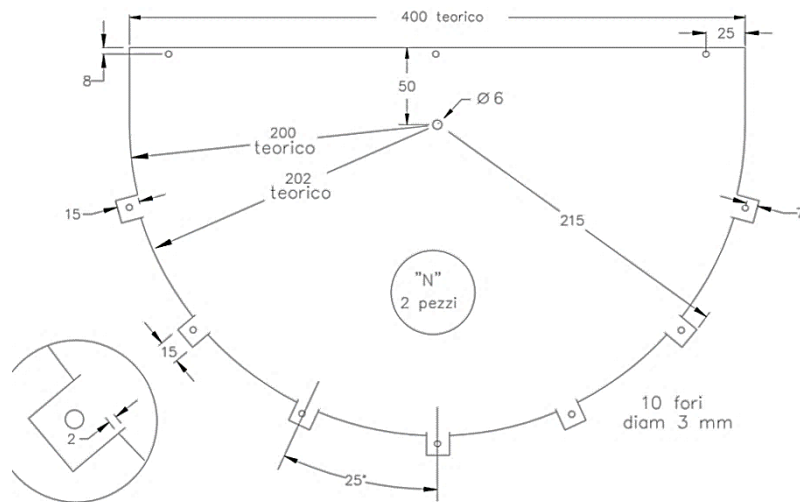
- realizzazione della camera di cottura e verniciatura;
- realizzazione della scatola esterna;
- isolamento con lana di vetro;
- sistema di concentrazione dei raggi solari.

### 5.2.1 Realizzazione della camera di cottura

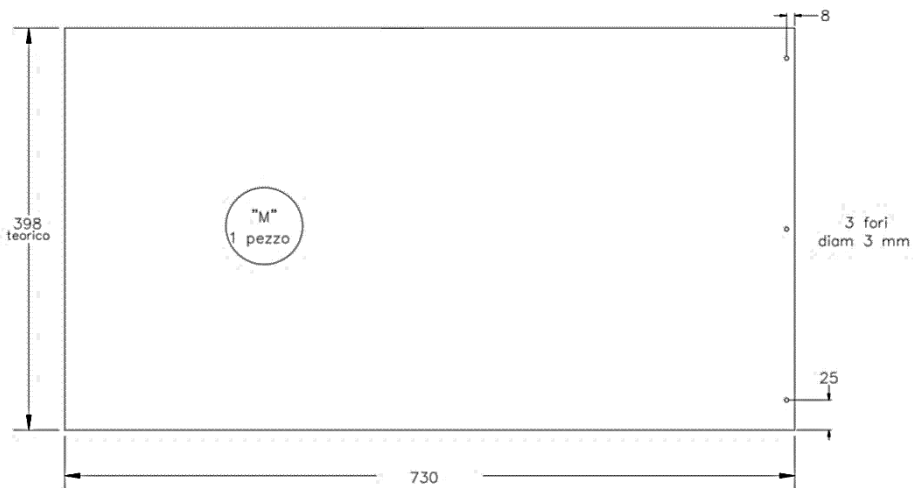
Il primo passo è stato quello di realizzare la camera di cottura, ovvero la parte centrale e più interna del forno solare, in cui sarà possibile cuocere il cibo. Partendo da una lamiera di acciaio inox sono stati tagliati, piegati ed infine rivettati i vari pezzi a formare l'assieme.

La realizzazione della camera di cottura interna inizia ricavandosi da una lamiera di acciaio inox i vari pezzi da assemblare.





**Fig. 52 - Pezzo "N" [16]**



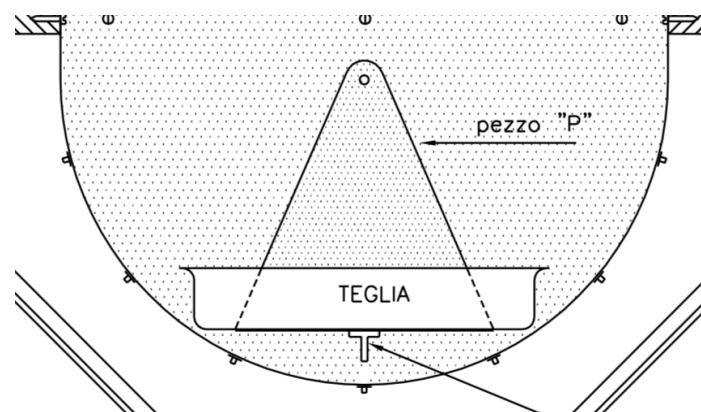
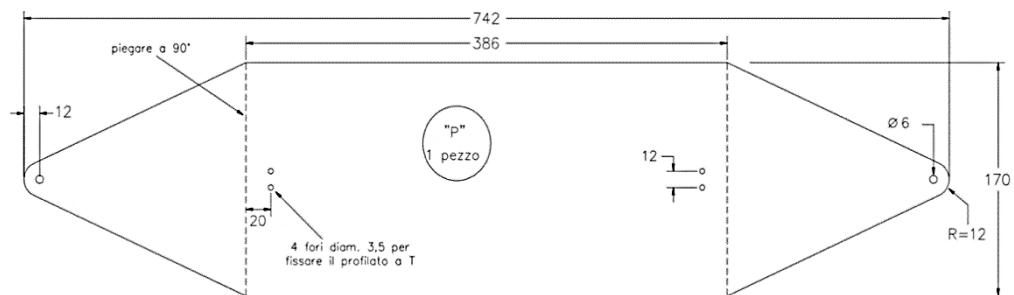
**Fig. 53 - Pezzo "M" [16]**

Tutti i pezzi in lamiera appena mostrati sono stati forati e piegati seguendo quanto descritto dalle precedenti immagini (Fig. 52, 53). Ultimate le operazioni di foratura e piegatura tutti i pezzi sono stati uniti per formare la scatola interna. Sono poi utilizzati le viti e i rivetti per assemblare i vari elementi, è opportuno sigillare le giunture con un sigillante ad alta temperatura ed atossico come quello utilizzato nei forni per alimenti.



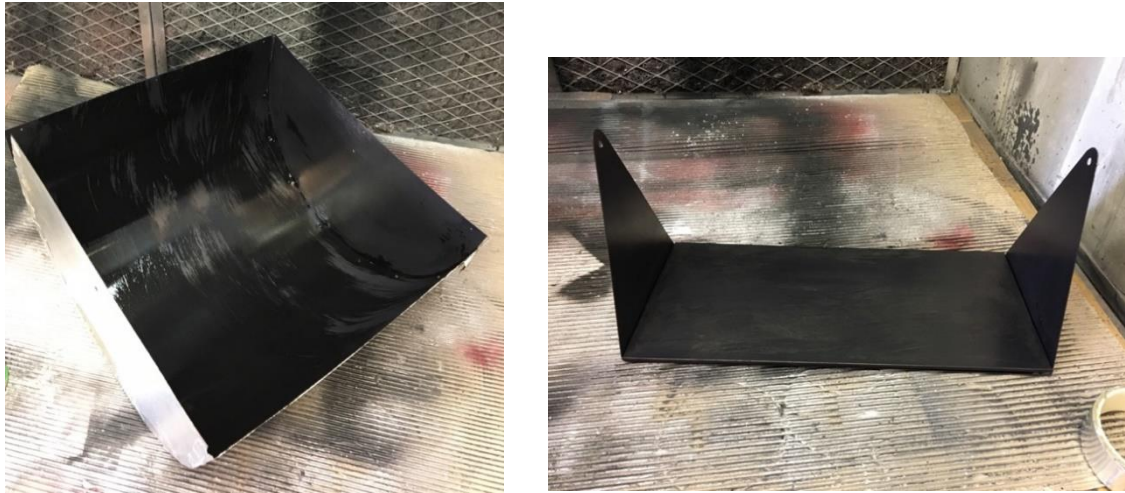
**Fig. 54 - Camera di cottura**

All'interno della camera di cottura viene posto un piano inclinabile, che ha lo scopo di supporto teglie, è ricavato da una lamiera di acciaio inox. Il pezzo "P" (Fig. 55) dovrà essere piegato con inclinazione di 90° lungo i lati più lunghi e dovrà essere disposto di due fori e due perni che consentano l'oscillazione una volta installato all'interno della camera di cottura.



**Fig. 55 - Pezzo "P" piegato e zavorrato [16]**

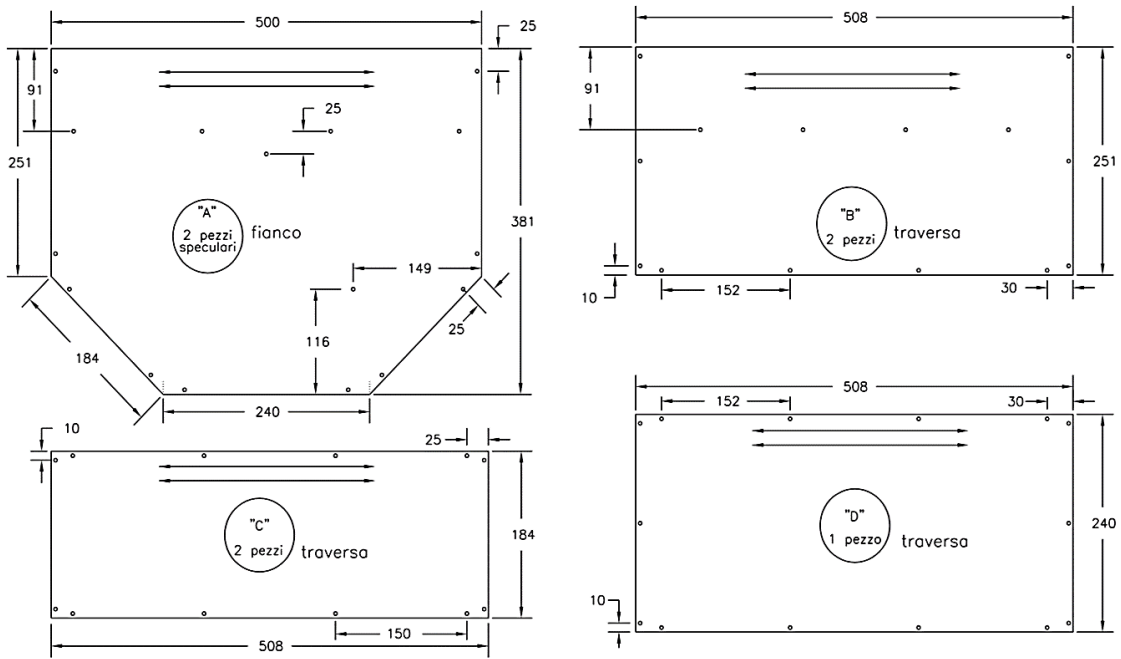
A questo punto si procede con la verniciatura di nero opaco con una vernice selettiva che ha una duplice funzione: assorbire il calore dei raggi solari e proteggere le parti metalliche dall'ossidazione. Sono pulite con alcool e successivamente rese ruvide le superfici da verniciare con carta vetrata. Non è necessario scartavetrare e verniciare le superfici che saranno a contatto con l'isolante termico e la parte inferiore del piano inclinabile. Vengono poi date due mani di vernice controllando che essa si depositi anche sui vari bordi.



**Fig. 56** - Verniciatura camera di cottura e piano inclinabile

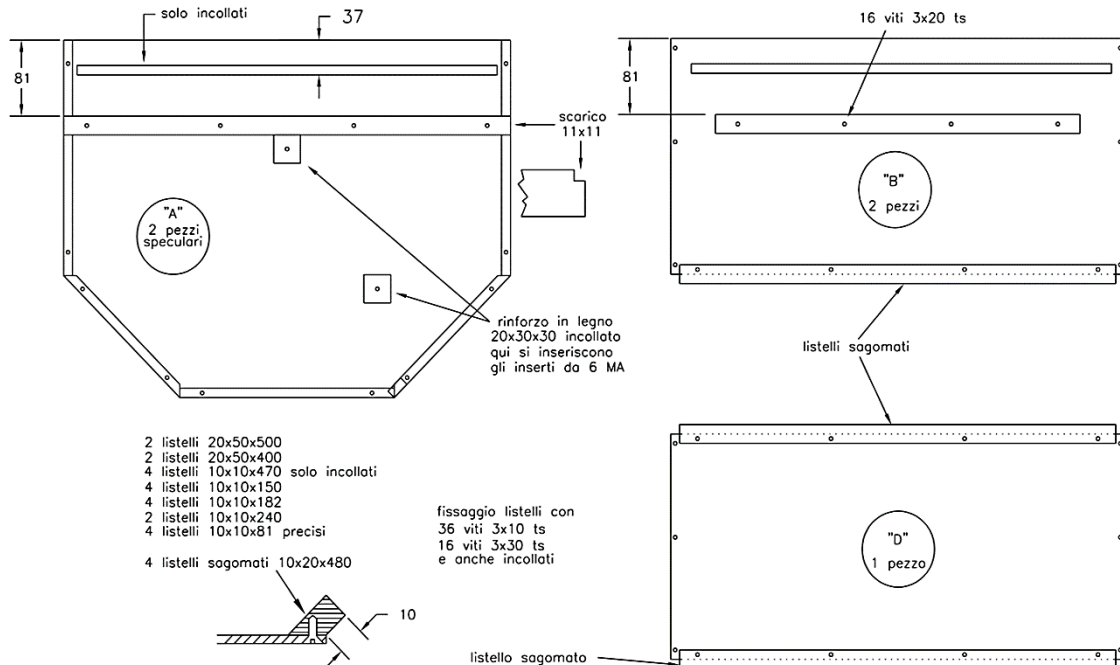
### **5.2.2 Realizzazione della scatola esterna**

La costruzione della scatola esterna inizia ricavando da fogli di legno "MDF" due fiancate "A", due fiancate "B", due pannelli inferiori "C" e un pannello inferiore "D". La lavorazione procede eseguendo i vari fori di diverso diametro.



**Fig. 57** - Pezzi che formano il corpo esterno [16]

Al fine di rinforzare i vari pezzi di compensato è previsto da progetto la realizzazione di uno scheletro di listelli in abete, una volta unito alle fiancate e alle traverse, renderà l'insieme corpo forno più stabile e resistente.



**Fig. 58** - Posizione dei listelli di rinforzo [16]

Vengono poi assemblati tutti i vari pezzi ricavati da pannelli in legno "MDF" a formare l'involucro esterno, la struttura è da noi rinforzata con uno scheletro costruito con listelli in

legno di abete. A questo punto sono create delle impugnature in grado di trasportare e sostenere l'intera mole del forno solare. Con dei pannelli in legno più robusti vengono realizzate le due parti che formano la base del forno e un sistema di bloccaggio della rotazione del forno.



**Fig. 59** - Involucro esterno



**Fig. 60** - Scatola esterna con basamento

La fase successiva prevede l'inserimento della camera di cottura all'interno della scatola esterna, posizionata all'incirca al centro mediante l'utilizzo di distanziali realizzati con listelli.

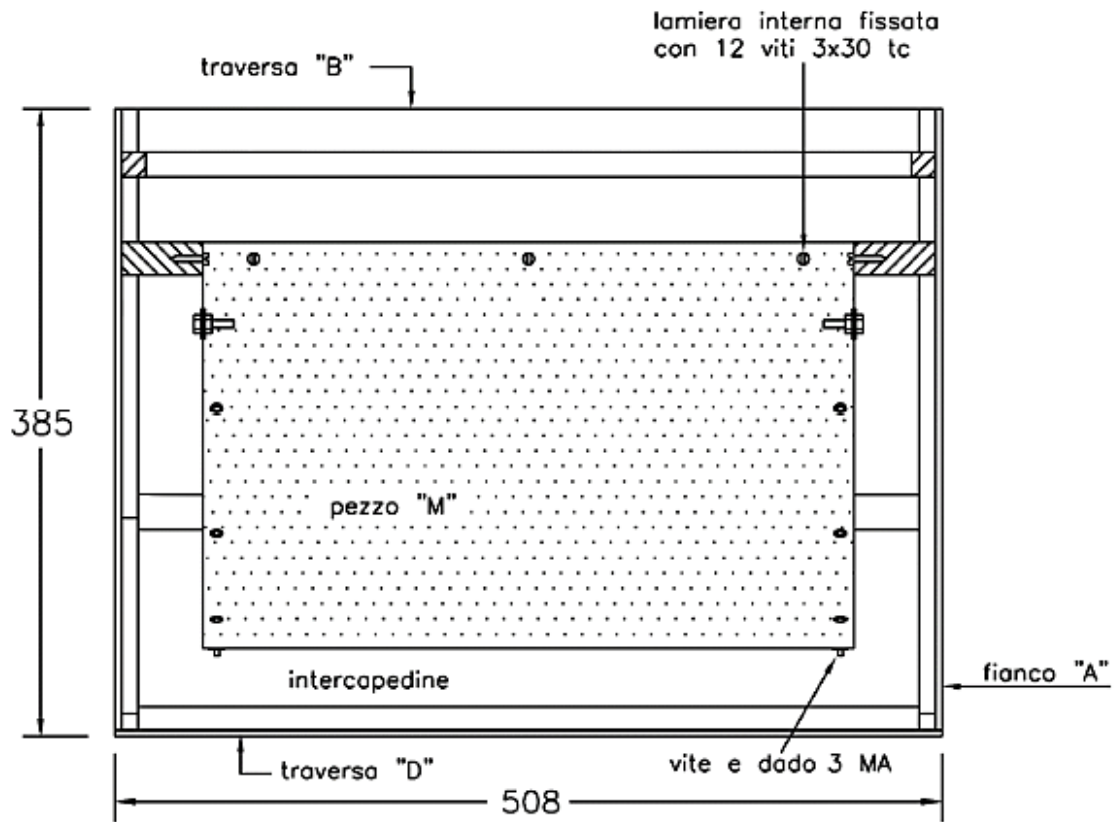


**Fig. 61** - Inserimento camera di cottura nell'involucro esterno

### **5.2.3 Isolamento con lana di vetro**

Una volta inserita e posizionata la camera di cottura in lamiera zincata all'interno del corpo del forno (utilizzando dei distanziatori di legno incollati ed avvitati sia alla parete esterna sia alla parete interna), si procede con l'isolamento termico della camera interna.

Si continua tagliando con un seghetto o un cutter i pannelli isolanti con delle forme piuttosto semplici (rettangolari o quadrati) e di grandezze più o meno simili a quelle delle pareti della camera interna.



**Fig. 621** - Distanziatori e isolamento camera interna [16]

L'isolamento termico del forno solare è completato inserendo, nelle fessure createsi tra la camera di cottura e il box esterno in "MDF", strati e fiocchi di lana di vetro. Infine, si effettua la chiusura ed il completamento della scatola del forno.



**Fig. 63** - Riempimento fessure con materiale isolante

L'ultima cosa da fare è evitare che l'umidità svergoli i pannelli di legno e per questo è consigliabile verniciare tutte le parti esterne in "MDF", prima di iniziare tale operazione è doveroso passare con la carta vetrata tutti gli spigoli, giunture, gobbe, eventuali tracce di colla al fine di rendere le pareti esterne del forno solare lisce e omogenee. È consigliabile passare la vernice flatting più volte.

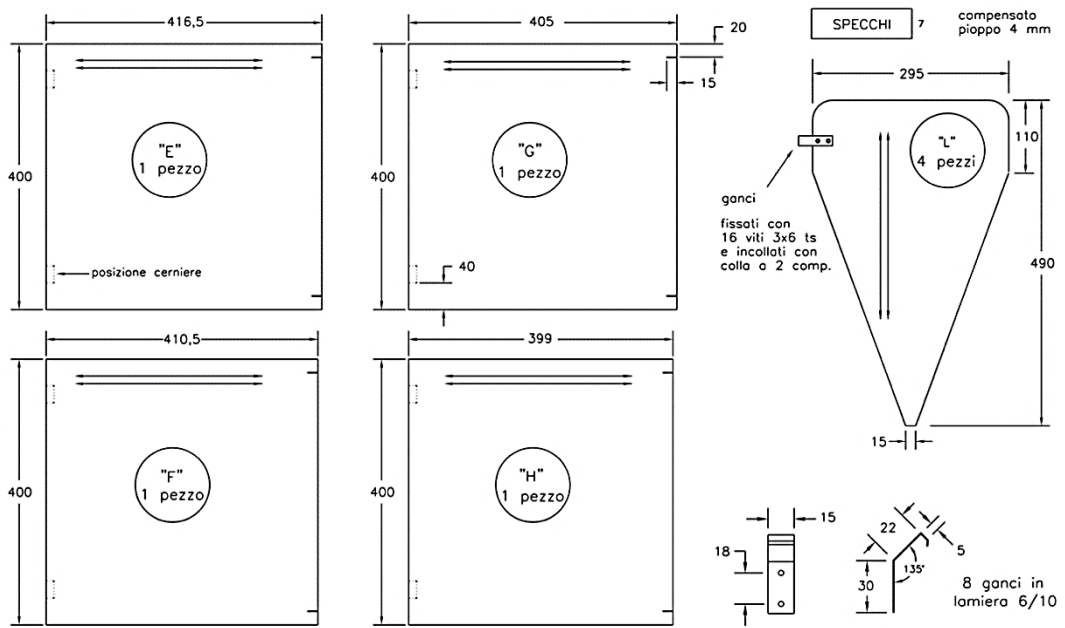




**Fig. 64** - Scatola forno verniciata

#### **5.2.4 Sistema di concentrazione dei raggi solari**

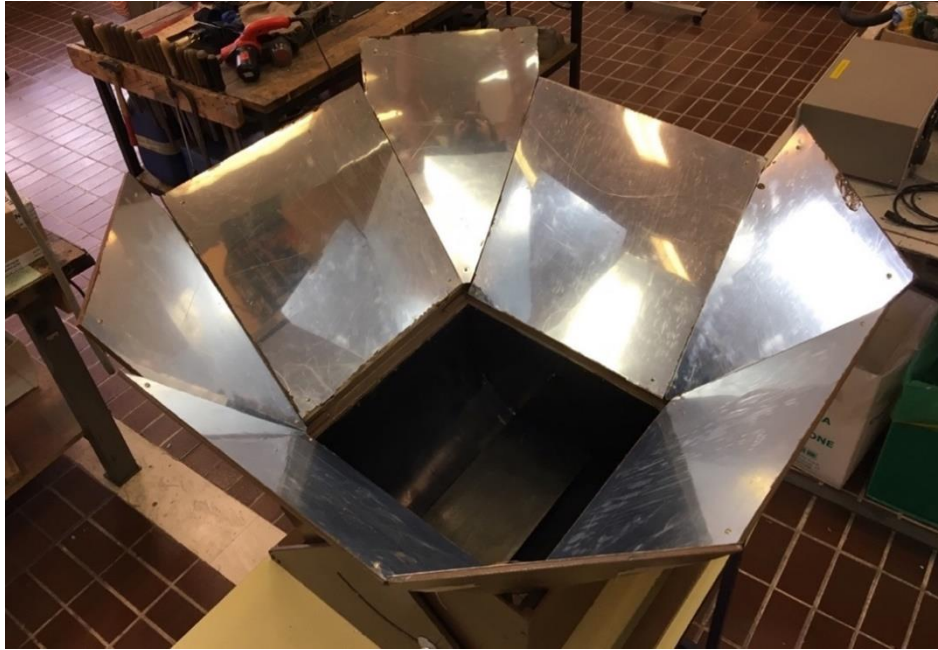
Il sistema di concentrazione dei raggi solari è formato da pannelli riflettenti che sono costituiti da un supporto in legno sul quale verranno incollati fogli di alluminio. Si tratta di 4 pannelli di forma quadrata attaccati al box con delle cerniere, che permettono di richiudere gli specchi sulla bocca del forno. Altri 4 pannelli di completamento, a forma di cuneo, vengono inseriti in modo alternato tra quelli di forma quadrata, in modo da formare una parabola, collegati tra loro mediante dei ganci.



**Fig. 65 - Disegni pannelli riflettenti (specchi) [16]**



**Fig. 66 - Pannelli riflettenti**



**Fig. 67 - Specchi montati**

È molto importante la corretta inclinazione dei pannelli riflettenti in modo da captare il sole nel migliore dei modi.



**Fig. 68 - Forno solare ultimato**

## 5.3 Principali modifiche

È necessario dire che lo scopo principale del lavoro è quello di ottimizzare il forno, che di per sé è già stato costruito, aumentandone la potenza e l'efficienza attraverso l'utilizzo di materiali più specifici.

Le principali novità che, per ora, lo differenziano da quello dell'Ingegnere Crovato sono la vernice con la quale è stata dipinta la camera di cottura del forno, gli specchi e il vetro attraverso il quale passano i raggi solari.

Tali materiali sono specifici per applicazioni solari e le caratteristiche che elencheremo di seguito sono prese dalle relative schede tecniche.

### 5.3.1 Vernice

La vernice da noi utilizzata si chiama SOLKOTE HI / SORB-II™ [4] ed è un rivestimento ottico specifico per applicazioni solari a differenza della comune vernice nera. La sua tolleranza alle alte temperature, la resistenza all'umidità e alla degradazione UV, ne fanno di essa un materiale perfetto per il nostro forno solare.

Le sue caratteristiche ottiche sono:

- Emissività  $\epsilon$  compresa tra 0,20 e 0,49, variabile in base allo spessore dello strato;
- Assorbimento compreso tra 0,88 e 0,94;
- Resistenza a temperature da  $-73\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $538\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 5.3.2 Vetro e ISO 9050:2003

Per quanto riguarda il vetro, sono stati utilizzati due doppi vetri temprati dello spessore di 4 mm che una trasmissione energetica pari al 90% [17] quindi molto superiore rispetto ad un vetro normale.

Nella tabella seguente sono elencate chiaramente le sue caratteristiche energetiche.

**Tabella 12** - Caratteristiche energetiche del vetro [17]

| CARATTERISTICHE                                | EN 410 | ISO 9050 |
|--|--------|----------|
| Fattore solare – g (%)                         | 91     | 91       |
| Riflessione energetica – $\rho_e$ (%)          | 8      | 8        |
| Trasmissione energetica diretta - $\tau_e$ (%) | 91     | 90       |
| Assorbimento energetico - $\alpha_e$ (%)       | 1      | 2        |
| Coefficiente di shading - SC                   | 1,05   | 1,05     |
| Trasmissione dei raggi ultravioletti - UV (%)  | 85     | /        |
| Selettività                                    | 1,01   | 1,01     |

Si osservano, secondo la norma ISO 9050:2003, i tre principali aspetti energetici del vetro ossia la trasmissione energetica, la riflessione e l'assorbimento vedendo cosa sono e come si calcolano.

### Trasmissione diretta solare

La trasmissione diretta solare  $\tau_e$  della vetratura è calcolata con la seguente formula:

$$\tau_e = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} \tau(\lambda) s_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} s_{\lambda} \Delta\lambda}$$

Dove:

- $s_{\lambda}$  è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare;
- $\tau(\lambda)$  è la trasmittanza spettrale del vetro;
- $\Delta\lambda$  è il procedimento di integrazione, e i punti di dati devono essere scelti tra le lunghezze d'onda riportate nella tabella 13.

### Riflettanza solare diretta

La riflessione solare diretta  $\rho_e$  della vetratura è calcolata con la seguente formula:

$$\rho_e = \frac{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} \rho_0(\lambda) s_{\lambda} \Delta\lambda}{\sum_{\lambda=300nm}^{2500nm} s_{\lambda} \Delta\lambda}$$

Dove:

- $s_\lambda$  è la distribuzione spettrale relativa della radiazione solare;
- $\rho_0(\lambda)$  è la riflettanza spettrale esterna del vetro;
- $\Delta\lambda$  è il procedimento di integrazione, e i punti di dati devono essere scelti tra le lunghezze d'onda riportate nella tabella 13.

### **Assorbimento solare diretto**

L'assorbanza diretta solare  $\alpha_e$  viene calcolata per differenza dalla seguente equazione:

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1$$

**Tabella 13** - Distribuzione spettrale della radiazione solare globale

| $\lambda$<br>nm | $S_{\lambda}\Delta\lambda$ | $\lambda$<br>nm | $S_{\lambda}\Delta\lambda$ |
|-----------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|
| 300             | 0                          | 680             | 0,012 838                  |
| 305             | 0,000 057                  | 690             | 0,011 788                  |
| 310             | 0,000 236                  | 700             | 0,012 453                  |
| 315             | 0,000 554                  | 710             | 0,012 798                  |
| 320             | 0,000 916                  | 720             | 0,010 589                  |
| 325             | 0,001 309                  | 730             | 0,011 233                  |
| 330             | 0,001 914                  | 740             | 0,012 175                  |
| 335             | 0,002 018                  | 750             | 0,012 181                  |
| 340             | 0,002 189                  | 760             | 0,009 515                  |
| 345             | 0,002 260                  | 770             | 0,010 479                  |
| 350             | 0,002 445                  | 780             | 0,011 381                  |
| 355             | 0,002 555                  | 790             | 0,011 262                  |
| 360             | 0,002 683                  | 800             | 0,028 718                  |
| 365             | 0,003 020                  | 850             | 0,048 240                  |
| 370             | 0,003 359                  | 900             | 0,040 297                  |
| 375             | 0,003 509                  | 950             | 0,021 384                  |
| 380             | 0,003 600                  | 1 000           | 0,036 097                  |
| 385             | 0,003 529                  | 1 050           | 0,034 110                  |
| 390             | 0,003 551                  | 1 100           | 0,018 861                  |
| 395             | 0,004 294                  | 1 150           | 0,013 228                  |
| 400             | 0,007 812                  | 1 200           | 0,022 551                  |
| 410             | 0,011 638                  | 1 250           | 0,023 376                  |
| 420             | 0,011 877                  | 1 300           | 0,017 756                  |
| 430             | 0,011 347                  | 1 350           | 0,003 743                  |
| 440             | 0,013 246                  | 1 400           | 0,000 741                  |
| 450             | 0,015 343                  | 1 450           | 0,003 792                  |
| 460             | 0,016 166                  | 1 500           | 0,009 693                  |
| 470             | 0,016 178                  | 1 550           | 0,013 693                  |
| 480             | 0,016 402                  | 1 600           | 0,012 203                  |
| 490             | 0,015 794                  | 1 650           | 0,010 615                  |
| 500             | 0,015 801                  | 1 700           | 0,007 256                  |
| 510             | 0,015 973                  | 1 750           | 0,007 183                  |
| 520             | 0,015 357                  | 1 800           | 0,002 157                  |
| 530             | 0,015 867                  | 1 850           | 0,000 398                  |
| 540             | 0,015 827                  | 1 900           | 0,000 082                  |
| 550             | 0,015 844                  | 1 950           | 0,001 087                  |
| 560             | 0,015 590                  | 2 000           | 0,003 024                  |
| 570             | 0,015 256                  | 2 050           | 0,003 988                  |
| 580             | 0,014 745                  | 2 100           | 0,004 229                  |
| 590             | 0,014 330                  | 2 150           | 0,004 142                  |
| 600             | 0,014 663                  | 2 200           | 0,003 690                  |
| 610             | 0,015 030                  | 2 250           | 0,003 592                  |
| 620             | 0,014 859                  | 2 300           | 0,003 436                  |
| 630             | 0,014 622                  | 2 350           | 0,003 163                  |
| 640             | 0,014526                   | 2 400           | 0,002 233                  |
| 650             | 0,014 445                  | 2 450           | 0,001 202                  |
| 660             | 0,014 313                  | 2 500           | 0,000 475                  |
| 670             | 0,014 023                  |                 |                            |

Normalized relative spectral distribution of global solar radiation (direct + diffuse)  $S_{\lambda}$  for air mass = 1,5, calculated from the values given in Table 1, column 5, of ISO 9845-1:1992, multiplied by the wavelength interval  $\Delta\lambda$ . The values in this table are calculated according to the trapezoidal rule.

### 5.3.3 Alluminio

Al fine di massimizzare l'efficienza del fornello solare per quanto riguarda la concentrazione dei raggi solari, al posto dell'alluminio tradizionale è stato utilizzato un alluminio multistrato ad alte prestazioni per gli specchi, il MIRO-SUN Weatherproof Reflective 90 [3]. Nella Figura 69 è possibile apprezzare i diversi strati dell'alluminio riflettente, che garantiscono una riflessione dei raggi solari pari al 94%, mentre il restante 6% viene assorbito dallo specchio e convertito in calore.

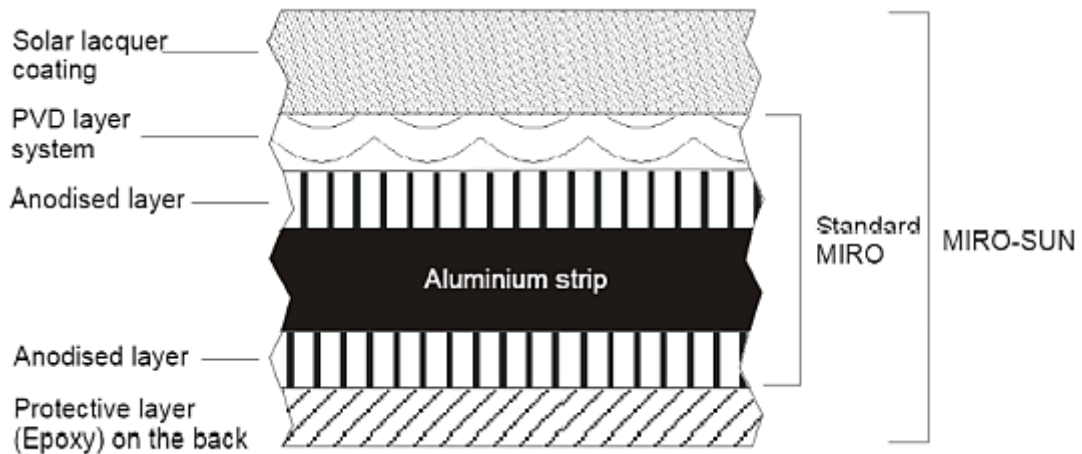


Fig. 69 – Struttura del foglio di alluminio [3]

Lo strato di PVD è utile perché, grazie a ciò, i fogli di alluminio raggiungono la massima luce di riflessione totale. È importante che, nonostante la possibile variazione dell'angolo di incidenza, che può variare da 0° a circa 80°, questo strato ha un colore neutro. Per ottenere i massimi risultati e rispettare i parametri imposti, è essenziale concentrarsi su lunghezze d'onda più brevi, ad esempio tra 480 e 500 nm. Facendo riferimento a queste considerazioni, la massima riflessione si ottiene con un angolo di incidenza pari a circa 40°. Per l'efficacia di questo foglio di alluminio è importante considerare l'area di assorbimento di tali fogli. Il grafico in Figura 70 spiega la riflessione spettrale totale degli specchi in questione con riferimento al campo visivo. Questo grafico, relativo agli specchi di alluminio, è tratto dalla scheda tecnica del materiale utilizzato e mette in relazione la riflessione totale in percentuale e la lunghezza d'onda in nanometri riferiti allo spettro solare.

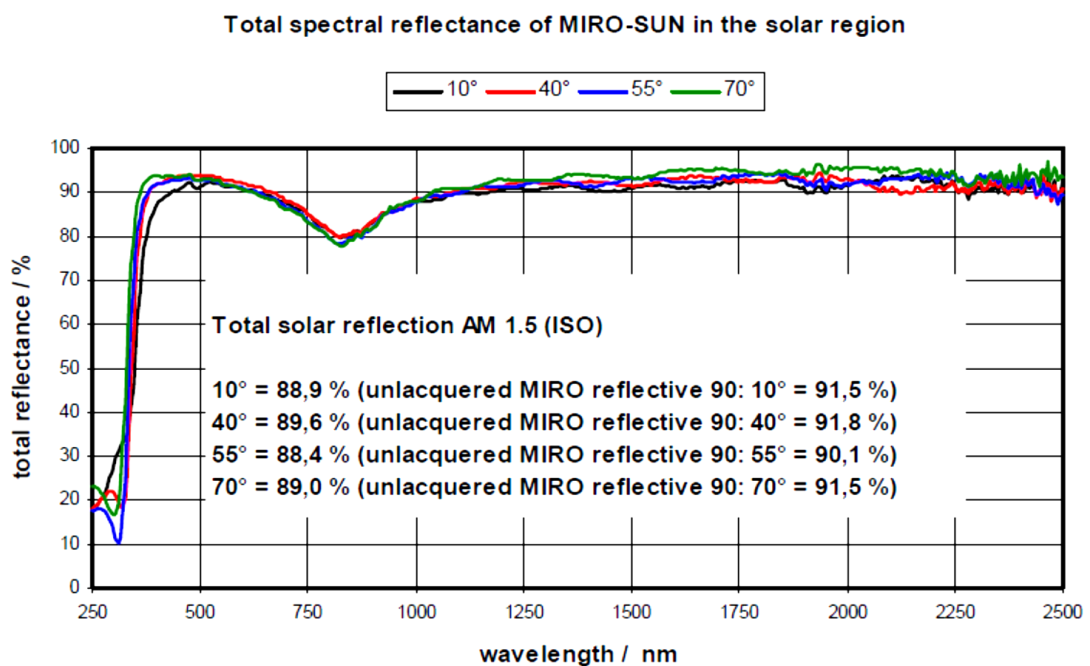


Fig. 70 - Riflettanza totale dell'alluminio [3]



## 5.4 Analisi funzionale

L'aspetto più importante per far sì che il forno sia funzionale è il suo dimensionamento in modo che:

- il trasporto e l'orientamento risultino agevoli;
- riesca a contenere la quantità di cibo normalmente cucinata;
- riesca ad accogliere la maggior parte dei tegami.

Nello specifico possiamo vedere le sue caratteristiche tecniche nella tabella 4.

**Tabella 14** - Analisi funzionale del forno

|  |                                 |
|--|---------------------------------|
| Peso                                       | 20,1 kg                         |
| Ingombro a terra con pannelli chiusi       | 0,37 m <sup>2</sup>             |
| Ingombro a terra con pannelli aperti       | 0,68 m <sup>2</sup>             |
| Diametro max apertura pannelli riflettenti | 0,898 m                         |
| Potenza max raggiungibile                  | 200 W [5]                       |
| Temperatura max raggiungibile              | 200 °C                          |
| Capienza max                               | 2 kg di pane cotti in un'ora    |
| Vano forno                                 | Lamiera in acciaio inox         |
| Scatola esterna                            | Pannelli in legno "MDF"         |
| Isolamento termico                         | Fibra di roccia e lana di vetro |
| Pannelli riflettenti                       | Alluminio su legno "MDF"        |

## 6. Risultati

---

I test effettuati sono stati effettuati in differenti giorni nei mesi di maggio, giugno, luglio, settembre e novembre degli anni 2017, 2018 e 2019. Sono stati effettuati due diversi tipi di prove: a vuoto e a carico.

Le prove a vuoto sono state usate per determinare le caratteristiche del forno solare analizzato in questo lavoro (vedi capitolo 5), portandolo alla massima temperatura raggiungibile.

Le prove a carico, d'altra parte, sono state eseguite inserendo nel forno una pentola in alluminio verniciato nero descritta nel capitolo 2. Sulla base delle prove, le masse di fluido utilizzate erano 1,5 kg, 2,0 kg e 3,0 kg. I fluidi di prova erano acqua e olio di silicone. L'acqua è prontamente disponibile e quindi utilizzata per questo tipo di test con conseguente facilità di confronto con altri risultati ottenuti da altri ricercatori. L'olio siliconico è stato scelto per andare oltre i 100 °C, avendo una temperatura di evaporazione più alta rispetto all'acqua, e quindi, essendo un olio siliconico, ha proprietà che rimangono stabili nel tempo e con la temperatura.

Le prove a carico sono state condotte anche con sistemi di energia termica a base di zuccheri: eritritolo, xilitolo e una miscela di xilitolo-mannitolo nella composizione 70:30 (fare riferimento al capitolo 2).

### 6.1 Prove a vuoto

Le temperature rilevate durante questi test erano:

- Temperatura ambiente:  $T_{amb}$  [°C];
- Temperatura del vetro del forno:  $T_g$  [°C];
- Temperatura dell'assorbitore:  $T_a$  [°C];
- Radiazione solare: DNI [ $W/m^2$ ].

#### 6.1.1 Test del 23/05/2017

Il test a vuoto effettuato il 23 maggio 2017 è iniziato alle 09:55 e si è concluso alle 16:31 circa. Il valore medio della radiazione solare misurata quel giorno durante le ore di prova era  $795,22 W/m^2$  con una temperatura ambiente media di 26,83 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno del forno solare è di 197.30 °C.

Di seguito, nella figura, viene mostrata una parte delle letture della temperatura e del DNI elaborate nel software Microsoft Excel:

| Data       | Ora      | NIP<br>mV | V<br>mV | Tamb<br>°C | Tg1<br>°C | Ta1<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|-----------|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|
|            |          |           |         | 26,83      |           | 197,30    | 795,22                  |
| 23/05/2017 | 09:55:09 | 5,694     | 6,813   | 24,17      | 111,25    | 89,96     | 779,48                  |
| 23/05/2017 | 09:55:10 | 5,698     | 6,818   | 24,26      | 111,47    | 90,11     | 780,04                  |
| 23/05/2017 | 09:55:11 | 5,697     | 6,816   | 24,37      | 111,31    | 90,19     | 779,90                  |
| 23/05/2017 | 09:55:12 | 5,694     | 6,813   | 24,47      | 111,41    | 90,3      | 779,48                  |
| 23/05/2017 | 09:55:13 | 5,696     | 6,815   | 24,67      | 111,54    | 90,43     | 779,76                  |
| 23/05/2017 | 09:55:14 | 5,695     | 6,814   | 24,68      | 111,68    | 90,58     | 779,62                  |
| 23/05/2017 | 09:55:15 | 5,696     | 6,815   | 24,58      | 111,95    | 90,65     | 779,76                  |
| 23/05/2017 | 09:55:16 | 5,695     | 6,814   | 24,57      | 112,15    | 90,7      | 779,62                  |
| 23/05/2017 | 09:55:17 | 5,694     | 6,813   | 24,44      | 112,14    | 90,76     | 779,48                  |
| 23/05/2017 | 09:55:18 | 5,695     | 6,814   | 24,32      | 112,29    | 90,81     | 779,62                  |
| 23/05/2017 | 09:55:19 | 5,695     | 6,814   | 24,42      | 112,06    | 90,85     | 779,62                  |
| 23/05/2017 | 09:55:20 | 5,693     | 6,811   | 24,34      | 112,24    | 90,9      | 779,34                  |
| 23/05/2017 | 09:55:21 | 5,695     | 6,814   | 24,34      | 112,38    | 90,83     | 779,62                  |
| 23/05/2017 | 09:55:22 | 5,698     | 6,818   | 24,28      | 112,32    | 90,81     | 780,04                  |
| 23/05/2017 | 09:55:23 | 5,7       | 6,820   | 24,07      | 112,2     | 90,96     | 780,32                  |
| 23/05/2017 | 09:55:24 | 5,702     | 6,822   | 23,96      | 112,5     | 91,07     | 780,60                  |
| 23/05/2017 | 09:55:25 | 5,702     | 6,822   | 23,98      | 112,59    | 91,19     | 780,60                  |
| 23/05/2017 | 09:55:26 | 5,702     | 6,822   | 24,14      | 112,69    | 91,31     | 780,60                  |
| 23/05/2017 | 09:55:27 | 5,702     | 6,822   | 24,24      | 112,73    | 91,41     | 780,60                  |
| 23/05/2017 | 09:55:28 | 5,706     | 6,827   | 24,08      | 112,72    | 91,41     | 781,16                  |
| 23/05/2017 | 09:55:29 | 5,705     | 6,826   | 23,96      | 112,64    | 91,44     | 781,02                  |
| 23/05/2017 | 09:55:30 | 5,706     | 6,827   | 23,94      | 112,88    | 91,49     | 781,16                  |
| 23/05/2017 | 09:55:31 | 5,706     | 6,827   | 23,96      | 112,86    | 91,45     | 781,16                  |
| 23/05/2017 | 09:55:32 | 5,705     | 6,826   | 23,99      | 112,96    | 91,44     | 781,02                  |
| 23/05/2017 | 09:55:33 | 5,706     | 6,827   | 24,04      | 113,03    | 91,32     | 781,16                  |

**Fig. 71** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento della temperatura e del DNI misurati durante il test.

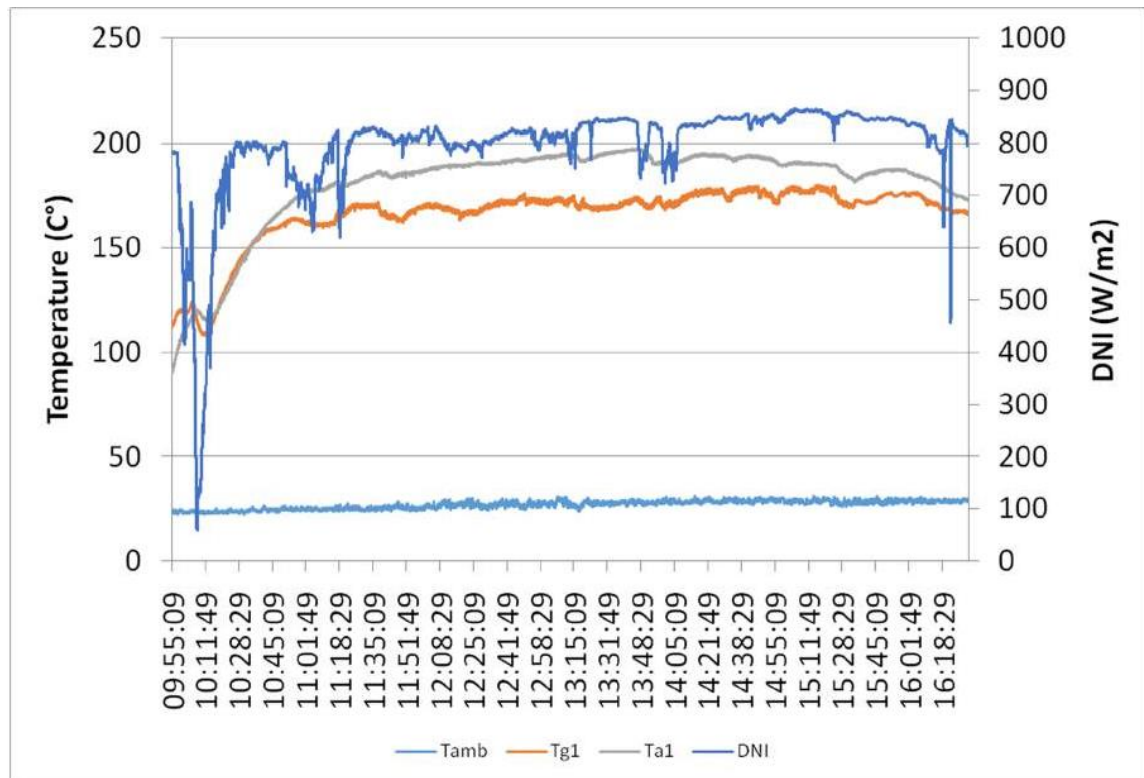


Fig. 72 - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,20 \text{ °C/W/m}^2$ ; 23/05/2017)

Dal grafico è possibile notare come la linea azzurra che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) è rimasta costante per tutta la durata del test. La linea blu scuro identifica la radiazione solare (DNI). Questa presenta i picchi causati dalla presenza di nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea grigia rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno. Questa ha un trend in crescita fino alla temperatura massima raggiunta di  $197.30 \text{ °C}$  intorno alle 13:50.

Questo test a vuoto era necessario per calcolare il valore della prima figura di merito  $F_1 [\text{°C/W/m}^2]$ , cioè il rapporto tra la temperatura massima dell'assorbitore meno la temperatura ambiente corrispondente, diviso per il valore DNI:

$$F_1 = \frac{T_{a,max} - T_{amb}}{DNI}$$

Sostituendo i valori di  $T_a$ ,  $T_{amb}$  e DNI, è stato ottenuto un valore  $F_1$  pari a  $0,20 \text{ °C/W/m}^2$ .

### 6.1.2 Test del 09/06/2017

Il test a vuoto effettuato il 9 giugno 2017 è iniziato alle 11:20 e si è concluso alle 15:13 circa.

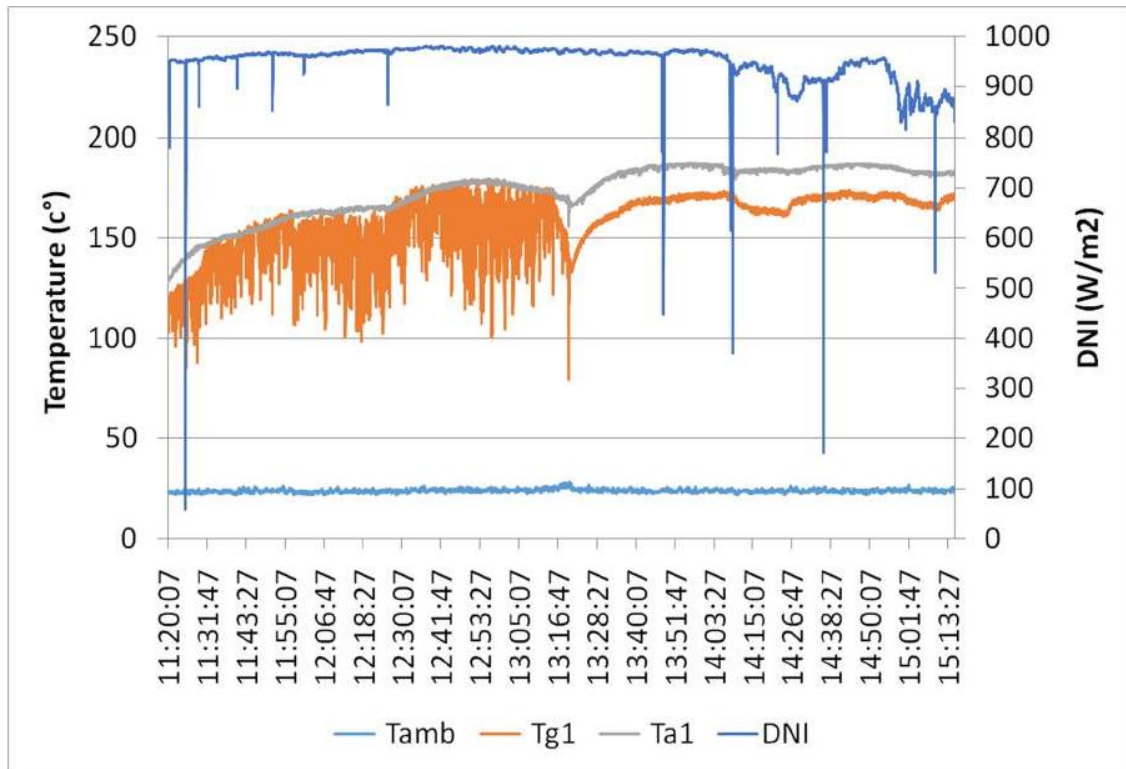
Il valore medio della radiazione solare misurata quel giorno durante le ore di prova era 949,42 W/m<sup>2</sup> con una temperatura ambiente media di 23,72 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno del forno solare è di 187,42 °C.

Di seguito, nella figura, viene mostrata una parte delle letture della temperatura e del DNI elaborate nel software Microsoft Excel:

| Data       | Ora      | NIP<br>mV | V<br>mV | Tamb<br>°C | Tg1<br>°C | Ta1<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|-----------|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|
|            |          |           |         | 23,72      |           | 187,42    | 949,92                  |
| 09/06/2017 | 11:20:07 | 6,909     | 8,296   | 22,88      | 116,52    | 127,8     | 949,26                  |
| 09/06/2017 | 11:20:08 | 6,911     | 8,299   | 22,8       | 117,49    | 127,8     | 949,54                  |
| 09/06/2017 | 11:20:09 | 6,907     | 8,294   | 22,97      | 112,74    | 128,06    | 948,98                  |
| 09/06/2017 | 11:20:10 | 6,905     | 8,292   | 23,06      | 110,37    | 128,19    | 948,70                  |
| 09/06/2017 | 11:20:11 | 6,904     | 8,290   | 23,03      | 112,62    | 128,4     | 948,56                  |
| 09/06/2017 | 11:20:12 | 6,907     | 8,294   | 22,88      | 107,94    | 128,57    | 948,98                  |
| 09/06/2017 | 11:20:13 | 6,905     | 8,292   | 22,77      | 109,37    | 128,73    | 948,70                  |
| 09/06/2017 | 11:20:14 | 6,905     | 8,292   | 22,59      | 110,75    | 128,91    | 948,70                  |
| 09/06/2017 | 11:20:15 | 6,904     | 8,290   | 22,44      | 112,84    | 129       | 948,56                  |
| 09/06/2017 | 11:20:16 | 6,907     | 8,294   | 22,37      | 110,89    | 129,14    | 948,98                  |
| 09/06/2017 | 11:20:17 | 6,907     | 8,294   | 22,36      | 111,08    | 129,13    | 948,98                  |
| 09/06/2017 | 11:20:18 | 6,907     | 8,294   | 22,33      | 112,8     | 129,2     | 948,98                  |
| 09/06/2017 | 11:20:19 | 6,908     | 8,295   | 22,25      | 114,93    | 129,02    | 949,12                  |
| 09/06/2017 | 11:20:20 | 6,909     | 8,296   | 22,21      | 102,9     | 129,27    | 949,26                  |
| 09/06/2017 | 11:20:21 | 6,912     | 8,300   | 22,26      | 106,88    | 129,23    | 949,68                  |
| 09/06/2017 | 11:20:22 | 6,911     | 8,299   | 22,31      | 111,14    | 129,2     | 949,54                  |
| 09/06/2017 | 11:20:23 | 6,911     | 8,299   | 22,39      | 110,42    | 129,4     | 949,54                  |
| 09/06/2017 | 11:20:24 | 6,909     | 8,296   | 22,56      | 107,87    | 129,25    | 949,26                  |
| 09/06/2017 | 11:20:25 | 6,907     | 8,294   | 22,68      | 112,68    | 129,34    | 948,98                  |
| 09/06/2017 | 11:20:26 | 6,912     | 8,300   | 22,87      | 111,24    | 129,46    | 949,68                  |
| 09/06/2017 | 11:20:27 | 6,912     | 8,300   | 23,02      | 107,99    | 129,4     | 949,68                  |
| 09/06/2017 | 11:20:28 | 6,914     | 8,303   | 23,12      | 104,92    | 129,68    | 949,95                  |
| 09/06/2017 | 11:20:29 | 6,913     | 8,301   | 23,11      | 109,06    | 129,83    | 949,82                  |
| 09/06/2017 | 11:20:30 | 6,895     | 8,279   | 23,23      | 112,86    | 129,96    | 947,30                  |
| 09/06/2017 | 11:20:31 | 6,231     | 7,468   | 23,24      | 114,85    | 130,19    | 854,52                  |

**Fig. 73** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento della temperatura e del DNI misurati durante il test.



**Fig. 74** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,17 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 09/06/2017)

Dal grafico è possibile notare come la linea azzurra che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) è rimasta costante per tutta la durata del test. La linea blu scuro identifica la radiazione solare (DNI). Questa presenta picchi molto marcati causati dal passaggio delle nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea grigia rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno. Questa ha una tendenza crescente fino alla temperatura massima di  $187.42 \text{ } ^\circ\text{C}$  raggiunti intorno alle 13:50.

Questo test a vuoto era necessario per calcolare il valore della prima figura di merito  $F_1 \text{ [} ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2\text{]}$ , cioè il rapporto tra la temperatura massima dell'assorbitore meno la temperatura ambiente corrispondente, diviso per il valore DNI:

$$F_1 = \frac{T_{a,max} - T_{amb}}{DNI}$$

Sostituendo i valori di  $T_a$ ,  $T_{amb}$  e DNI, è stato ottenuto un valore  $F_1$  pari a  $0,17 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ .

### 6.1.3 Test del 13/06/2017

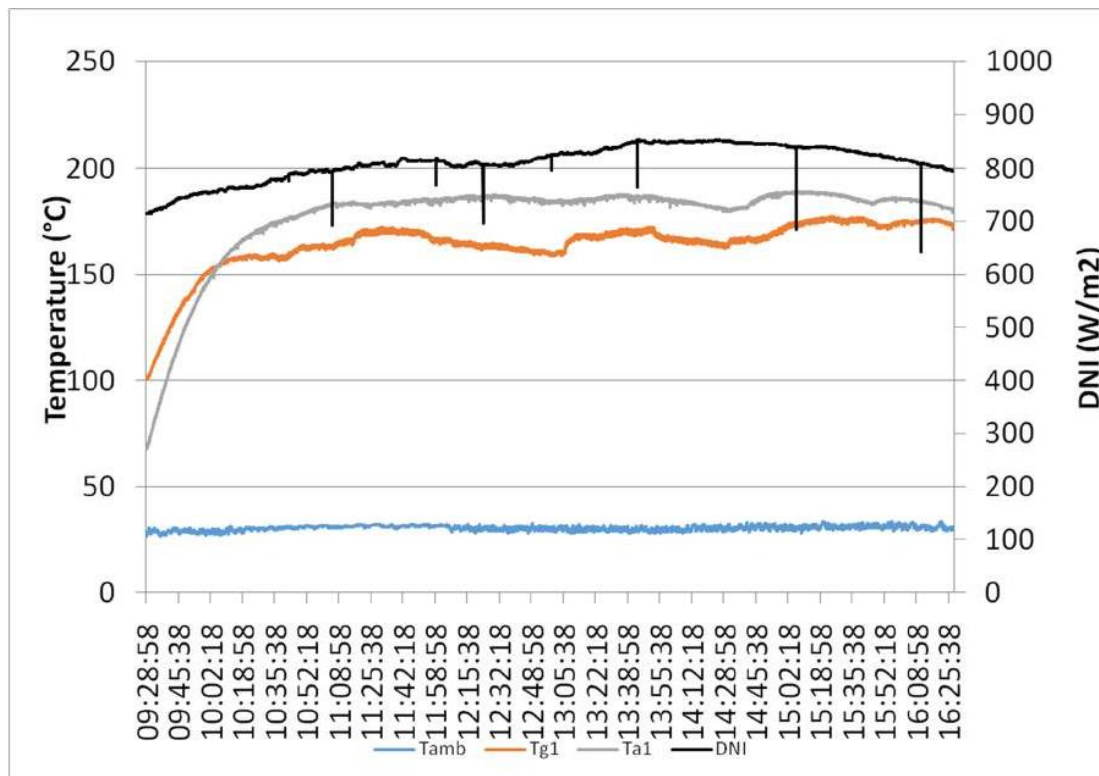
Il test a vuoto effettuato il 13 giugno 2017 è iniziato alle 9:28 e si è concluso alle 16:25 circa. Il valore medio della radiazione solare misurata quel giorno durante le ore di prova era di 811,85 W/m<sup>2</sup> con una temperatura ambiente media di 30,41 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno del fornello solare è di 189,10 °C.

Di seguito, nella figura, viene mostrata una parte delle letture della temperatura e del DNI elaborate nel software Microsoft Excel:

| Data       | Ora      | NIP<br>mV | V<br>mV | Tamb<br>°C | Tg1<br>°C | Ta1<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|-----------|---------|------------|-----------|-----------|-------------------------|
|            |          |           |         | 30,41      |           | 189,10    | 811,85                  |
| 13/06/2017 | 09:28:58 | 5,234     | 6,251   | 27,24      | 101,32    | 67,87     | 715,21                  |
| 13/06/2017 | 09:28:59 | 5,237     | 6,255   | 27,15      | 101,37    | 67,91     | 715,63                  |
| 13/06/2017 | 09:29:00 | 5,236     | 6,253   | 27,11      | 101,43    | 67,93     | 715,49                  |
| 13/06/2017 | 09:29:01 | 5,235     | 6,252   | 27,07      | 101,41    | 67,96     | 715,35                  |
| 13/06/2017 | 09:29:02 | 5,237     | 6,255   | 27,08      | 101,31    | 67,97     | 715,63                  |
| 13/06/2017 | 09:29:03 | 5,237     | 6,255   | 27,11      | 101,2     | 67,89     | 715,63                  |
| 13/06/2017 | 09:29:04 | 5,236     | 6,253   | 26,94      | 101,19    | 67,67     | 715,49                  |
| 13/06/2017 | 09:29:05 | 5,235     | 6,252   | 26,83      | 101,31    | 67,67     | 715,35                  |
| 13/06/2017 | 09:29:06 | 5,234     | 6,251   | 26,74      | 101,36    | 67,74     | 715,21                  |
| 13/06/2017 | 09:29:07 | 5,234     | 6,251   | 26,7       | 101,23    | 67,83     | 715,21                  |
| 13/06/2017 | 09:29:08 | 5,234     | 6,251   | 26,7       | 101,15    | 67,92     | 715,21                  |
| 13/06/2017 | 09:29:09 | 5,234     | 6,251   | 26,67      | 101,2     | 67,99     | 715,21                  |
| 13/06/2017 | 09:29:10 | 5,233     | 6,250   | 26,68      | 101,26    | 68,06     | 715,07                  |
| 13/06/2017 | 09:29:11 | 5,232     | 6,248   | 26,7       | 101,37    | 68,14     | 714,93                  |
| 13/06/2017 | 09:29:12 | 5,233     | 6,250   | 26,76      | 101,21    | 68,2      | 715,07                  |
| 13/06/2017 | 09:29:13 | 5,231     | 6,247   | 26,84      | 101,16    | 68,26     | 714,79                  |
| 13/06/2017 | 09:29:14 | 5,23      | 6,246   | 26,94      | 101,02    | 68,34     | 714,65                  |
| 13/06/2017 | 09:29:15 | 5,229     | 6,245   | 26,97      | 101,03    | 68,38     | 714,51                  |
| 13/06/2017 | 09:29:16 | 5,229     | 6,245   | 27         | 101,02    | 68,41     | 714,51                  |
| 13/06/2017 | 09:29:17 | 5,229     | 6,245   | 27         | 100,87    | 68,46     | 714,51                  |
| 13/06/2017 | 09:29:18 | 5,229     | 6,245   | 27         | 100,91    | 68,5      | 714,51                  |
| 13/06/2017 | 09:29:19 | 5,229     | 6,245   | 27,04      | 100,85    | 68,53     | 714,51                  |
| 13/06/2017 | 09:29:20 | 5,228     | 6,244   | 27,07      | 100,74    | 68,57     | 714,37                  |
| 13/06/2017 | 09:29:21 | 5,229     | 6,245   | 27,13      | 100,76    | 68,59     | 714,51                  |
| 13/06/2017 | 09:29:22 | 5,229     | 6,245   | 27,13      | 100,89    | 68,63     | 714,51                  |

**Fig. 75** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento della temperatura e del DNI misurati durante il test.



**Fig. 76** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 13/06/2017)

Dal grafico è possibile notare come la linea azzurra che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) è rimasta costante per tutta la durata del test. La linea nera identifica la radiazione solare (DNI). Ciò presenta picchi molto marcati causati dal passaggio di nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea grigia rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero quella della camera di cottura del forno. Questa ha un trend in crescita fino alla temperatura massima di  $189,10 \text{ } ^\circ\text{C}$  raggiunta intorno alle 13:40.

Questo test a vuoto era necessario per calcolare il valore della prima figura di merito  $F_1 \text{ [}^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2\text{]}$ , cioè il rapporto tra la temperatura massima dell'assorbitore meno la temperatura ambiente corrispondente, diviso per il valore DNI:

$$F_1 = \frac{T_{a,max} - T_{amb}}{DNI}$$

Sostituendo i valori di  $T_a$ ,  $T_{amb}$  e DNI, è stato ottenuto un valore  $F_1$  pari a  $0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ .



### 6.1.4 Riepilogo delle prove a vuoto

La tabella seguente mostra la temperatura ambiente massima ( $T_{amb}$ ), la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ), la temperatura massima dell'assorbitore ( $T_a$ ), la radiazione solare massima (DNI), la radiazione solare media ( $DNI_{av}$ ), la figura di merito  $F_1$  e la figura media di merito  $F_{1,av}$ , per le 3 prove a vuoto descritte ai paragrafi 6.1.1, 6.1.2 e 6.1.3:

**Tabella 15** - Riepilogo delle prove a vuoto

| $T_{amb}$<br>°C | $T_{amb,av}$<br>°C | $T_a$<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> | $DNI_{av}$<br>W/m <sup>2</sup> | $F_1$<br>°C/(W/m <sup>2</sup> ) | $F_{1,av}$<br>°C/(W/m <sup>2</sup> ) |      |
|-----------------|--------------------|-------------|-------------------------|--------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|------|
| 23/05/2017      | 29,39              | 26,83       | 197,30                  | 839,71                         | 795,22                          | 0,20                                 | 0,21 |
| 09/06/2017      | 23,39              | 23,72       | 187,42                  | 971,75                         | 949,92                          | 0,17                                 | 0,17 |
| 13/06/2017      | 31,27              | 30,41       | 189,10                  | 841,24                         | 811,85                          | 0,19                                 | 0,2  |

valore medio 0,19 0,19

## 6.2 Prove a carico con acqua

L'acqua è una delle pochissime sostanze esistenti in cui avviene il processo di solidificazione con un aumento del volume specifico, mentre il suo normale punto di ebollizione è a 100 °C. Come per tutte le altre sostanze, durante il cambio di fase è necessario fornire una certa quantità di calore (chiamato calore latente), che nel caso dell'acqua è superiore a qualsiasi altra sostanza nota: a condizioni di 0 °C e 1 atm di pressione, il calore di vaporizzazione è infatti pari a 2501 kJ/kg. Per eseguire questi test è stato scelto questo fluido, poiché è facilmente paragonabile ai test eseguiti dai vari ricercatori (come detto prima) a cui abbiamo fatto riferimento; inoltre, l'acqua è una sostanza che si comporta in modo ben noto in qualsiasi luogo o in qualsiasi condizione meteorologica. Lo scopo dei test era vedere per quanto tempo l'acqua, inserita con la pentola nel fornello solare, era solito bollire.

Le temperature rilevate durante le prove immediatamente descritte di seguito erano:

- Temperatura ambiente:  $T_{amb}$  [°C];
- Temperatura del vetro del forno solare:  $T_g$  [°C];
- Temperatura dell'assorbitore:  $T_a$  [°C];
- Temperatura del fluido (acqua):  $T_f$  [°C];
- Radiazione solare: DNI [W/m<sup>2</sup>].

Per le prove sono state utilizzate masse d'acqua di 2,00 e 3,00 kg. Per il calcolo dei parametri durante l'elaborazione dei dati, per tutti i test sono stati utilizzati i parametri registrati nell'intervallo di temperatura da 40 a 90 °C.

## 6.2.1 Test del 02/08/2017

Il test è stato eseguito dalle 10:33 alle 13:30. La radiazione solare media rilevata durante il test è stata di  $753,59 \text{ W/m}^2$ , con una temperatura ambiente media di  $36,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di  $120,64 \text{ }^\circ\text{C}$  e il fluido impiegava circa 2 ore per raggiungere l'ebollizione, raggiungendo una temperatura di  $99,65 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti dal sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente nella figura seguente. Questo processo di acquisizione, elaborazione e calcolo dei dati è stato eseguito per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | NIP<br>mV | Tamb<br>C° | Tgl<br>C° | Tal<br>C° | Tfl<br>C° | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
| 02/08/2017 | 10:33:17 | 6,165     | 35,1       | 95,2      | 61,15     | 36,55     | 705,37                  |
| 02/08/2017 | 10:33:18 | 6,165     | 35,11      | 95,44     | 61,06     | 36,4      | 705,4                   |
| 02/08/2017 | 10:33:19 | 6,167     | 35,1       | 93,89     | 61,14     | 36,7      | 705,57                  |
| 02/08/2017 | 10:33:20 | 6,166     | 35,07      | 93,94     | 61,2      | 36,74     | 705,44                  |
| 02/08/2017 | 10:33:21 | 6,167     | 35,07      | 94,19     | 61,22     | 36,48     | 705,61                  |
| 02/08/2017 | 10:33:22 | 6,166     | 35,02      | 94,16     | 61,23     | 36,47     | 705,47                  |
| 02/08/2017 | 10:33:23 | 6,166     | 34,95      | 94,52     | 61,23     | 37,3      | 705,44                  |
| 02/08/2017 | 10:33:24 | 6,165     | 34,97      | 94,53     | 61,19     | 36,35     | 705,38                  |
| 02/08/2017 | 10:33:25 | 6,164     | 34,99      | 93,78     | 61,28     | 36,21     | 705,32                  |
| 02/08/2017 | 10:33:26 | 6,165     | 35,03      | 92,84     | 61,49     | 36,39     | 705,35                  |
| 02/08/2017 | 10:33:27 | 6,165     | 35,08      | 93,17     | 61,34     | 36,44     | 705,37                  |
| 02/08/2017 | 10:33:28 | 6,164     | 35,12      | 93,53     | 61,16     | 36,26     | 705,3                   |
| 02/08/2017 | 10:33:29 | 6,167     | 35,22      | 93,48     | 60,99     | 36,48     | 705,63                  |
| 02/08/2017 | 10:33:30 | 6,169     | 35,3       | 93,99     | 61,04     | 36,46     | 705,84                  |
| 02/08/2017 | 10:33:31 | 6,17      | 35,29      | 94,64     | 60,7      | 36,45     | 705,9                   |
| 02/08/2017 | 10:33:32 | 6,17      | 35,32      | 93,28     | 60,62     | 36,45     | 705,91                  |
| 02/08/2017 | 10:33:33 | 6,17      | 35,34      | 92,99     | 60,58     | 36,42     | 705,95                  |
| 02/08/2017 | 10:33:34 | 6,171     | 35,41      | 91,74     | 60,58     | 36,4      | 706,03                  |
| 02/08/2017 | 10:33:35 | 6,171     | 35,47      | 91,3      | 60,61     | 36,4      | 706,12                  |
| 02/08/2017 | 10:33:36 | 6,172     | 35,55      | 89,5      | 60,74     | 36,41     | 706,22                  |
| 02/08/2017 | 10:33:37 | 6,172     | 35,59      | 89,34     | 60,97     | 36,39     | 706,17                  |
| 02/08/2017 | 10:33:38 | 6,172     | 35,64      | 89,8      | 61,25     | 36,41     | 706,13                  |
| 02/08/2017 | 10:33:39 | 6,172     | 35,65      | 88,13     | 61,42     | 36,43     | 706,13                  |
| 02/08/2017 | 10:33:40 | 6,172     | 35,63      | 88,8      | 61,29     | 36,45     | 706,22                  |
| 02/08/2017 | 10:33:41 | 6,172     | 35,59      | 89,46     | 61,04     | 36,46     | 706,22                  |
| 02/08/2017 | 10:33:42 | 6,173     | 35,57      | 89,98     | 60,99     | 36,49     | 706,27                  |
| 02/08/2017 | 10:33:43 | 6,173     | 35,52      | 90,18     | 60,94     | 36,5      | 706,27                  |

**Fig. 77** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature registrate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test.

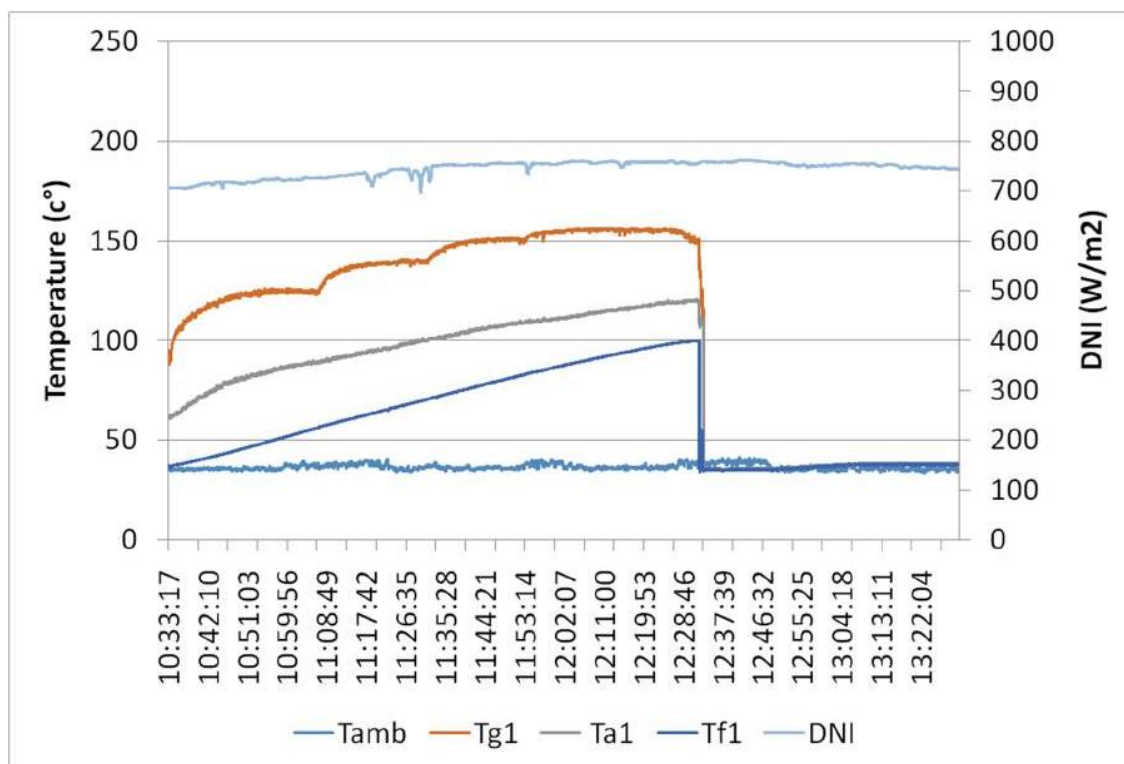


Fig. 78 - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 02/08/2017)

Dal grafico è possibile notare come la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) è rimasta costante per l'intera durata del test. La linea azzurra identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è orizzontale, il che significa la quasi assenza di nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea grigia rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno solare. Questa ha una tendenza in crescita fino alla temperatura massima di  $120,64 \text{ } ^\circ\text{C}$  ha raggiunto intorno alle 12:30. La linea blu scuro, la linea fluida (acqua), ha una tendenza crescente fino al punto di ebollizione. Una volta raggiunta quella temperatura, il forno solare è stato oscurato: questo spiega il calo di tutte le linee.

La tabella seguente mostra le quantità necessarie per calcolare i parametri  $t_s$ ,  $t_c$  e  $\eta_u$  necessari per calcolare la seconda figura di merito  $F_2$ . Un intervallo di temperature comune è stato identificato per tutti i test eseguiti. Per i calcoli, quindi, sono stati utilizzati i valori misurati inclusi in un intervallo di temperatura del fluido compreso tra  $40$  e  $90 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Tabella 16** - Calcolo dei parametri necessari per determinare  $F_2$

|                           |            |
|---------------------------|------------|
| Quantity/Test             | 4          |
| Date                      | 02/08/2017 |
| Start                     | 10:33      |
| End                       | 13:30      |
| mf (kg)                   | 2,00       |
| Tstart (°C)               | 36,55      |
| Tmax (°C)                 | 99,65      |
| T1 (°C)                   | 40         |
| T2 (°C)                   | 90         |
| Tamb,av (°C)              | 36,59      |
| DNlav (W/m <sup>2</sup> ) | 736,84     |

### 6.2.2 Test del 14/09/2017

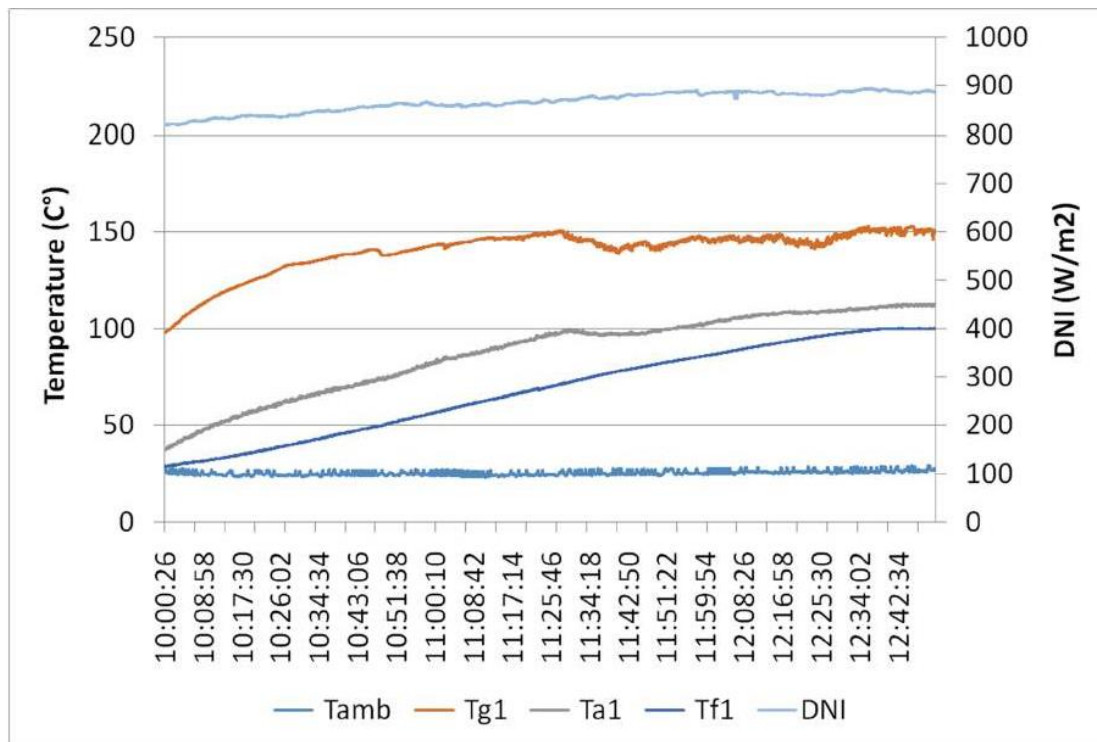
Il test è stato eseguito dalle 10:00 alle 12:51. La radiazione solare media rilevata durante il test è stata di  $865,75 \text{ W/m}^2$ , con una temperatura ambiente media di  $25,29 \text{ °C}$ . La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di  $112,68 \text{ °C}$  e il fluido impiegava circa 2 ore e 40 minuti per raggiungere l'ebollizione, raggiungendo una temperatura di  $100,13 \text{ °C}$ .

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti dal sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente nella figura seguente. Questo processo di acquisizione, elaborazione e calcolo dei dati è stato eseguito per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | NIP<br>mV | Tamb<br>°C | Tgl<br>°C | Tal<br>°C | Tfl<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|-----------|------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------|
| 14/09/2017 | 10:00:26 | 7,16      | 26,96      | 97,62     | 37,03     | 28,79     | 819,26                  |
| 14/09/2017 | 10:00:27 | 7,161     | 27,07      | 97,65     | 37,04     | 28,8      | 819,36                  |
| 14/09/2017 | 10:00:28 | 7,161     | 27,42      | 97,68     | 37        | 28,81     | 819,33                  |
| 14/09/2017 | 10:00:29 | 7,16      | 27,5       | 97,71     | 37,06     | 28,83     | 819,26                  |
| 14/09/2017 | 10:00:30 | 7,162     | 27,74      | 97,73     | 37,17     | 28,85     | 819,44                  |
| 14/09/2017 | 10:00:31 | 7,163     | 28,02      | 97,78     | 37,23     | 28,9      | 819,52                  |
| 14/09/2017 | 10:00:32 | 7,162     | 28,08      | 97,84     | 37,3      | 28,93     | 819,46                  |
| 14/09/2017 | 10:00:33 | 7,163     | 28,1       | 97,85     | 37,23     | 28,91     | 819,61                  |
| 14/09/2017 | 10:00:34 | 7,164     | 28,05      | 97,87     | 37,16     | 28,88     | 819,68                  |
| 14/09/2017 | 10:00:35 | 7,166     | 28,3       | 97,87     | 37,18     | 28,84     | 819,85                  |
| 14/09/2017 | 10:00:36 | 7,166     | 28,08      | 97,81     | 37,17     | 28,79     | 819,87                  |
| 14/09/2017 | 10:00:37 | 7,166     | 28,02      | 97,86     | 37,16     | 28,74     | 819,87                  |
| 14/09/2017 | 10:00:38 | 7,166     | 27,97      | 97,9      | 37,16     | 28,72     | 819,94                  |
| 14/09/2017 | 10:00:39 | 7,166     | 28,07      | 97,95     | 37,18     | 28,7      | 819,94                  |
| 14/09/2017 | 10:00:40 | 7,168     | 28,05      | 97,99     | 37,21     | 28,67     | 820,14                  |
| 14/09/2017 | 10:00:41 | 7,168     | 27,92      | 98        | 37,16     | 28,64     | 820,13                  |
| 14/09/2017 | 10:00:42 | 7,165     | 27,93      | 98,03     | 37,14     | 28,63     | 819,84                  |
| 14/09/2017 | 10:00:43 | 7,164     | 27,98      | 98,06     | 37,14     | 28,64     | 819,72                  |
| 14/09/2017 | 10:00:44 | 7,164     | 27,89      | 98,08     | 37,27     | 28,63     | 819,63                  |
| 14/09/2017 | 10:00:45 | 7,162     | 28,07      | 98,11     | 37,34     | 28,64     | 819,43                  |
| 14/09/2017 | 10:00:46 | 7,162     | 27,88      | 98,16     | 37,37     | 28,64     | 819,5                   |
| 14/09/2017 | 10:00:47 | 7,162     | 27,69      | 98,17     | 37,36     | 28,65     | 819,46                  |
| 14/09/2017 | 10:00:48 | 7,161     | 27,55      | 98,16     | 37,42     | 28,65     | 819,36                  |
| 14/09/2017 | 10:00:49 | 7,159     | 27,53      | 98,16     | 37,37     | 28,66     | 819,13                  |
| 14/09/2017 | 10:00:50 | 7,157     | 27,32      | 98,17     | 37,34     | 28,67     | 818,9                   |
| 14/09/2017 | 10:00:51 | 7,157     | 27,2       | 98,19     | 37,46     | 28,68     | 818,92                  |
| 14/09/2017 | 10:00:52 | 7,158     | 27,06      | 98,22     | 37,51     | 28,69     | 819,04                  |

**Fig. 79** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature registrate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test.



**Fig. 80** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 14/09/2017)

Dal grafico è possibile notare come la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) è rimasta costante per l'intera durata del test. La linea azzurra identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è orizzontale, il che significa la quasi assenza di nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea grigia rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno solare. Questa ha una tendenza in crescita fino alla temperatura massima di  $112,68 \text{ °C}$  ha raggiunto intorno alle 12:50. La linea blu scuro, la linea fluida (acqua), ha una tendenza crescente fino al punto di ebollizione.

La tabella seguente mostra le quantità necessarie per il calcolo dei parametri  $t_s$ ,  $t_c$  e  $\eta_u$  necessari per calcolare la seconda figura di merito  $F_2$ . Per tutte le prove eseguite è stato identificato un intervallo di temperatura comune. Per i calcoli, quindi, sono stati utilizzati i valori misurati inclusi in un intervallo di temperatura del fluido compreso tra  $40$  e  $90 \text{ °C}$ .

**Tabella 17** - Calcolo dei parametri necessari per determinare  $F_2$

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <u>Quantity/Test</u>           | <u>5</u>      |
| Date                           | 14/09/2017    |
| Start                          | 10:00         |
| End                            | 12:51         |
| mf (kg)                        | 2,00          |
| Tstart (°C)                    | 28,79         |
| Tmax (°C)                      | 100,13        |
| T1 (°C)                        | 40            |
| T2 (°C)                        | 90            |
| Tamb,av (°C)                   | 25,00         |
| <u>DNlav (W/m<sup>2</sup>)</u> | <u>867,18</u> |

### **6.2.3 Test del 01/06/2018**

Il test è stato eseguito dalle 11:50 alle 13:45. La radiazione solare media rilevata durante il test è stata di 868,28 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 27,23 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 109,25 °C e il fluido impiegava circa 2 ore per raggiungere l'ebollizione, raggiungendo una temperatura di 97,18 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti dal sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente nella figura seguente. Questo processo di acquisizione, elaborazione e calcolo dei dati è stato eseguito per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>NIP | Canale 2:<br>Tamb | Canale 3:<br>Tgl | Canale 4:<br>Tal | Canale 7:<br>Tfl | DNI              |
|------------|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
|            |          | mV               | °C                | °C               | °C               | °C               | W/m <sup>2</sup> |
| 01/06/2018 | 11:49:40 | 7,562            | 27,62             | 59,02            | 43,71            | 32,01            | 865,22           |
| 01/06/2018 | 11:49:41 | 7,561            | 27,49             | 58,95            | 43,89            | 32,07            | 865,05           |
| 01/06/2018 | 11:49:42 | 7,562            | 27,46             | 59               | 43,86            | 32,13            | 865,27           |
| 01/06/2018 | 11:49:43 | 7,562            | 27,49             | 59,84            | 43,78            | 32,16            | 865,24           |
| 01/06/2018 | 11:49:44 | 7,562            | 27,54             | 60,28            | 43,73            | 32,18            | 865,19           |
| 01/06/2018 | 11:49:45 | 7,56             | 27,59             | 60,52            | 43,73            | 32,21            | 865,03           |
| 01/06/2018 | 11:49:46 | 7,562            | 27,58             | 60,36            | 43,81            | 32,25            | 865,21           |
| 01/06/2018 | 11:49:47 | 7,559            | 27,63             | 60,31            | 43,78            | 32,27            | 864,9            |
| 01/06/2018 | 11:49:48 | 7,562            | 27,67             | 60,48            | 43,75            | 32,3             | 865,24           |
| 01/06/2018 | 11:49:49 | 7,562            | 27,68             | 60,94            | 43,73            | 32,35            | 865,26           |
| 01/06/2018 | 11:49:50 | 7,56             | 27,66             | 60,74            | 43,69            | 32,4             | 865,03           |
| 01/06/2018 | 11:49:51 | 7,564            | 27,72             | 60,97            | 43,85            | 32,45            | 865,46           |
| 01/06/2018 | 11:49:52 | 7,564            | 27,73             | 61,47            | 43,98            | 32,5             | 865,49           |
| 01/06/2018 | 11:49:53 | 7,568            | 27,76             | 62,07            | 43,96            | 32,52            | 865,92           |
| 01/06/2018 | 11:49:54 | 7,57             | 27,63             | 62,54            | 43,94            | 32,55            | 866,14           |
| 01/06/2018 | 11:49:55 | 7,567            | 27,5              | 62,46            | 43,95            | 32,57            | 865,84           |
| 01/06/2018 | 11:49:56 | 7,564            | 27,43             | 62,45            | 44,08            | 32,58            | 865,44           |
| 01/06/2018 | 11:49:57 | 7,563            | 27,49             | 62,23            | 44,17            | 32,58            | 865,36           |
| 01/06/2018 | 11:49:58 | 7,562            | 27,54             | 62,8             | 44,21            | 32,57            | 865,19           |
| 01/06/2018 | 11:49:59 | 7,564            | 27,78             | 62,61            | 44,28            | 32,58            | 865,42           |
| 01/06/2018 | 11:50:00 | 7,561            | 27,83             | 63,18            | 44,34            | 32,58            | 865,07           |
| 01/06/2018 | 11:50:01 | 7,562            | 27,86             | 62,93            | 44,39            | 32,57            | 865,22           |
| 01/06/2018 | 11:50:02 | 7,563            | 27,92             | 63,66            | 44,51            | 32,59            | 865,29           |
| 01/06/2018 | 11:50:03 | 7,565            | 28                | 64,6             | 44,52            | 32,6             | 865,53           |
| 01/06/2018 | 11:50:04 | 7,564            | 28,01             | 64,92            | 44,45            | 32,64            | 865,39           |
| 01/06/2018 | 11:50:05 | 7,563            | 28,05             | 65,18            | 44,41            | 32,66            | 865,29           |
| 01/06/2018 | 11:50:06 | 7,563            | 28,11             | 64,93            | 44,36            | 32,7             | 865,34           |

**Figura 81** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature registrate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test.



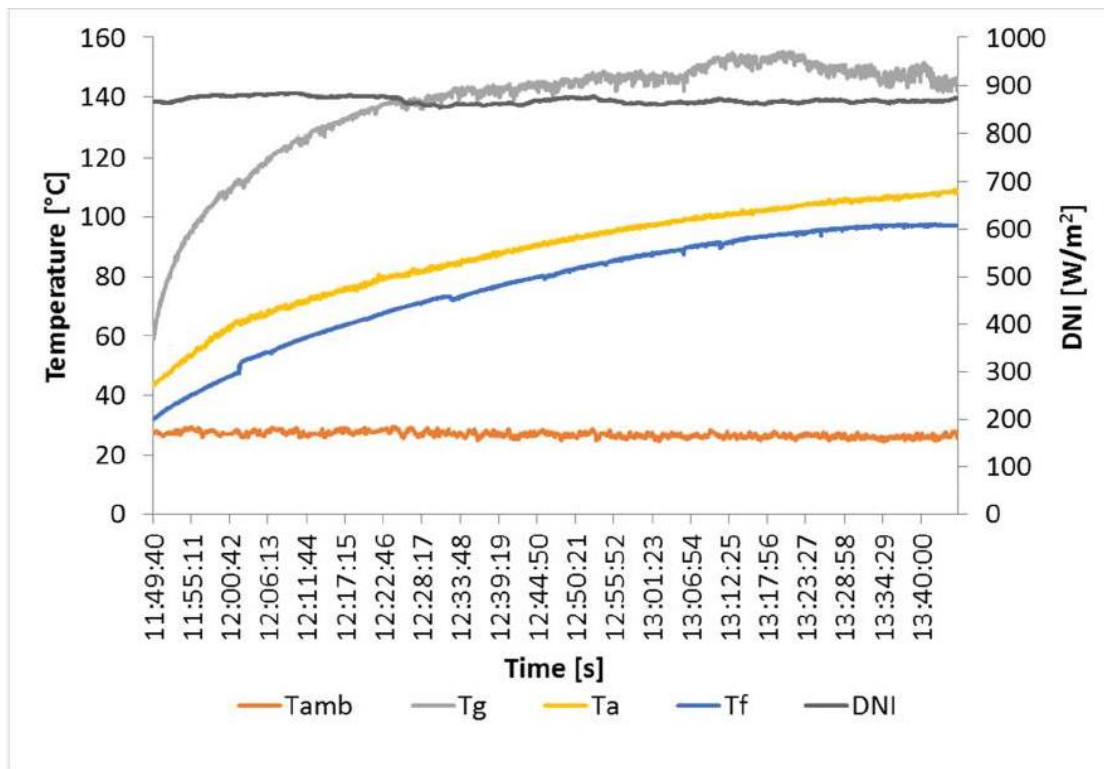


Fig. 82 - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 01/06/2018)

Dal grafico è possibile notare come la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) è rimasta costante per l'intera durata del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è orizzontale, il che significa la quasi assenza di nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea gialla rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno solare. Questa ha una tendenza in crescita fino alla temperatura massima di  $109,25 \text{ } ^\circ\text{C}$  ha raggiunto intorno alle 13:42. La linea blu, la linea fluida (acqua), ha una tendenza crescente fino al punto di ebollizione.

La tabella seguente mostra le quantità necessarie per il calcolo dei parametri  $t_s$ ,  $t_c$  e  $\eta_u$  necessari per calcolare la seconda figura di merito  $F_2$ . Per tutte le prove eseguite è stato identificato un intervallo di temperatura comune. Per i calcoli, quindi, sono stati utilizzati i valori misurati inclusi in un intervallo di temperatura del fluido compreso tra  $40$  e  $90 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Tabella 18** - Calcolo dei parametri necessari per determinare  $F_2$

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <u>Quantity/Test</u>           | <u>6</u>      |
| Date                           | 01/06/2018    |
| Start                          | 11:49         |
| End                            | 13:45         |
| mf (kg)                        | 3,00          |
| Tstart (°C)                    | 33,01         |
| Tmax (°C)                      | 97,18         |
| T1 (°C)                        | 40            |
| T2 (°C)                        | 90            |
| Tamb,av (°C)                   | 27,23         |
| <u>DNIav (W/m<sup>2</sup>)</u> | <u>869,28</u> |

#### **6.2.4 Test del 20/06/2018**

Il test è stato eseguito dalle 11:30 alle 12:30. La radiazione solare media rilevata durante il test è stata di  $825,55 \text{ W/m}^2$ , con una temperatura ambiente media di  $28,29 \text{ °C}$ . La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di  $110,42 \text{ °C}$  e il fluido impiegava circa 1 ora per raggiungere l'ebollizione, raggiungendo una temperatura di  $99,74 \text{ °C}$ .

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti dal sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente nella figura seguente. Questo processo di acquisizione, elaborazione e calcolo dei dati è stato eseguito per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>mV | Tamb<br>°C | Tg<br>°C | Ta<br>°C | Tf<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|-----------------|------------|----------|----------|----------|-------------------------|
| 20/06/2018 | 10:32:55 | 6,327           | 26,92      | 106,04   | 49,29    | 35,11    | 723,92                  |
| 20/06/2018 | 10:32:56 | 6,328           | 26,92      | 105,57   | 49,27    | 35,12    | 724,05                  |
| 20/06/2018 | 10:32:57 | 6,327           | 26,96      | 105,07   | 49,31    | 35,12    | 723,95                  |
| 20/06/2018 | 10:32:58 | 6,327           | 27         | 104,99   | 49,34    | 35,13    | 723,95                  |
| 20/06/2018 | 10:32:59 | 6,331           | 26,9       | 105,06   | 49,42    | 35,14    | 724,39                  |
| 20/06/2018 | 10:33:00 | 6,331           | 26,69      | 105,07   | 49,65    | 35,16    | 724,36                  |
| 20/06/2018 | 10:33:01 | 6,333           | 26,53      | 104,77   | 49,76    | 35,17    | 724,65                  |
| 20/06/2018 | 10:33:02 | 6,337           | 26,4       | 104,84   | 49,65    | 35,19    | 725,06                  |
| 20/06/2018 | 10:33:03 | 6,339           | 26,34      | 104,85   | 49,63    | 35,2     | 725,26                  |
| 20/06/2018 | 10:33:04 | 6,34            | 26,19      | 105,42   | 49,84    | 35,23    | 725,37                  |
| 20/06/2018 | 10:33:05 | 6,339           | 26,08      | 105,82   | 50       | 35,23    | 725,28                  |
| 20/06/2018 | 10:33:06 | 6,336           | 26,06      | 105,98   | 50,05    | 35,22    | 724,94                  |
| 20/06/2018 | 10:33:07 | 6,328           | 25,98      | 106,04   | 50,05    | 35,22    | 724,06                  |
| 20/06/2018 | 10:33:08 | 6,322           | 25,98      | 106,11   | 49,86    | 35,23    | 723,35                  |
| 20/06/2018 | 10:33:09 | 6,319           | 25,99      | 106,13   | 49,76    | 35,23    | 723,03                  |
| 20/06/2018 | 10:33:10 | 6,315           | 26,03      | 106,11   | 49,73    | 35,25    | 722,57                  |
| 20/06/2018 | 10:33:11 | 6,312           | 26,07      | 106,22   | 49,71    | 35,27    | 722,23                  |
| 20/06/2018 | 10:33:12 | 6,31            | 26,13      | 106,2    | 49,68    | 35,26    | 721,96                  |
| 20/06/2018 | 10:33:13 | 6,305           | 26,18      | 106,19   | 49,62    | 35,27    | 721,43                  |
| 20/06/2018 | 10:33:14 | 6,303           | 26,19      | 106,14   | 49,58    | 35,27    | 721,15                  |
| 20/06/2018 | 10:33:15 | 6,302           | 26,25      | 106,27   | 49,65    | 35,27    | 721                     |
| 20/06/2018 | 10:33:16 | 6,3             | 26,32      | 106,33   | 49,91    | 35,28    | 720,79                  |
| 20/06/2018 | 10:33:17 | 6,3             | 26,39      | 106,52   | 49,84    | 35,28    | 720,81                  |
| 20/06/2018 | 10:33:18 | 6,301           | 26,43      | 106,55   | 49,76    | 35,29    | 720,9                   |
| 20/06/2018 | 10:33:19 | 6,301           | 26,52      | 106,65   | 49,73    | 35,3     | 720,98                  |
| 20/06/2018 | 10:33:20 | 6,303           | 26,58      | 106,66   | 49,76    | 35,31    | 721,14                  |
| 20/06/2018 | 10:33:21 | 6,301           | 26,62      | 106,76   | 49,8     | 35,33    | 720,97                  |

**Fig. 83** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature registrate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test.

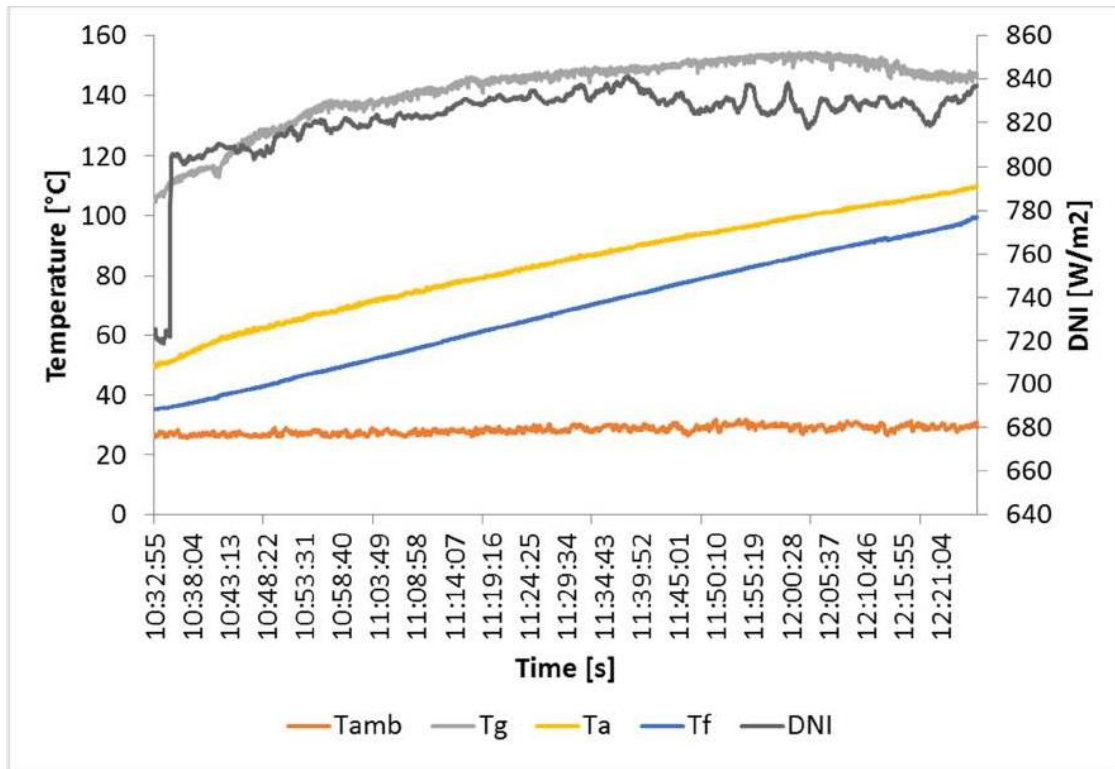


Fig. 84 - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 20/06/2018)

Dal grafico è possibile notare come la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) è rimasta costante per l'intera durata del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è quasi orizzontale con alcuni picchi, il che significa il passaggio di alcune nuvole durante l'acquisizione dei dati. La linea gialla rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno solare. Questa ha una tendenza crescente fino alla temperatura massima raggiunta di  $109,71 \text{ °C}$  intorno alle 12:25. La linea blu, la linea fluida (acqua), ha una tendenza crescente fino al punto di ebollizione.

La tabella seguente mostra le quantità necessarie per il calcolo dei parametri  $t_s$ ,  $t_c$  e  $\eta_u$  necessari per calcolare la seconda figura di merito  $F_2$ . Per tutte le prove eseguite è stato identificato un intervallo di temperatura comune. Per i calcoli, quindi, sono stati utilizzati i valori misurati inclusi in un intervallo di temperatura del fluido compreso tra  $40$  e  $90 \text{ °C}$ .

**Tabella 19** - Calcolo dei parametri necessari per determinare  $F_2$

| <u>Quantity/Test</u>           | <u>7</u>      |
|--------------------------------|---------------|
| Date                           | 20/06/2018    |
| Start                          | 10:32         |
| End                            | 15:48         |
| mf (kg)                        | 3,00          |
| Tstart (°C)                    | 35,11         |
| Tmax (°C)                      | 99,74         |
| T1 (°C)                        | 40            |
| T2 (°C)                        | 90            |
| Tamb,av (°C)                   | 28,29         |
| <u>DNlav (W/m<sup>2</sup>)</u> | <u>825,54</u> |

### **6.2.5 Test del 04/07/2018**

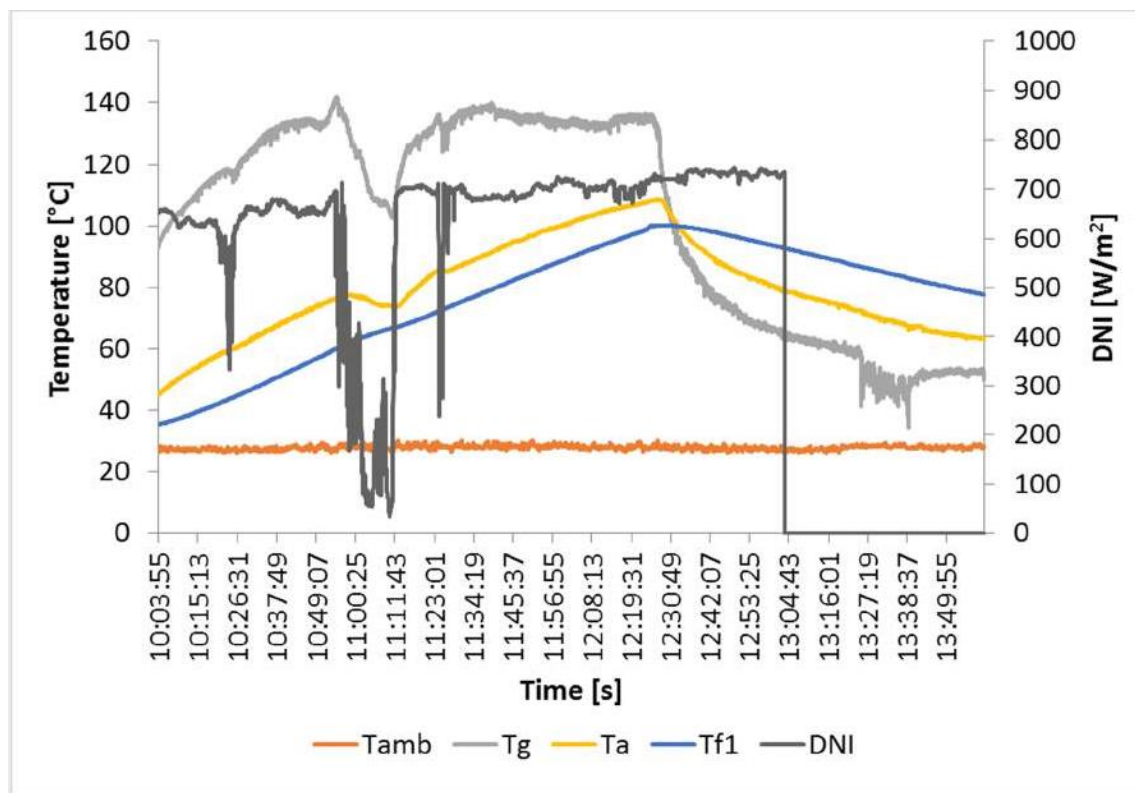
Il test è stato eseguito dalle 10:10 alle 12:30. La radiazione solare media rilevata durante il test è stata di 599,13 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 27,88 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 108,96 °C e il fluido impiegava circa 2 ore e 30 minuti per raggiungere l'ebollizione, raggiungendo una temperatura di 100,22 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti dal sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente nella figura seguente. Questo processo di acquisizione, elaborazione e calcolo dei dati è stato eseguito per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>NIP | Canale 2:<br>Tamb | Canale 3:<br>Tgl | Canale 4:<br>Tal | Canale 7: Tfl | DNI              |
|------------|----------|------------------|-------------------|------------------|------------------|---------------|------------------|
|            |          | mV               | °C                | °C               | °C               | °C            | W/m <sup>2</sup> |
| 04/07/2018 | 10:03:55 | 5,703            | 27,29             | 93,41            | 45,07            | 35,26         | 652,53           |
| 04/07/2018 | 10:03:56 | 5,709            | 27,28             | 93,45            | 45,17            | 35,29         | 653,21           |
| 04/07/2018 | 10:03:57 | 5,713            | 27,11             | 93,53            | 45,18            | 35,29         | 653,66           |
| 04/07/2018 | 10:03:58 | 5,715            | 26,87             | 93,62            | 45,13            | 35,3          | 653,95           |
| 04/07/2018 | 10:03:59 | 5,717            | 26,7              | 93,77            | 45,11            | 35,32         | 654,07           |
| 04/07/2018 | 10:04:00 | 5,716            | 26,61             | 93,9             | 45,15            | 35,32         | 654              |
| 04/07/2018 | 10:04:01 | 5,715            | 26,58             | 94,01            | 45,19            | 35,33         | 653,86           |
| 04/07/2018 | 10:04:02 | 5,713            | 26,54             | 94,24            | 45,15            | 35,35         | 653,67           |
| 04/07/2018 | 10:04:03 | 5,715            | 26,46             | 94,36            | 45,19            | 35,35         | 653,86           |
| 04/07/2018 | 10:04:04 | 5,717            | 26,42             | 94,35            | 45,31            | 35,36         | 654,1            |
| 04/07/2018 | 10:04:05 | 5,721            | 26,38             | 94,42            | 45,31            | 35,37         | 654,56           |
| 04/07/2018 | 10:04:06 | 5,725            | 26,36             | 94,52            | 45,28            | 35,37         | 655              |
| 04/07/2018 | 10:04:07 | 5,729            | 26,34             | 94,63            | 45,25            | 35,37         | 655,5            |
| 04/07/2018 | 10:04:08 | 5,732            | 26,31             | 94,64            | 45,32            | 35,37         | 655,89           |
| 04/07/2018 | 10:04:09 | 5,734            | 26,31             | 94,71            | 45,47            | 35,38         | 656,03           |
| 04/07/2018 | 10:04:10 | 5,735            | 26,34             | 94,73            | 45,5             | 35,38         | 656,2            |
| 04/07/2018 | 10:04:11 | 5,735            | 26,36             | 94,85            | 45,42            | 35,38         | 656,14           |
| 04/07/2018 | 10:04:12 | 5,735            | 26,41             | 94,9             | 45,44            | 35,39         | 656,15           |
| 04/07/2018 | 10:04:13 | 5,735            | 26,43             | 94,89            | 45,42            | 35,39         | 656,23           |
| 04/07/2018 | 10:04:14 | 5,735            | 26,49             | 94,95            | 45,41            | 35,39         | 656,16           |
| 04/07/2018 | 10:04:15 | 5,736            | 26,53             | 94,99            | 45,4             | 35,4          | 656,3            |
| 04/07/2018 | 10:04:16 | 5,739            | 26,63             | 95,04            | 45,36            | 35,41         | 656,61           |
| 04/07/2018 | 10:04:17 | 5,741            | 26,79             | 95,13            | 45,35            | 35,42         | 656,83           |
| 04/07/2018 | 10:04:18 | 5,741            | 26,82             | 95,11            | 45,36            | 35,42         | 656,88           |
| 04/07/2018 | 10:04:19 | 5,743            | 26,88             | 95,12            | 45,38            | 35,42         | 657,13           |
| 04/07/2018 | 10:04:20 | 5,745            | 26,89             | 95,03            | 45,39            | 35,43         | 657,32           |
| 04/07/2018 | 10:04:21 | 5,748            | 26,97             | 94,97            | 45,37            | 35,43         | 657,66           |

**Fig. 85** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature registrate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test.



**Fig. 86** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 04/07/2018)

Dal grafico è possibile notare come la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) è rimasta costante per l'intera durata del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Ciò presenta numerosi picchi che implicano la presenza di numerosi cloud durante l'acquisizione dei dati. Questa tendenza non ha compromesso il successo del test. La linea gialla rappresenta la temperatura all'interno dell'assorbitore, ovvero la camera di cottura del forno solare. Questa ha un trend in crescita fino alla temperatura massima di  $108,96 \text{ } ^\circ\text{C}$  raggiunta intorno alle 12:28. La linea blu, la linea fluida (acqua), ha una tendenza crescente fino al punto di ebollizione. Una volta che l'acqua ha iniziato a bollire, il forno solare è stato oscurato in modo che non fosse più raggiunto dalla radiazione solare diretta.

La tabella seguente mostra le quantità necessarie per calcolare i parametri  $t_s$ ,  $t_c$  e  $\eta_u$  necessari per calcolare la seconda figura di merito  $F_2$ . Un intervallo di temperature comune è stato identificato per tutti i test eseguiti. Per i calcoli, quindi, sono stati utilizzati i valori misurati inclusi in un intervallo di temperatura del fluido compreso tra  $40$  e  $90 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

**Tabella 20** - Calcolo dei parametri necessari per determinare  $F_2$ 

|                                |               |
|--------------------------------|---------------|
| <u>Quantity/Test</u>           | <u>8</u>      |
| Date                           | 04/07/2018    |
| Start                          | 10:03         |
| End                            | 14:01         |
| mf (kg)                        | 3,00          |
| Tstart (°C)                    | 35,26         |
| Tmax (°C)                      | 100,22        |
| T1 (°C)                        | 40            |
| T2 (°C)                        | 90            |
| Tamb,av (°C)                   | 27,88         |
| <u>DNIav (W/m<sup>2</sup>)</u> | <u>597,10</u> |

### 6.2.6 Riepilogo delle prove a carico con acqua

La tabella seguente mostra un riepilogo di tutti i dati calcolati e raccolti nei test effettuati con acqua per avere una visione generale del comportamento del fluido testato all'interno del nostro fornello solare. Va ricordato che durante l'elaborazione dei dati acquisiti, è stata scelta una gamma di temperature comuni a tutti i test (respingendo così i test che non rispettavano questi parametri). Questa gamma va da 40 a 90 °C di acqua. Tutte le quantità medie calcolate e i parametri necessari per il calcolo della seconda figura di merito  $F_2$  si riferiscono quindi a quell'intervallo di temperature e quindi all'intervallo di tempo.

In particolare, nell'intervallo di tempo compreso tra 40 e 90 °C del fluido, sono state calcolate la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ) e la radiazione solare media ( $DNI_{av}$ ), il delta di tempo tra loro e di conseguenza i parametri  $t_s$ ,  $t_c$ ,  $\eta$  e infine  $F_2$ .

**Tabella 21** - Riepilogo delle prove a carico con acqua

| Quantity/Test                         | 4          | 5          | 6          | 7          | 8          |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date                                  | 02/08/2017 | 14/09/2017 | 01/06/2018 | 20/06/2018 | 04/07/2018 |
| Start                                 | 10:33      | 10:00      | 11:49      | 10:32      | 10:33      |
| End                                   | 13:30      | 12:51      | 13:45      | 15:48      | 14:01      |
| mf (kg)                               | 2,00       | 2,00       | 3,00       | 3,00       | 3,00       |
| Tstart (°C)                           | 36,55      | 28,79      | 33,01      | 35,11      | 35,26      |
| Tmax (°C)                             | 99,65      | 100,13     | 97,18      | 99,74      | 100,22     |
| T1 (°C)                               | 40         | 40         | 40         | 40         | 40         |
| T2 (°C)                               | 90         | 90         | 90         | 90         | 90         |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 736,84     | 867,18     | 869,28     | 825,54     | 597,10     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 36,59      | 25,00      | 27,23      | 28,29      | 27,88      |
| $\Delta t_h$ (h)                      | 1,45       | 1,68       | 1,20       | 1,44       | 1,77       |
| $t_s$ (h m <sup>2</sup> /kg)          | 0,49       | 0,57       | 0,27       | 0,33       | 0,40       |
| $t_{ch}$ (h m <sup>2</sup> /kg)       | 0,40       | 0,55       | 0,26       | 0,30       | 0,27       |
| $\eta_{av}$                           | 0,16       | 0,12       | 0,25       | 0,22       | 0,24       |
| $F_2$                                 | 0,09       | 0,07       | 0,14       | 0,12       | 0,16       |



## 6.3 Prove a carico con olio di silicone

Le temperature rilevate durante le prove immediatamente descritte di seguito erano:

- Temperatura ambiente:  $T_{amb}$  [°C];
- Temperatura del vetro del fornello solare:  $T_g$  [°C];
- Temperatura dell'assorbitore:  $T_a$  [°C];
- Temperatura del fluido (acqua):  $T_f$  [°C];
- Radiazione solare: DNI [ $W/m^2$ ].

Per i test è stata utilizzata una massa di olio di silicone pari a 1,5 kg.

### 6.3.1 Test dell'11/06/2018

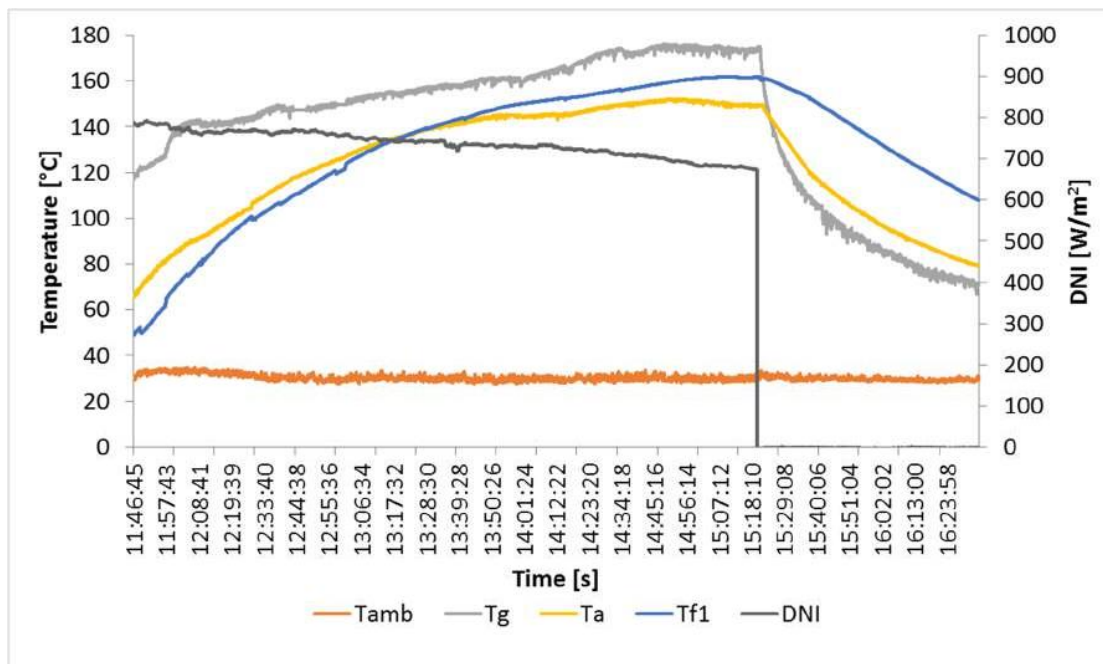
Il test è stato eseguito dalle 11:45 alle 16:30. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era  $736,84 W/m^2$ , con una temperatura ambiente media di  $30,40$  °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera era di  $152,18$  °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 30 minuti per raggiungere la temperatura massima di  $161,95$  °C. Una volta raggiunta la massima temperatura, il forno solare è stato oscurato, rendendolo non più influenzato dalla radiazione solare, per studiarne i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, la fase di raffreddamento del fluido è iniziata con una temperatura ambiente media di  $29,82$  °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1<br>NIF | Tamb  | Tg     | Ta    | Tfl   | DNI              | cp_oil    |
|------------|----------|-----------------|-------|--------|-------|-------|------------------|-----------|
|            |          | mV              | °C    | °C     | °C    | °C    | W/m <sup>2</sup> | J/(kg °C) |
| 11/06/2018 | 11:46:45 | 6,882           | 31,03 | 117,97 | 65,39 | 49,14 | 787,39           | 1541,70   |
| 11/06/2018 | 11:46:46 | 6,882           | 30,89 | 117,42 | 65,32 | 49,16 | 787,43           | 1541,73   |
| 11/06/2018 | 11:46:47 | 6,882           | 30,98 | 117,72 | 65,37 | 49,2  | 787,4            | 1541,80   |
| 11/06/2018 | 11:46:48 | 6,879           | 30,83 | 117,78 | 65,63 | 49,23 | 787,12           | 1541,86   |
| 11/06/2018 | 11:46:49 | 6,878           | 30,71 | 117,63 | 65,67 | 49,24 | 786,95           | 1541,88   |
| 11/06/2018 | 11:46:50 | 6,877           | 30,47 | 117,87 | 65,75 | 49,26 | 786,86           | 1541,91   |
| 11/06/2018 | 11:46:51 | 6,876           | 30,28 | 118,02 | 65,8  | 49,29 | 786,76           | 1541,97   |
| 11/06/2018 | 11:46:52 | 6,874           | 30,24 | 118,34 | 65,98 | 49,32 | 786,49           | 1542,02   |
| 11/06/2018 | 11:46:53 | 6,872           | 29,97 | 118,22 | 66,15 | 49,34 | 786,23           | 1542,06   |
| 11/06/2018 | 11:46:54 | 6,87            | 29,87 | 118    | 66,09 | 49,35 | 786,08           | 1542,07   |
| 11/06/2018 | 11:46:55 | 6,867           | 29,93 | 117,68 | 65,9  | 49,38 | 785,74           | 1542,13   |
| 11/06/2018 | 11:46:56 | 6,868           | 30,07 | 117,79 | 65,84 | 49,44 | 785,77           | 1542,24   |
| 11/06/2018 | 11:46:57 | 6,866           | 30,2  | 117,59 | 66,02 | 49,44 | 785,64           | 1542,24   |
| 11/06/2018 | 11:46:58 | 6,867           | 30,29 | 117,35 | 66,29 | 49,48 | 785,72           | 1542,31   |
| 11/06/2018 | 11:46:59 | 6,865           | 30,01 | 117,88 | 66,51 | 49,5  | 785,41           | 1542,34   |
| 11/06/2018 | 11:47:00 | 6,865           | 29,55 | 118,3  | 66,43 | 49,53 | 785,43           | 1542,40   |
| 11/06/2018 | 11:47:01 | 6,866           | 29,62 | 118    | 66,26 | 49,56 | 785,55           | 1542,45   |
| 11/06/2018 | 11:47:02 | 6,864           | 29,84 | 118,04 | 66,4  | 49,57 | 785,31           | 1542,47   |
| 11/06/2018 | 11:47:03 | 6,862           | 29,89 | 118,27 | 66,61 | 49,61 | 785,09           | 1542,54   |
| 11/06/2018 | 11:47:04 | 6,861           | 29,94 | 118,72 | 66,49 | 49,64 | 784,97           | 1542,60   |
| 11/06/2018 | 11:47:05 | 6,858           | 29,84 | 118,96 | 66,48 | 49,66 | 784,71           | 1542,63   |
| 11/06/2018 | 11:47:06 | 6,858           | 29,97 | 118,84 | 66,44 | 49,69 | 784,65           | 1542,69   |
| 11/06/2018 | 11:47:07 | 6,858           | 30,11 | 118,59 | 66,32 | 49,72 | 784,65           | 1542,74   |
| 11/06/2018 | 11:47:08 | 6,858           | 30,28 | 118,28 | 66,17 | 49,73 | 784,63           | 1542,76   |
| 11/06/2018 | 11:47:09 | 6,858           | 30,33 | 118,34 | 66,04 | 49,76 | 784,61           | 1542,81   |
| 11/06/2018 | 11:47:10 | 6,857           | 30,39 | 118,35 | 66,04 | 49,79 | 784,56           | 1542,87   |
| 11/06/2018 | 11:47:11 | 6,855           | 30,31 | 118,38 | 66,25 | 49,81 | 784,31           | 1542,90   |

**Fig. 87** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:



**Fig. 88** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 11/06/2018)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), è rimasta costante per la totalità del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è rimasta più o meno costante, risultando quasi orizzontale, il che significa che quasi nessuna nuvola durante il test. Il calo di DNI quando il suo valore era di circa  $672,91 \text{ W}/\text{m}^2$  a circa 15,20 è evidente ed è stato causato dall'oscuramento del fornello solare (questo è dove inizia la fase di raffreddamento dell'olio di silicone). La linea blu identifica la temperatura del fluido, ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino alla temperatura di  $161,95 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 22 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 9     | COOLING      | Test 9     |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 11/06/2018 | Date         | 11/06/2018 |
| Start                     | 11:46      | Start        | 15:20      |
| End                       | 15:20      | End          | 16:34      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 161,95     |
| Tstart (°C)               | 49,14      | Tend (°C)    | 107,95     |
| Tmax (°C)                 | 161,95     | Tamb,av (°C) | 29,82      |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 736,84     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 30,40      |              |            |

### 6.3.2 Test del 27/09/2018

Il test è stato eseguito dalle 10:33 alle 13:38. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 883,47 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 17,33 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera era di 129,56 °C, il fluido impiegava circa 2 ore per raggiungere la temperatura massima di 131,25 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare è stato oscurato, rendendolo non più influenzato dalla radiazione solare, per studiare i suoi tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, la fase di raffreddamento del fluido è iniziata con una temperatura ambiente media di 17,48 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>mV | Tamb<br>°C | Tg<br>°C | Ta<br>°C | Tf<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> | cp_oil<br>J/(kg °C) |
|------------|----------|-----------------|------------|----------|----------|----------|-------------------------|---------------------|
| 27/09/2018 | 10:33:55 | 7,289           | 16,39      | 73,63    | 31,19    | 37,73    | 833,94                  | 1521,15             |
| 27/09/2018 | 10:33:56 | 7,291           | 16,38      | 73,74    | 31,21    | 37,75    | 834,18                  | 1521,19             |
| 27/09/2018 | 10:33:57 | 7,289           | 16,36      | 73,84    | 31,22    | 37,77    | 834                     | 1521,23             |
| 27/09/2018 | 10:33:58 | 7,287           | 16,36      | 73,99    | 31,24    | 37,82    | 833,8                   | 1521,32             |
| 27/09/2018 | 10:33:59 | 7,286           | 16,41      | 74,13    | 31,28    | 37,86    | 833,68                  | 1521,39             |
| 27/09/2018 | 10:34:00 | 7,286           | 16,4       | 74,21    | 31,3     | 37,88    | 833,66                  | 1521,42             |
| 27/09/2018 | 10:34:01 | 7,288           | 16,38      | 74,27    | 31,31    | 37,9     | 833,82                  | 1521,46             |
| 27/09/2018 | 10:34:02 | 7,288           | 16,42      | 74,34    | 31,34    | 37,93    | 833,83                  | 1521,51             |
| 27/09/2018 | 10:34:03 | 7,288           | 16,46      | 74,42    | 31,43    | 37,97    | 833,85                  | 1521,59             |
| 27/09/2018 | 10:34:04 | 7,29            | 16,44      | 74,54    | 31,51    | 38       | 834,07                  | 1521,64             |
| 27/09/2018 | 10:34:05 | 7,289           | 16,29      | 74,62    | 31,53    | 38,03    | 834,02                  | 1521,69             |
| 27/09/2018 | 10:34:06 | 7,29            | 16,2       | 74,69    | 31,55    | 38,05    | 834,07                  | 1521,73             |
| 27/09/2018 | 10:34:07 | 7,289           | 16,15      | 74,81    | 31,57    | 38,1     | 833,95                  | 1521,82             |
| 27/09/2018 | 10:34:08 | 7,286           | 16,12      | 74,9     | 31,59    | 38,14    | 833,61                  | 1521,89             |
| 27/09/2018 | 10:34:09 | 7,283           | 16,11      | 74,99    | 31,59    | 38,16    | 833,32                  | 1521,93             |
| 27/09/2018 | 10:34:10 | 7,281           | 16,13      | 75,09    | 31,62    | 38,18    | 833,07                  | 1521,96             |
| 27/09/2018 | 10:34:11 | 7,282           | 16,16      | 75,16    | 31,65    | 38,2     | 833,17                  | 1522,00             |
| 27/09/2018 | 10:34:12 | 7,284           | 16,2       | 75,23    | 31,67    | 38,22    | 833,37                  | 1522,04             |
| 27/09/2018 | 10:34:13 | 7,282           | 16,24      | 75,34    | 31,7     | 38,25    | 833,22                  | 1522,09             |
| 27/09/2018 | 10:34:14 | 7,281           | 16,28      | 75,42    | 31,7     | 38,27    | 833,08                  | 1522,13             |
| 27/09/2018 | 10:34:15 | 7,279           | 16,31      | 75,45    | 31,72    | 38,3     | 832,85                  | 1522,18             |
| 27/09/2018 | 10:34:16 | 7,276           | 16,22      | 75,62    | 31,77    | 38,34    | 832,49                  | 1522,25             |
| 27/09/2018 | 10:34:17 | 7,273           | 16,18      | 75,76    | 31,79    | 38,38    | 832,18                  | 1522,32             |
| 27/09/2018 | 10:34:18 | 7,274           | 16,19      | 75,86    | 31,81    | 38,41    | 832,21                  | 1522,38             |
| 27/09/2018 | 10:34:19 | 7,274           | 16,21      | 75,93    | 31,84    | 38,43    | 832,27                  | 1522,41             |
| 27/09/2018 | 10:34:20 | 7,275           | 16,24      | 76,01    | 31,87    | 38,47    | 832,42                  | 1522,49             |
| 27/09/2018 | 10:34:21 | 7,277           | 16,26      | 76,1     | 31,91    | 38,5     | 832,62                  | 1522,54             |

**Fig. 89** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:

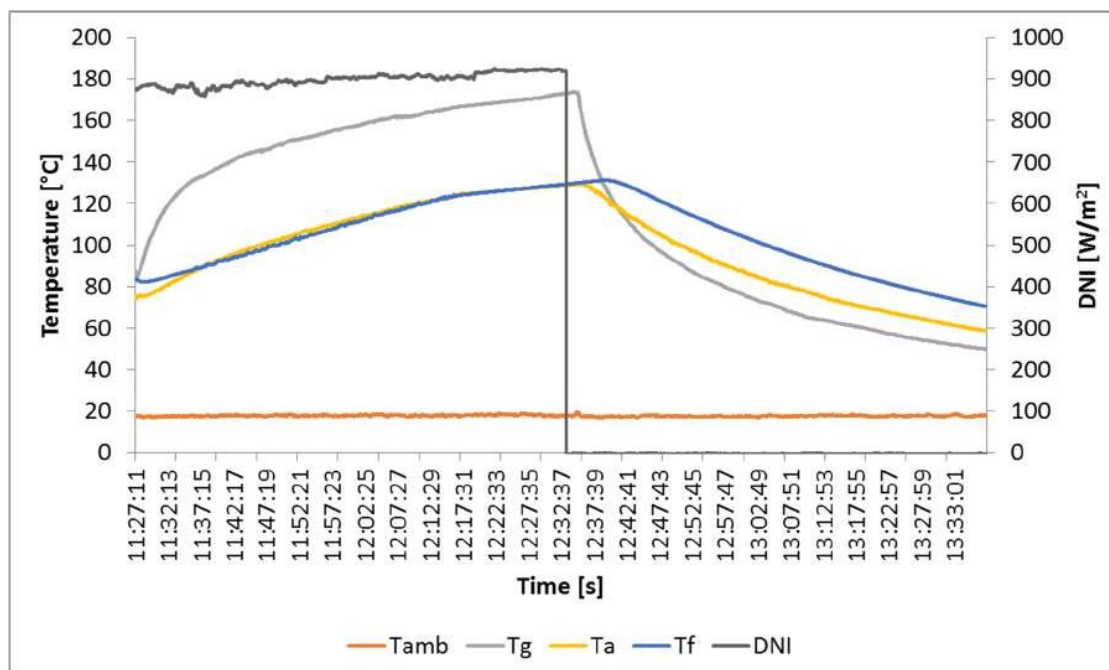


Fig. 90 - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 27/09/2018)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), è rimasta costante per la totalità del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è rimasto più o meno costante, risultando quasi orizzontale, il che significa che quasi nessuna nuvola durante il test. Il calo di DNI quando il suo valore era di circa  $913 \text{ W}/\text{m}^2$  a circa 12:33 è evidente ed è stato causato dall'oscuramento del forno solare (questo è dove inizia la fase di raffreddamento dell'olio di silicone). La linea blu identifica la temperatura del fluido, ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino alla temperatura di  $131 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $70,33 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 23 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 10    | COOLING      | Test 10    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 27/09/2018 | Date         | 27/09/2018 |
| Start                     | 10:33      | Start        | 12:33      |
| End                       | 12:33      | End          | 13:38      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 131,25     |
| Tstart (°C)               | 37,73      | Tend (°C)    | 70,33      |
| Tmax (°C)                 | 131,25     | Tamb,av (°C) | 17,48      |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 883,47     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 17,33      |              |            |

### 6.3.3 Test dell'11/06/2019

Il test è stato eseguito dalle 11:00 alle 14:00. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 691,69 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 31,18 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera era di 127,67 °C, il fluido impiegava circa 3 ore per raggiungere la temperatura massima di 131,32 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare è stato oscurato, rendendolo non più influenzato dalla radiazione solare, per studiare i suoi tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, la fase di raffreddamento del fluido è iniziata con una temperatura ambiente media di 30,16 °C.

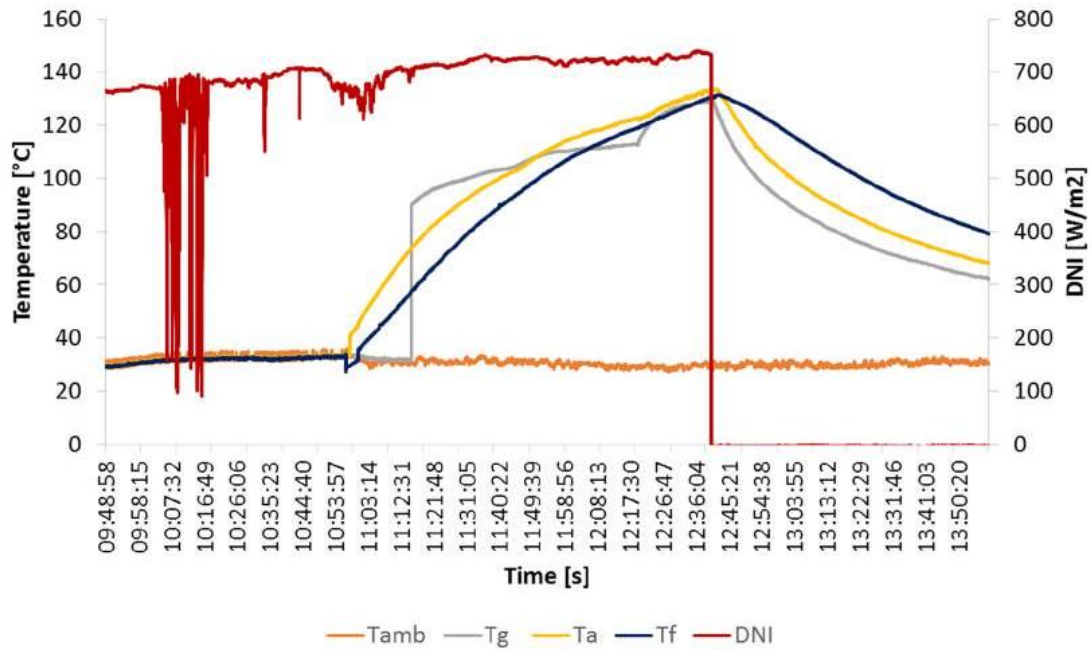
Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Tamb<br>°C | Tg<br>°C | Ta<br>°C | Tf<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|------------|----------|----------|----------|-------------------------|
| 11/06/2019 | 09:49:00 | 29,47      | 29,56    | 29,54    | 29,02    | 663,72                  |
| 11/06/2019 | 09:49:01 | 29,83      | 29,71    | 29,69    | 29,27    | 663,53                  |
| 11/06/2019 | 09:49:02 | 30,08      | 29,84    | 29,86    | 29,3     | 663,66                  |
| 11/06/2019 | 09:49:03 | 30,17      | 29,92    | 29,84    | 29,22    | 663,2                   |
| 11/06/2019 | 09:49:04 | 30,05      | 29,75    | 29,68    | 29,11    | 663,02                  |
| 11/06/2019 | 09:49:05 | 29,93      | 29,62    | 29,61    | 29,18    | 662,9                   |
| 11/06/2019 | 09:49:06 | 29,95      | 29,54    | 29,58    | 29,13    | 662,95                  |
| 11/06/2019 | 09:49:07 | 30,18      | 29,74    | 29,76    | 29,31    | 663,14                  |
| 11/06/2019 | 09:49:08 | 30,48      | 29,94    | 29,97    | 29,38    | 663,1                   |
| 11/06/2019 | 09:49:09 | 30,66      | 29,86    | 29,84    | 29,39    | 663,49                  |
| 11/06/2019 | 09:49:10 | 31,15      | 29,84    | 29,75    | 29,33    | 663,05                  |
| 11/06/2019 | 09:49:11 | 31,52      | 29,63    | 29,67    | 29,17    | 663,14                  |
| 11/06/2019 | 09:49:12 | 31,55      | 29,68    | 29,71    | 29,18    | 663,02                  |
| 11/06/2019 | 09:49:13 | 31,42      | 29,47    | 29,54    | 29,15    | 663,07                  |
| 11/06/2019 | 09:49:14 | 31,51      | 29,5     | 29,69    | 29,09    | 662,97                  |
| 11/06/2019 | 09:49:15 | 31,17      | 29,31    | 29,4     | 29,06    | 663,17                  |
| 11/06/2019 | 09:49:16 | 31,15      | 29,27    | 29,43    | 28,96    | 663,14                  |
| 11/06/2019 | 09:49:17 | 31,31      | 29,36    | 29,53    | 29,12    | 663,66                  |
| 11/06/2019 | 09:49:18 | 31,27      | 29,36    | 29,51    | 29,11    | 663,97                  |
| 11/06/2019 | 09:49:19 | 31,26      | 29,42    | 29,54    | 29,01    | 663,74                  |
| 11/06/2019 | 09:49:20 | 31,05      | 29,45    | 29,57    | 29,11    | 663,41                  |
| 11/06/2019 | 09:49:21 | 31,07      | 29,51    | 29,66    | 29,3     | 663,46                  |
| 11/06/2019 | 09:49:22 | 30,75      | 29,63    | 29,82    | 29,28    | 663,56                  |
| 11/06/2019 | 09:49:23 | 30,58      | 29,45    | 29,63    | 29,17    | 663,2                   |
| 11/06/2019 | 09:49:24 | 30,46      | 29,49    | 29,65    | 29,17    | 662,95                  |
| 11/06/2019 | 09:49:25 | 30,09      | 29,28    | 29,49    | 29,21    | 662,85                  |
| 11/06/2019 | 09:49:26 | 29,98      | 29,32    | 29,44    | 29,12    | 662,66                  |

**Fig. 91** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:





**Fig. 92** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 11/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ), è rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Questa, nella prima parte del test, presenta numerosi picchi causati dalla presenza di molti cloud durante l'acquisizione dei dati. Dopo le 11:00 torna ad essere costante, risultando orizzontale. Il calo del DNI quando il suo valore era di circa  $750 \text{ W}/\text{m}^2$  a circa 12:40 è evidente ed era causato dall'oscuramento del forno solare (è qui che inizia la fase di raffreddamento dell'olio di silicone). La linea blu identifica la temperatura del fluido, ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino alla temperatura di  $131 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,19 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 24** - Riepilogo dei parametri

| HEATING                   | Test 11    | COOLING      | Test 11    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 11/06/2019 | Date         | 11/06/2019 |
| Start                     | 09:48      | Start        | 12:40      |
| End                       | 12:40      | End          | 13:59      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 131,32     |
| Tstart (°C)               | 29,07      | Tend (°C)    | 79,19      |
| Tmax (°C)                 | 131,32     | Tamb,av (°C) | 30,16      |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 691,69     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 31,18      |              |            |

### 6.3.4 Test del 12/06/2019

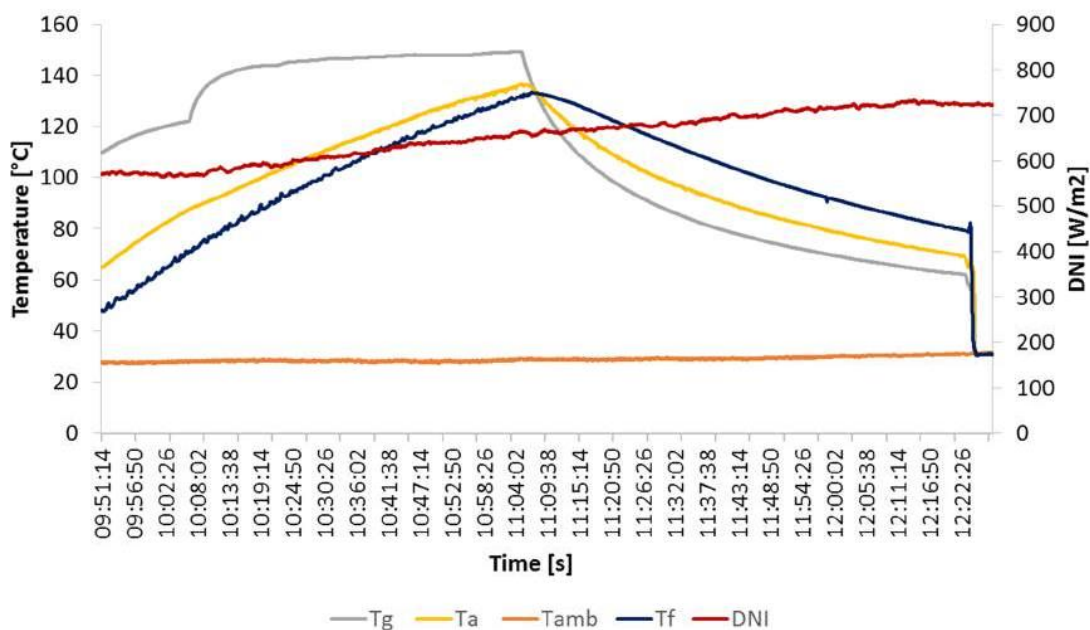
Il test è stato eseguito dalle 09:50 alle 12:25. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 607,16 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 28,18 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera era di 136,49 °C, il fluido impiegava circa 1 ora e 20 minuti per raggiungere la temperatura massima di 133,27 °C. Una volta raggiunta la massima temperatura, il forno solare è stato oscurato, rendendolo non più influenzato dalla radiazione solare, per studiarne i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, la fase di raffreddamento del fluido è iniziata con una temperatura ambiente media di 29,56 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Tamb<br>°C | Tg<br>°C | Ta<br>°C | Tf<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|------------|----------|----------|----------|-------------------------|
| 12/06/2019 | 09:51:16 | 27,59      | 109,62   | 64,64    | 48,23    | 569,71                  |
| 12/06/2019 | 09:51:17 | 27,7       | 109,64   | 64,66    | 48,29    | 569,93                  |
| 12/06/2019 | 09:51:18 | 27,64      | 109,67   | 64,67    | 48,31    | 569,96                  |
| 12/06/2019 | 09:51:19 | 27,72      | 109,7    | 64,74    | 48,26    | 569,86                  |
| 12/06/2019 | 09:51:20 | 27,81      | 109,71   | 64,76    | 48,19    | 569,99                  |
| 12/06/2019 | 09:51:21 | 27,85      | 109,7    | 64,75    | 48,11    | 570,49                  |
| 12/06/2019 | 09:51:22 | 27,84      | 109,76   | 64,74    | 48,01    | 570,81                  |
| 12/06/2019 | 09:51:23 | 27,74      | 109,78   | 64,77    | 47,92    | 570,76                  |
| 12/06/2019 | 09:51:24 | 27,77      | 109,82   | 64,77    | 47,82    | 570,61                  |
| 12/06/2019 | 09:51:25 | 27,77      | 109,8    | 64,79    | 47,73    | 570,73                  |
| 12/06/2019 | 09:51:26 | 27,93      | 109,82   | 64,79    | 47,65    | 570,73                  |
| 12/06/2019 | 09:51:27 | 27,77      | 109,88   | 64,86    | 47,55    | 570,61                  |
| 12/06/2019 | 09:51:28 | 27,69      | 109,91   | 64,98    | 47,48    | 570,9                   |
| 12/06/2019 | 09:51:29 | 27,6       | 109,95   | 65,02    | 47,45    | 571,07                  |
| 12/06/2019 | 09:51:30 | 27,6       | 109,97   | 65,03    | 47,43    | 571,12                  |
| 12/06/2019 | 09:51:31 | 27,46      | 110      | 65,03    | 47,41    | 571,34                  |
| 12/06/2019 | 09:51:32 | 27,55      | 110,01   | 65,06    | 47,41    | 571,34                  |
| 12/06/2019 | 09:51:33 | 27,5       | 110,04   | 65,11    | 47,42    | 571,27                  |
| 12/06/2019 | 09:51:34 | 27,52      | 110,06   | 65,13    | 47,43    | 571,32                  |
| 12/06/2019 | 09:51:35 | 27,59      | 110,05   | 65,16    | 47,45    | 571,38                  |
| 12/06/2019 | 09:51:36 | 27,49      | 110,08   | 65,22    | 47,47    | 571,21                  |
| 12/06/2019 | 09:51:37 | 27,46      | 110,13   | 65,26    | 47,52    | 571,14                  |
| 12/06/2019 | 09:51:38 | 27,44      | 110,16   | 65,25    | 47,55    | 570,92                  |
| 12/06/2019 | 09:51:39 | 27,39      | 110,16   | 65,26    | 47,57    | 570,68                  |
| 12/06/2019 | 09:51:40 | 27,53      | 110,19   | 65,27    | 47,62    | 570,42                  |
| 12/06/2019 | 09:51:41 | 27,56      | 110,21   | 65,33    | 47,66    | 570,3                   |
| 12/06/2019 | 09:51:42 | 27,69      | 110,23   | 65,36    | 47,69    | 570,15                  |

**Fig. 93** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:



**Fig. 94** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 12/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), è rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa è rimasta più o meno costante, risultando quasi orizzontale, il che significa che quasi nessuna nuvola durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido, cioè l'olio di silicone. La tendenza aumenta nella fase di riscaldamento del fluido fino alla temperatura di  $133,27 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $75,14 \text{ °C}$ .

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 25 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 12    | COOLING      | Test 12    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 12/06/2019 | Date         | 12/06/2019 |
| Start                     | 09:51      | Start        | 11:06      |
| End                       | 11:06      | End          | 12:24      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 133,27     |
| Tstart (°C)               | 48,10      | Tend (°C)    | 75,14      |
| Tmax (°C)                 | 133,27     | Tamb,av (°C) | 29,56      |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 607,16     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 28,18      |              |            |

### **6.3.5 Test del 17/06/2019**

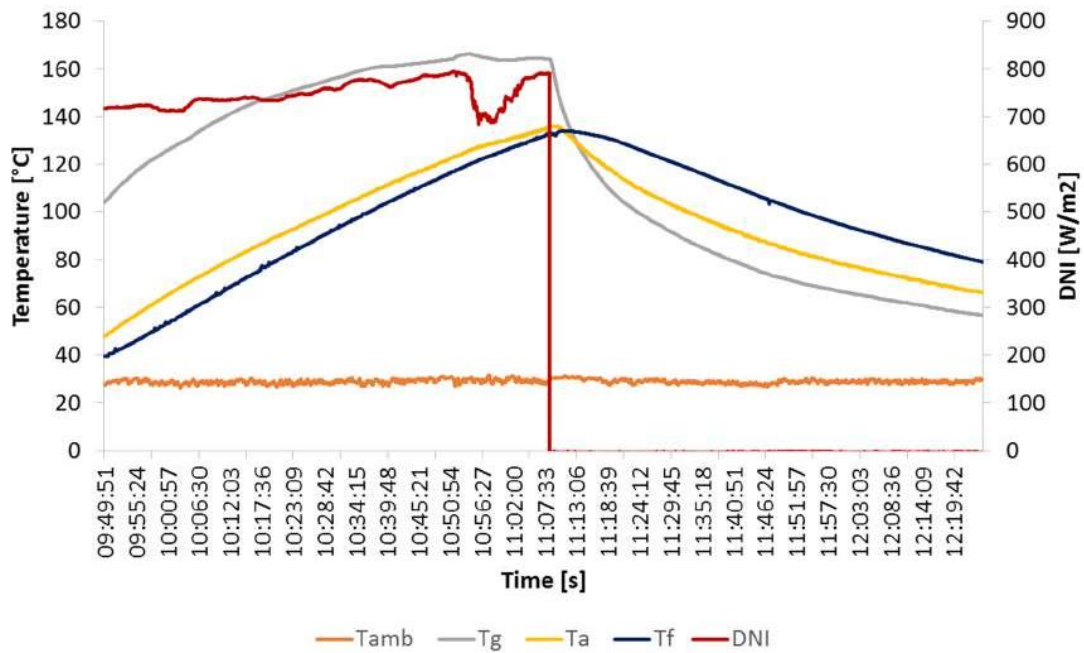
Il test è stato eseguito dalle 09:50 alle 12:25. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 747,85 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 28,88 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera era di 136,19 °C, il fluido impiegava circa 1 ora e 20 minuti per raggiungere la temperatura massima di 133,79 °C. Una volta raggiunta la massima temperatura, il forno solare è stato oscurato, rendendolo non più influenzato dalla radiazione solare, per studiare i suoi tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, la fase di raffreddamento del fluido è iniziata con una temperatura ambiente media di 28,90 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Tamb<br>°C | Tg<br>°C | Ta<br>°C | Tf<br>°C | DNI<br>W/m <sup>2</sup> |
|------------|----------|------------|----------|----------|----------|-------------------------|
| 17/06/2019 | 09:49:53 | 27,41      | 103,88   | 47,76    | 39,51    | 717,32                  |
| 17/06/2019 | 09:49:54 | 27,41      | 103,92   | 47,81    | 39,52    | 717,28                  |
| 17/06/2019 | 09:49:55 | 27,35      | 103,97   | 47,85    | 39,51    | 717,15                  |
| 17/06/2019 | 09:49:56 | 27,36      | 104,04   | 47,89    | 39,52    | 717,03                  |
| 17/06/2019 | 09:49:57 | 27,36      | 104,09   | 47,96    | 39,53    | 717,03                  |
| 17/06/2019 | 09:49:58 | 27,4       | 104,14   | 48,01    | 39,53    | 717,15                  |
| 17/06/2019 | 09:49:59 | 27,47      | 104,18   | 48,03    | 39,53    | 716,93                  |
| 17/06/2019 | 09:50:00 | 27,55      | 104,22   | 48,03    | 39,53    | 716,88                  |
| 17/06/2019 | 09:50:01 | 27,6       | 104,26   | 48,04    | 39,54    | 716,84                  |
| 17/06/2019 | 09:50:02 | 27,69      | 104,31   | 48,06    | 39,56    | 716,93                  |
| 17/06/2019 | 09:50:03 | 27,73      | 104,35   | 48,13    | 39,56    | 716,74                  |
| 17/06/2019 | 09:50:04 | 27,8       | 104,39   | 48,13    | 39,57    | 716,81                  |
| 17/06/2019 | 09:50:05 | 27,88      | 104,46   | 48,15    | 39,59    | 716,75                  |
| 17/06/2019 | 09:50:06 | 27,86      | 104,52   | 48,2     | 39,61    | 716,81                  |
| 17/06/2019 | 09:50:07 | 27,81      | 104,56   | 48,25    | 39,6     | 716,81                  |
| 17/06/2019 | 09:50:08 | 27,81      | 104,59   | 48,31    | 39,61    | 716,77                  |
| 17/06/2019 | 09:50:09 | 27,73      | 104,64   | 48,36    | 39,61    | 716,84                  |
| 17/06/2019 | 09:50:10 | 27,78      | 104,68   | 48,35    | 39,62    | 716,76                  |
| 17/06/2019 | 09:50:11 | 27,88      | 104,73   | 48,4     | 39,63    | 716,86                  |
| 17/06/2019 | 09:50:12 | 27,93      | 104,78   | 48,44    | 39,63    | 716,91                  |
| 17/06/2019 | 09:50:13 | 27,95      | 104,82   | 48,45    | 39,64    | 716,82                  |
| 17/06/2019 | 09:50:14 | 28,03      | 104,88   | 48,46    | 39,64    | 716,82                  |
| 17/06/2019 | 09:50:15 | 28,06      | 104,93   | 48,45    | 39,63    | 716,94                  |
| 17/06/2019 | 09:50:16 | 28,19      | 104,98   | 48,44    | 39,63    | 717,08                  |
| 17/06/2019 | 09:50:17 | 28,3       | 105,02   | 48,46    | 39,63    | 717,28                  |
| 17/06/2019 | 09:50:18 | 28,37      | 105,06   | 48,46    | 39,63    | 717,18                  |
| 17/06/2019 | 09:50:19 | 28,41      | 105,11   | 48,46    | 39,61    | 717,28                  |

**Fig. 95** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:



**Fig. 96** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 17/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ), è rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Questa presenta alcuni picchi dovuti al passaggio delle nuvole durante la prova. La linea blu identifica la temperatura del fluido, ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino alla temperatura di  $133 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $78,99 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 26** - Riepilogo dei parametri

| HEATING                   | Test 13    | COOLING      | Test 13    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 17/06/2019 | Date         | 17/06/2019 |
| Start                     | 09:49      | Start        | 11:08      |
| End                       | 11:08      | End          | 12:24      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 133,79     |
| Tstart (°C)               | 39,51      | Tend (°C)    | 78,99      |
| Tmax (°C)                 | 133,79     | Tamb,av (°C) | 28,90      |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 747,85     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 28,88      |              |            |

### 6.3.6 Riepilogo delle prove a carico con olio di silicone

Le tabelle seguenti mostrano le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale del fluido al termine del test che verranno utilizzate in il passo successivo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ . I dati relativi a tutti i test effettuati usando l'olio di silicio come fluido di prova sono inseriti per avere una visione generale del comportamento testato sul fluido all'interno del nostro forno solare.

**Tabella 27** - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio di silicone come fluido di prova

| HEATING                               | Test 9     | Test 10    | Test 11    | Test 12    | Test 13    |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date                                  | 11/06/2018 | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 |
| Start                                 | 11:46      | 10:33      | 09:48      | 09:51      | 09:49      |
| End                                   | 15:20      | 12:33      | 12:40      | 11:06      | 11:08      |
| m <sub>f</sub> (kg)                   | 1.5        | 1.5        | 1.5        | 1.5        | 1.5        |
| T <sub>start</sub> (°C)               | 49.14      | 37.73      | 29.07      | 48.10      | 39.51      |
| T <sub>max</sub> (°C)                 | 161.95     | 131.25     | 131.32     | 133.27     | 133.79     |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 736.84     | 883.47     | 691.69     | 607.16     | 747.85     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 30.40      | 17.33      | 31.18      | 28.18      | 28.88      |



**Tabella 28** - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio di silicone come fluido di prova

| COOLING           | Test 9     | Test 10    | Test 11    | Test 12    | Test 13    |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date              | 11/06/2018 | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 |
| Start             | 15:20      | 12:33      | 12:40      | 11:06      | 11:08      |
| End               | 16:34      | 13:38      | 13:59      | 12:24      | 12:24      |
| $m_f$ (kg)        | 1.5        | 1.5        | 1.5        | 1.5        | 1.5        |
| $T_{max}$ (°C)    | 161.95     | 131.25     | 131.32     | 133.27     | 133.79     |
| $T_{end}$ (°C)    | 107.95     | 70.33      | 79.19      | 75.14      | 78.99      |
| $T_{amb,av}$ (°C) | 29.82      | 17.48      | 30.16      | 29.56      | 28.90      |

## 6.4 Prove a carico con eritritolo come accumulo di energia termica

Per i seguenti test è stata utilizzata la pentola a doppio fondo descritta nel capitolo 3, riempita con PCM, e olio di silicone come liquido di prova. Le quantità di liquido utilizzato sono rispettivamente 1,5 kg di olio e 2,5 kg di PCM. Durante questi test sono state rilevate le temperature fondamentali sia nelle fasi di riscaldamento che di raffreddamento:

- Temperatura ambiente  $T_{amb}$  [°C];
- Temperatura del vetro  $T_g$  [°C];
- Temperatura dell'assorbitore  $T_a$  [°C];
- Temperatura del fluido interno nella pentola:  $T_f$  [°C];
- Temperatura PCM nell'intercapedine della pentola:  $T_{PCM1}$  e  $T_{PCM2}$  [°C];
- Radiazione solare DNI [ $W/m^2$ ].

Una volta che la temperatura dell'olio ha raggiunto circa 130 °C, il forno solare è stato orientato nella direzione opposta rispetto al Sole in modo da non essere colpito dalla radiazione solare diretta, ma abbiamo continuato a rilevare temperature e tempi di raffreddamento. Abbiamo quindi scelto intervalli di temperature comuni a tutti i test effettuati, sia in fase di riscaldamento che di raffreddamento, al fine di poter calcolare i parametri necessari per la determinazione della seconda figura di merito  $F_2$  durante la fase di elaborazione dati.

### 6.4.1 Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo del 24/07/2018

Il test è stato eseguito dalle 11:40 alle 16:40. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era  $841,13 W/m^2$ , con una temperatura ambiente media di  $28,76 °C$ . La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di

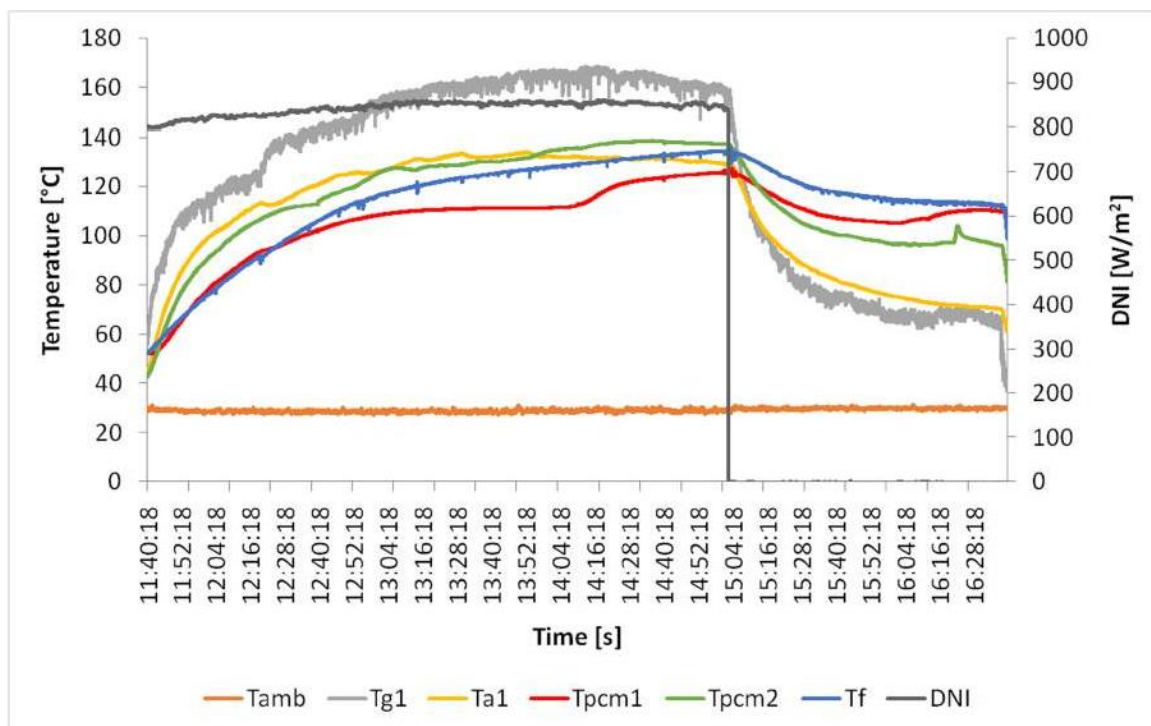
133,96 °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 15 minuti per raggiungere la temperatura massima di 136,35 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 29,75 °C. La temperatura massima registrata per l'eritritolo era di 138,65 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>mV | Tamb<br>°C | Tgl<br>°C | Tal<br>°C | Tpcm1<br>°C | Tpcm2<br>°C | Tf<br>°C | DNI<br>W/m2 | cp_oil<br>J/(kg °C) |
|------------|----------|-----------------|------------|-----------|-----------|-------------|-------------|----------|-------------|---------------------|
| 24/07/2018 | 11:40:18 | 7               | 28,87      | 56,02     | 44,12     | 52,58       | 42,47       | 52,39    | 800,89      | 1547,55             |
| 24/07/2018 | 11:40:19 | 7               | 29,03      | 55,59     | 44,2      | 52,57       | 42,5        | 52,37    | 800,93      | 1547,51             |
| 24/07/2018 | 11:40:20 | 6,999           | 29,1       | 55,41     | 44,26     | 52,56       | 42,52       | 52,37    | 800,83      | 1547,51             |
| 24/07/2018 | 11:40:21 | 6,998           | 29,35      | 56,06     | 44,35     | 52,55       | 42,57       | 52,35    | 800,67      | 1547,48             |
| 24/07/2018 | 11:40:22 | 6,996           | 29,6       | 57,05     | 44,43     | 52,54       | 42,61       | 52,34    | 800,42      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:23 | 6,995           | 29,75      | 57,65     | 44,48     | 52,53       | 42,64       | 52,34    | 800,35      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:24 | 6,992           | 29,86      | 57,92     | 44,54     | 52,51       | 42,67       | 52,34    | 799,99      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:25 | 6,991           | 29,96      | 58,21     | 44,59     | 52,5        | 42,71       | 52,34    | 799,85      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:26 | 6,989           | 29,95      | 58,59     | 44,64     | 52,5        | 42,74       | 52,34    | 799,62      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:27 | 6,988           | 29,98      | 59,06     | 44,67     | 52,48       | 42,76       | 52,33    | 799,53      | 1547,44             |
| 24/07/2018 | 11:40:28 | 6,988           | 30,02      | 59,48     | 44,73     | 52,48       | 42,79       | 52,34    | 799,58      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:29 | 6,99            | 30,17      | 59,64     | 44,79     | 52,47       | 42,83       | 52,34    | 799,74      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:30 | 6,988           | 30,34      | 59,9      | 44,85     | 52,45       | 42,87       | 52,33    | 799,56      | 1547,44             |
| 24/07/2018 | 11:40:31 | 6,988           | 30,34      | 59,99     | 44,92     | 52,44       | 42,94       | 52,33    | 799,51      | 1547,44             |
| 24/07/2018 | 11:40:32 | 6,987           | 30,11      | 60,34     | 44,96     | 52,43       | 42,97       | 52,33    | 799,45      | 1547,44             |
| 24/07/2018 | 11:40:33 | 6,986           | 30,02      | 60,44     | 45,01     | 52,42       | 43,01       | 52,34    | 799,28      | 1547,46             |
| 24/07/2018 | 11:40:34 | 6,987           | 29,96      | 60,74     | 45,05     | 52,42       | 43,04       | 52,35    | 799,38      | 1547,48             |
| 24/07/2018 | 11:40:35 | 6,989           | 29,9       | 60,57     | 45,09     | 52,42       | 43,1        | 52,36    | 799,68      | 1547,49             |
| 24/07/2018 | 11:40:36 | 6,99            | 29,78      | 60,52     | 45,11     | 52,42       | 43,14       | 52,36    | 799,75      | 1547,49             |
| 24/07/2018 | 11:40:37 | 6,992           | 29,58      | 60,17     | 45,13     | 52,41       | 43,17       | 52,37    | 799,99      | 1547,51             |
| 24/07/2018 | 11:40:38 | 6,992           | 29,5       | 60,19     | 45,15     | 52,39       | 43,21       | 52,38    | 800,01      | 1547,53             |
| 24/07/2018 | 11:40:39 | 6,992           | 29,5       | 60,64     | 45,2      | 52,39       | 43,28       | 52,4     | 799,99      | 1547,57             |
| 24/07/2018 | 11:40:40 | 6,994           | 29,58      | 61,17     | 45,27     | 52,39       | 43,32       | 52,41    | 800,25      | 1547,58             |
| 24/07/2018 | 11:40:41 | 6,995           | 29,62      | 60,96     | 45,33     | 52,38       | 43,36       | 52,43    | 800,4       | 1547,62             |
| 24/07/2018 | 11:40:42 | 6,995           | 29,63      | 60,72     | 45,4      | 52,37       | 43,38       | 52,45    | 800,37      | 1547,66             |
| 24/07/2018 | 11:40:43 | 6,995           | 29,82      | 59,9      | 45,43     | 52,36       | 43,41       | 52,46    | 800,38      | 1547,67             |
| 24/07/2018 | 11:40:44 | 6,995           | 29,9       | 59,75     | 45,45     | 52,36       | 43,44       | 52,48    | 800,37      | 1547,71             |

**Fig. 97** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:



**Fig. 98** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 24/07/2018)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultante orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $133 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $98,94 \text{ °C}$ . Le linee rosse e verdi identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea rossa è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $110 \text{ °C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dell'eritritolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 29 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 14    | COOLING      | Test 14    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 24/07/2018 | Date         | 24/07/2018 |
| Start                     | 11:40      | Start        | 15:02      |
| End                       | 15:02      | End          | 16:40      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 136,35     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)     | 2,5        | Tend (°C)    | 98,44      |
| Tstart (°C)               | 52,39      | Tamb,av (°C) | 29,75      |
| Tmax (°C)                 | 136,35     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 841,13     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 28,76      |              |            |

#### **6.4.2 Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo dell'11/09/2018**

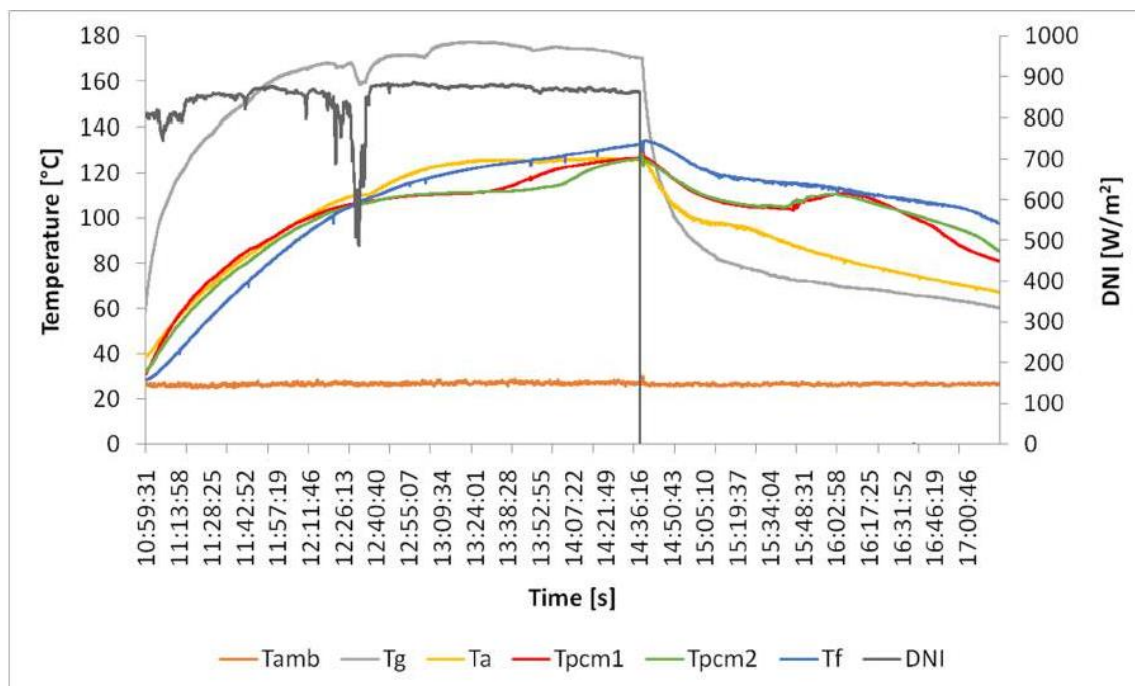
Il test è stato eseguito dalle 11:00 alle 17:15. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 853,57 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 26,69 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 126,63 °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 45 minuti per raggiungere la temperatura massima di 134,33 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 26,46 °C. La temperatura massima registrata per l'eritritolo era di 129,86 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>NIP | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    | DNI              | cp_oil    |
|------------|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|-----------|
|            |          | mV               | °C    | °C    | °C    | °C    | °C    | °C    | W/m <sup>2</sup> | J/(kg °C) |
| 11/09/2018 | 10:59:31 | 7,027            | 26,07 | 58,82 | 38,36 | 30,9  | 31,79 | 28,41 | 804,05           | 1504,37   |
| 11/09/2018 | 10:59:32 | 7,027            | 26,08 | 59,01 | 38,38 | 30,93 | 31,81 | 28,42 | 804,01           | 1504,39   |
| 11/09/2018 | 10:59:33 | 7,029            | 26,09 | 59,16 | 38,39 | 30,96 | 31,83 | 28,41 | 804,25           | 1504,37   |
| 11/09/2018 | 10:59:34 | 7,032            | 26,08 | 59,31 | 38,41 | 30,99 | 31,85 | 28,44 | 804,54           | 1504,43   |
| 11/09/2018 | 10:59:35 | 7,038            | 26,06 | 59,43 | 38,41 | 31,01 | 31,87 | 28,44 | 805,31           | 1504,43   |
| 11/09/2018 | 10:59:36 | 7,042            | 26,06 | 59,6  | 38,43 | 31,04 | 31,89 | 28,44 | 805,69           | 1504,43   |
| 11/09/2018 | 10:59:37 | 7,057            | 26,11 | 59,87 | 38,44 | 31,07 | 31,91 | 28,45 | 807,42           | 1504,45   |
| 11/09/2018 | 10:59:38 | 7,066            | 26,12 | 60,09 | 38,45 | 31,11 | 31,93 | 28,45 | 808,41           | 1504,45   |
| 11/09/2018 | 10:59:39 | 7,067            | 26,17 | 60,25 | 38,46 | 31,13 | 31,96 | 28,46 | 808,62           | 1504,46   |
| 11/09/2018 | 10:59:40 | 7,069            | 26,25 | 60,42 | 38,46 | 31,16 | 31,98 | 28,47 | 808,79           | 1504,48   |
| 11/09/2018 | 10:59:41 | 7,066            | 26,3  | 60,57 | 38,47 | 31,18 | 32    | 28,46 | 808,48           | 1504,46   |
| 11/09/2018 | 10:59:42 | 7,058            | 26,35 | 60,74 | 38,48 | 31,22 | 32,02 | 28,47 | 807,54           | 1504,48   |
| 11/09/2018 | 10:59:43 | 7,051            | 26,41 | 60,85 | 38,49 | 31,24 | 32,04 | 28,48 | 806,79           | 1504,50   |
| 11/09/2018 | 10:59:44 | 7,039            | 26,38 | 61    | 38,49 | 31,26 | 32,05 | 28,48 | 805,4            | 1504,50   |
| 11/09/2018 | 10:59:45 | 7,029            | 26,33 | 61,13 | 38,51 | 31,28 | 32,07 | 28,49 | 804,22           | 1504,52   |
| 11/09/2018 | 10:59:46 | 7,022            | 26,3  | 61,38 | 38,53 | 31,33 | 32,1  | 28,5  | 803,4            | 1504,54   |
| 11/09/2018 | 10:59:47 | 7,022            | 26,24 | 61,64 | 38,56 | 31,39 | 32,14 | 28,52 | 803,38           | 1504,57   |
| 11/09/2018 | 10:59:48 | 7,019            | 26,26 | 61,8  | 38,57 | 31,4  | 32,14 | 28,52 | 803,04           | 1504,57   |
| 11/09/2018 | 10:59:49 | 7,018            | 26,12 | 61,92 | 38,58 | 31,43 | 32,17 | 28,51 | 802,96           | 1504,55   |
| 11/09/2018 | 10:59:50 | 7,023            | 26,1  | 62,08 | 38,58 | 31,45 | 32,19 | 28,52 | 803,52           | 1504,57   |
| 11/09/2018 | 10:59:51 | 7,029            | 26,1  | 62,22 | 38,6  | 31,47 | 32,2  | 28,53 | 804,2            | 1504,59   |
| 11/09/2018 | 10:59:52 | 7,031            | 26,09 | 62,36 | 38,62 | 31,5  | 32,23 | 28,54 | 804,51           | 1504,61   |
| 11/09/2018 | 10:59:53 | 7,035            | 26,18 | 62,53 | 38,64 | 31,53 | 32,25 | 28,54 | 804,92           | 1504,61   |
| 11/09/2018 | 10:59:54 | 7,039            | 26,15 | 62,66 | 38,65 | 31,56 | 32,27 | 28,55 | 805,38           | 1504,63   |
| 11/09/2018 | 10:59:55 | 7,05             | 26,14 | 62,87 | 38,66 | 31,6  | 32,3  | 28,56 | 806,65           | 1504,64   |
| 11/09/2018 | 10:59:56 | 7,061            | 26,21 | 63,03 | 38,67 | 31,64 | 32,33 | 28,57 | 807,87           | 1504,66   |
| 11/09/2018 | 10:59:57 | 7,069            | 26,19 | 63,12 | 38,69 | 31,67 | 32,36 | 28,58 | 808,75           | 1504,68   |

**Figura 99** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:



**Fig. 100** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 11/09/2018)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante tranne che per un picco per poi tornare in orizzontale. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $134,33 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $97,61 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Le linee rosse e verdi identificano le temperature PCM ( $T_{\text{PCM}}$ ). Osservando la linea verde è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $110 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dell'eritritolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 30 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 15    | COOLING      | Test 15    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 11/09/2018 | Date         | 11/09/2018 |
| Start                     | 10:59      | Start        | 14:37      |
| End                       | 14:37      | End          | 17:15      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 134,33     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)     | 2,5        | Tend (°C)    | 97,61      |
| Tstart (°C)               | 28,41      | Tamb,av (°C) | 26,46      |
| Tmax (°C)                 | 134,33     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 853,57     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 26,69      |              |            |

### 6.4.3 Prova a carico (olio di silicone) con eritritolo del 12/09/2018

Il test è stato eseguito dalle 10:35 alle 17:20. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 857,51 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 27,85 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 117,15 °C, il fluido impiegava circa 4 ore e 30 minuti per raggiungere la temperatura massima di 128,15 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 27,60 °C. La temperatura massima registrata per l'eritritolo era di 127,81 °C.

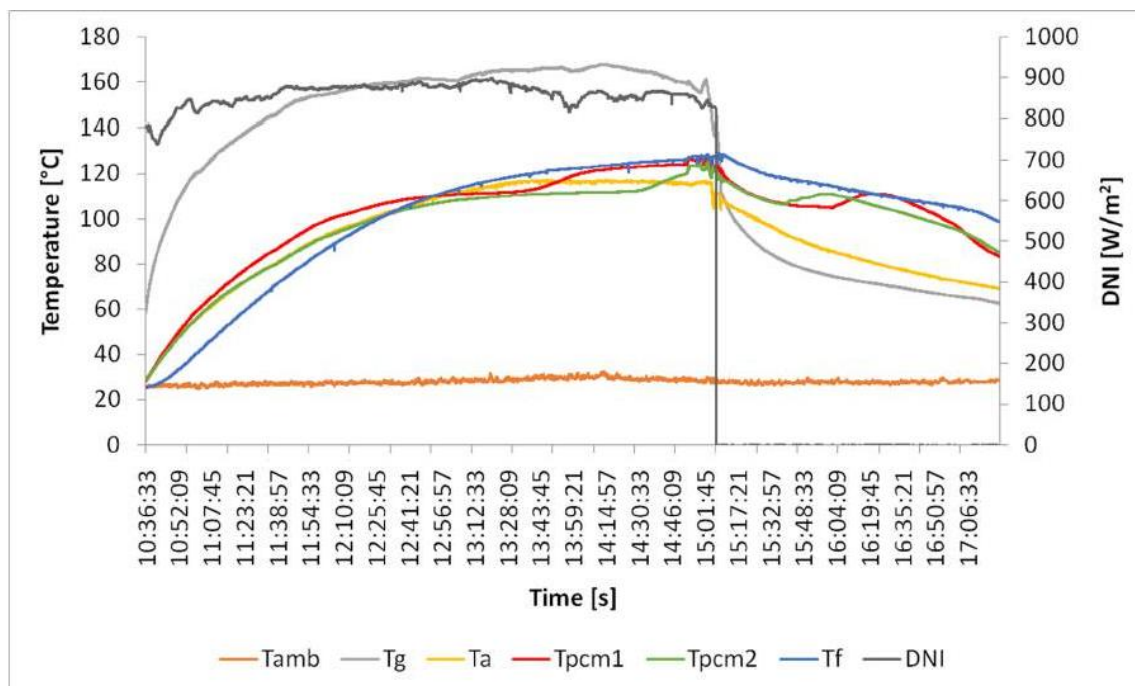
Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>NIP | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    | DNI              | cp_oil    |
|------------|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|-----------|
|            |          | mV               | °C    | °C    | °C    | °C    | °C    | °C    | W/m <sup>2</sup> | J/(kg °C) |
| 12/09/2018 | 10:36:33 | 6,828            | 25,52 | 57,89 | 28,47 | 28,06 | 28,43 | 25,29 | 781,29           | 1498,76   |
| 12/09/2018 | 10:36:34 | 6,826            | 25,53 | 58,04 | 28,48 | 28,08 | 28,45 | 25,29 | 780,98           | 1498,76   |
| 12/09/2018 | 10:36:35 | 6,823            | 25,51 | 58,16 | 28,49 | 28,1  | 28,46 | 25,29 | 780,62           | 1498,76   |
| 12/09/2018 | 10:36:36 | 6,821            | 25,52 | 58,29 | 28,5  | 28,11 | 28,48 | 25,29 | 780,42           | 1498,76   |
| 12/09/2018 | 10:36:37 | 6,82             | 25,56 | 58,46 | 28,52 | 28,15 | 28,51 | 25,3  | 780,36           | 1498,77   |
| 12/09/2018 | 10:36:38 | 6,82             | 25,65 | 58,65 | 28,54 | 28,18 | 28,54 | 25,3  | 780,35           | 1498,77   |
| 12/09/2018 | 10:36:39 | 6,821            | 25,7  | 58,72 | 28,55 | 28,2  | 28,54 | 25,3  | 780,38           | 1498,77   |
| 12/09/2018 | 10:36:40 | 6,821            | 25,78 | 58,86 | 28,57 | 28,22 | 28,58 | 25,3  | 780,45           | 1498,77   |
| 12/09/2018 | 10:36:41 | 6,82             | 25,81 | 58,99 | 28,59 | 28,24 | 28,59 | 25,3  | 780,33           | 1498,77   |
| 12/09/2018 | 10:36:42 | 6,819            | 25,74 | 59,13 | 28,62 | 28,26 | 28,61 | 25,32 | 780,18           | 1498,81   |
| 12/09/2018 | 10:36:43 | 6,817            | 25,69 | 59,26 | 28,64 | 28,28 | 28,63 | 25,31 | 780,03           | 1498,79   |
| 12/09/2018 | 10:36:44 | 6,816            | 25,61 | 59,38 | 28,66 | 28,31 | 28,65 | 25,33 | 779,87           | 1498,83   |
| 12/09/2018 | 10:36:45 | 6,817            | 25,55 | 59,46 | 28,68 | 28,32 | 28,65 | 25,31 | 779,98           | 1498,79   |
| 12/09/2018 | 10:36:46 | 6,816            | 25,52 | 59,57 | 28,69 | 28,35 | 28,68 | 25,32 | 779,89           | 1498,81   |
| 12/09/2018 | 10:36:47 | 6,813            | 25,46 | 59,73 | 28,72 | 28,38 | 28,7  | 25,32 | 779,51           | 1498,81   |
| 12/09/2018 | 10:36:48 | 6,811            | 25,42 | 59,9  | 28,76 | 28,43 | 28,75 | 25,33 | 779,24           | 1498,83   |
| 12/09/2018 | 10:36:49 | 6,81             | 25,42 | 59,97 | 28,78 | 28,43 | 28,76 | 25,33 | 779,21           | 1498,83   |
| 12/09/2018 | 10:36:50 | 6,808            | 25,43 | 60,12 | 28,8  | 28,45 | 28,78 | 25,34 | 778,97           | 1498,85   |
| 12/09/2018 | 10:36:51 | 6,808            | 25,4  | 60,22 | 28,82 | 28,46 | 28,79 | 25,33 | 779              | 1498,83   |
| 12/09/2018 | 10:36:52 | 6,808            | 25,39 | 60,37 | 28,84 | 28,5  | 28,81 | 25,34 | 778,99           | 1498,85   |
| 12/09/2018 | 10:36:53 | 6,808            | 25,38 | 60,45 | 28,85 | 28,52 | 28,82 | 25,34 | 778,95           | 1498,85   |
| 12/09/2018 | 10:36:54 | 6,81             | 25,27 | 60,56 | 28,88 | 28,54 | 28,84 | 25,35 | 779,19           | 1498,86   |
| 12/09/2018 | 10:36:55 | 6,809            | 25,2  | 60,74 | 28,89 | 28,56 | 28,87 | 25,35 | 779,09           | 1498,86   |
| 12/09/2018 | 10:36:56 | 6,808            | 25,17 | 60,89 | 28,93 | 28,6  | 28,9  | 25,35 | 779              | 1498,86   |
| 12/09/2018 | 10:36:57 | 6,808            | 25,18 | 60,98 | 28,92 | 28,62 | 28,93 | 25,35 | 779              | 1498,86   |
| 12/09/2018 | 10:36:58 | 6,806            | 25,19 | 61,14 | 28,95 | 28,64 | 28,94 | 25,35 | 778,66           | 1498,86   |
| 12/09/2018 | 10:36:59 | 6,803            | 25,17 | 61,29 | 28,97 | 28,67 | 28,95 | 25,34 | 778,42           | 1498,85   |

**Fig. 101** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:





**Fig. 102** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 12/09/2018)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $128,13 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $98,43 \text{ °C}$ . Le linee rosse e verdi identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando queste linee è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $110 \text{ °C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dell'eritritolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 31** - Riepilogo dei parametri

| HEATING                   | Test 16    | COOLING      | Test 16    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 12/09/2018 | Date         | 12/09/2018 |
| Start                     | 10:36      | Start        | 15:07      |
| End                       | 15:07      | End          | 17:21      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 128,15     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)     | 2,5        | Tend (°C)    | 98,43      |
| Tstart (°C)               | 25,29      | Tamb,av (°C) | 27,60      |
| Tmax (°C)                 | 128,15     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 857,51     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 27,85      |              |            |

#### 6.4.4 Prova a carico (olio silconico) con eritritolo del 25/09/2018

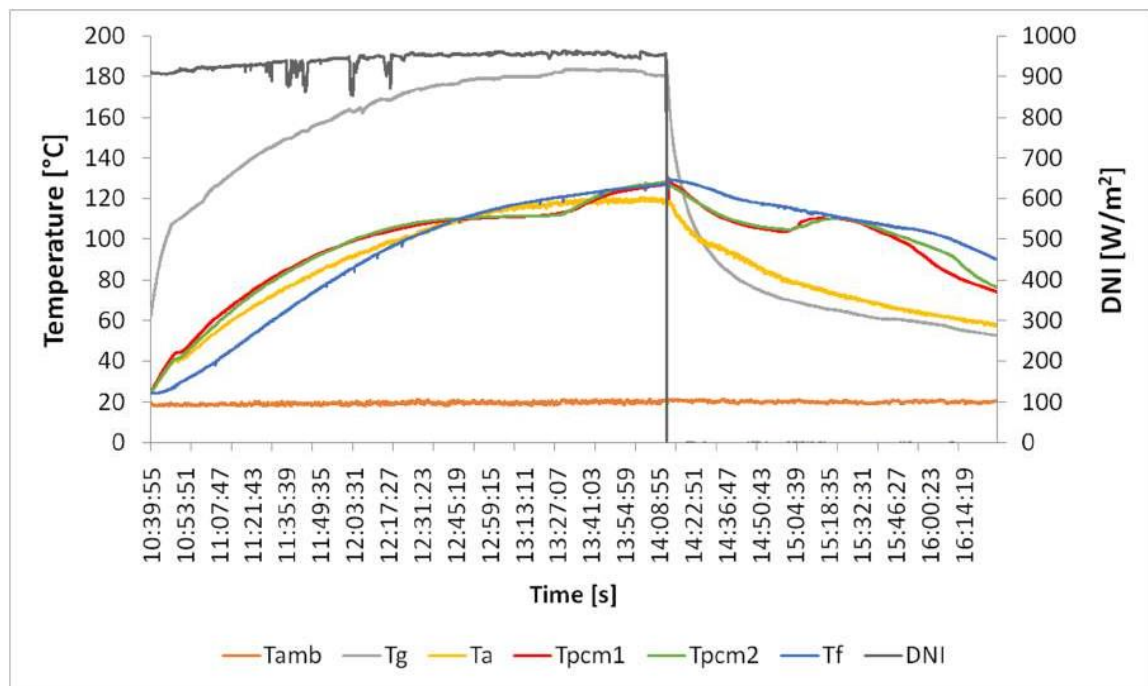
Il test è stato eseguito dalle 10:40 alle 16:30. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 941,28 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 19,22 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 120,47 °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 35 minuti per raggiungere la temperatura massima di 128,92 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 19,94 °C. L'olio di silicone ha impiegato circa 1 ora e 30 minuti per ridurre la temperatura di 25 °C. La temperatura massima registrata per l'eritritolo era di 130,53 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

| Data       | Ora      | Canale 1:<br>NIP | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    | DNI              | cp_oil    |
|------------|----------|------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------------------|-----------|
|            |          | mV               | °C    | °C    | °C    | °C    | °C    | °C    | W/m <sup>2</sup> | J/(kg °C) |
| 25/09/2018 | 10:39:55 | 7,959            | 18,68 | 61,72 | 24,39 | 25,06 | 24,92 | 24,23 | 910,62           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:39:56 | 7,963            | 18,74 | 61,93 | 24,42 | 25,1  | 24,96 | 24,24 | 911,09           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:39:57 | 7,96             | 18,81 | 62,08 | 24,44 | 25,12 | 24,98 | 24,24 | 910,74           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:39:58 | 7,958            | 18,9  | 62,21 | 24,45 | 25,15 | 24,99 | 24,23 | 910,52           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:39:59 | 7,959            | 18,91 | 62,35 | 24,47 | 25,17 | 25,01 | 24,24 | 910,66           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:40:00 | 7,958            | 18,99 | 62,48 | 24,49 | 25,19 | 25,03 | 24,23 | 910,52           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:01 | 7,959            | 19,06 | 62,64 | 24,51 | 25,22 | 25,06 | 24,23 | 910,61           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:02 | 7,959            | 19,12 | 62,77 | 24,53 | 25,25 | 25,08 | 24,22 | 910,62           | 1496,83   |
| 25/09/2018 | 10:40:03 | 7,956            | 19,16 | 62,91 | 24,58 | 25,28 | 25,1  | 24,23 | 910,25           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:04 | 7,958            | 19,25 | 63,12 | 24,62 | 25,31 | 25,14 | 24,23 | 910,47           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:05 | 7,959            | 19,36 | 63,35 | 24,65 | 25,35 | 25,17 | 24,24 | 910,64           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:40:06 | 7,958            | 19,36 | 63,48 | 24,68 | 25,37 | 25,19 | 24,23 | 910,57           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:07 | 7,955            | 19,35 | 63,6  | 24,73 | 25,4  | 25,22 | 24,23 | 910,23           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:08 | 7,958            | 19,33 | 63,75 | 24,76 | 25,42 | 25,23 | 24,23 | 910,47           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:09 | 7,954            | 19,32 | 63,89 | 24,78 | 25,45 | 25,25 | 24,23 | 910,11           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:10 | 7,953            | 19,25 | 64,01 | 24,8  | 25,47 | 25,27 | 24,24 | 909,98           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:40:11 | 7,952            | 19,21 | 64,14 | 24,83 | 25,51 | 25,3  | 24,23 | 909,79           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:12 | 7,947            | 19,18 | 64,28 | 24,85 | 25,53 | 25,32 | 24,24 | 909,31           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:40:13 | 7,947            | 19,18 | 64,48 | 24,91 | 25,57 | 25,36 | 24,23 | 909,26           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:14 | 7,948            | 19,14 | 64,65 | 24,94 | 25,6  | 25,37 | 24,22 | 909,36           | 1496,83   |
| 25/09/2018 | 10:40:15 | 7,945            | 19,16 | 64,81 | 24,97 | 25,63 | 25,4  | 24,23 | 909,07           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:16 | 7,945            | 19,12 | 64,99 | 24,99 | 25,66 | 25,43 | 24,23 | 909,09           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:17 | 7,945            | 19,09 | 65,14 | 25    | 25,68 | 25,44 | 24,24 | 909,04           | 1496,87   |
| 25/09/2018 | 10:40:18 | 7,945            | 19,11 | 65,25 | 25,01 | 25,71 | 25,47 | 24,23 | 909,02           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:19 | 7,944            | 19,1  | 65,34 | 25,03 | 25,74 | 25,49 | 24,23 | 908,97           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:20 | 7,944            | 19,11 | 65,46 | 25,05 | 25,77 | 25,51 | 24,23 | 908,87           | 1496,85   |
| 25/09/2018 | 10:40:21 | 7,94             | 19,08 | 65,59 | 25,08 | 25,79 | 25,53 | 24,23 | 908,46           | 1496,85   |

**Fig. 103** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata in quell'intervallo di tempo specifico:



**Fig. 104** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 25/09/2018)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea grigio scuro identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultante orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $128,92 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $89,84 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Le linee rosse e verdi identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando queste linee è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $110 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dell'eritritolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 32** - Riepilogo dei parametri

| HEATING                               | Test 17    | COOLING      | Test 17    |
|---------------------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                                  | 25/09/2018 | Date         | 25/09/2018 |
| Start                                 | 10:39      | Start        | 14:12      |
| End                                   | 14:12      | End          | 16:28      |
| mf (kg)                               | 1,5        | Tmax (°C)    | 128,92     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 89,84      |
| Tstart (°C)                           | 24,23      | Tamb,av (°C) | 19,94      |
| Tmax (°C)                             | 128,92     |              |            |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 941,28     |              |            |
| Tamb,av (°C)                          | 19,22      |              |            |

#### 6.4.5 Riepilogo delle prove a carico con eritritolo come accumulo di energia termica

Le tabelle seguenti mostrano le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale del fluido al termine del test che verranno utilizzate in il prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ . I dati relativi a tutti i test effettuati usando l'olio di silicone come fluido di prova inserito nella pentola con il PCM è inserito per avere una panoramica generale del comportamento del fluido testato all'interno del nostro forno solare. Nei paragrafi seguenti analizzeremo le differenze riscontrate tra il solo olio e il petrolio e l'eritritolo.

**Tabella 33** - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio di silicone come fluido di prova ed eritritolo come PCM

| HEATING                               | Test 14    | Test 15    | Test 16    | Test 17    |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Date                                  | 24/07/2018 | 11/09/2018 | 12/09/2018 | 25/09/2018 |
| Start                                 | 11:40      | 10:59      | 10:36      | 10:39      |
| End                                   | 15:02      | 14:37      | 15:07      | 14:12      |
| m <sub>f</sub> (kg)                   | 1.5        | 1.5        | 1.5        | 1.5        |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2.5        | 2.5        | 2.5        | 2.5        |
| T <sub>start</sub> (°C)               | 52.39      | 28.41      | 25.29      | 24.23      |
| T <sub>max</sub> (°C)                 | 136.35     | 134.33     | 128.15     | 128.92     |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 841.13     | 853.57     | 857.51     | 941.28     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 28.76      | 26.69      | 27.85      | 19.22      |

**Tabella 34** - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio di silicone come liquido di prova ed eritritolo come PCM

| COOLING           | Test 14    | Test 15    | Test 16    | Test 17    |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|
| Date              | 24/07/2018 | 11/09/2018 | 12/09/2018 | 25/09/2018 |
| Start             | 15:02      | 14:37      | 15:07      | 14:12      |
| End               | 16:40      | 17:15      | 17:21      | 16:28      |
| $m_f$ (kg)        | 1.5        | 1.5        | 1.5        | 1.5        |
| $m_{PCM}$ (kg)    | 2.5        | 2.5        | 2.5        | 2.5        |
| $T_{max}$ (°C)    | 136.35     | 134.33     | 128.15     | 128.92     |
| $T_{end}$ (°C)    | 98.44      | 97.61      | 98.43      | 89.84      |
| $T_{amb,av}$ (°C) | 29.75      | 26.46      | 27.60      | 19.94      |

## 6.5 Prove a carico con xilitolo come accumulo di energia termica

Per i seguenti test è stata utilizzata la pentola a doppio fondo descritta nel capitolo 2, riempita con PCM, e olio di silicone come liquido di prova. Le quantità di liquido utilizzate sono rispettivamente 2 kg di olio e 2,5 kg di PCM per le prime due prove, 1,5 kg di olio e 2,5 kg di PCM per i restanti tre. Durante questi test sono state rilevate le temperature fondamentali sia nelle fasi di riscaldamento che di raffreddamento:

- Temperatura ambiente  $T_{amb}$  [°C];
- Temperatura del vetro  $T_g$  [°C];
- Temperatura dell'assorbitore  $T_a$  [°C];
- Temperatura del fluido interno nella pentola:  $T_f$  [°C];
- Temperatura PCM nell'intercapedine della pentola:  $T_{PCM1}$  e  $T_{PCM2}$  [°C];
- Radiazione solare DNI [ $W/m^2$ ].

Una volta che la temperatura dell'olio ha raggiunto circa 110 °C, il forno solare è stato orientato nella direzione opposta rispetto al Sole in modo da non essere colpito dalla radiazione solare diretta, ma abbiamo continuato a rilevare temperature e tempi di raffreddamento. Abbiamo quindi scelto intervalli di temperature comuni a tutti i test effettuati, sia in fase di riscaldamento che di raffreddamento, al fine di poter calcolare i parametri necessari per la determinazione della seconda figura di merito  $F_2$  durante la fase di elaborazione dati.

### 6.5.1 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 03/06/2019

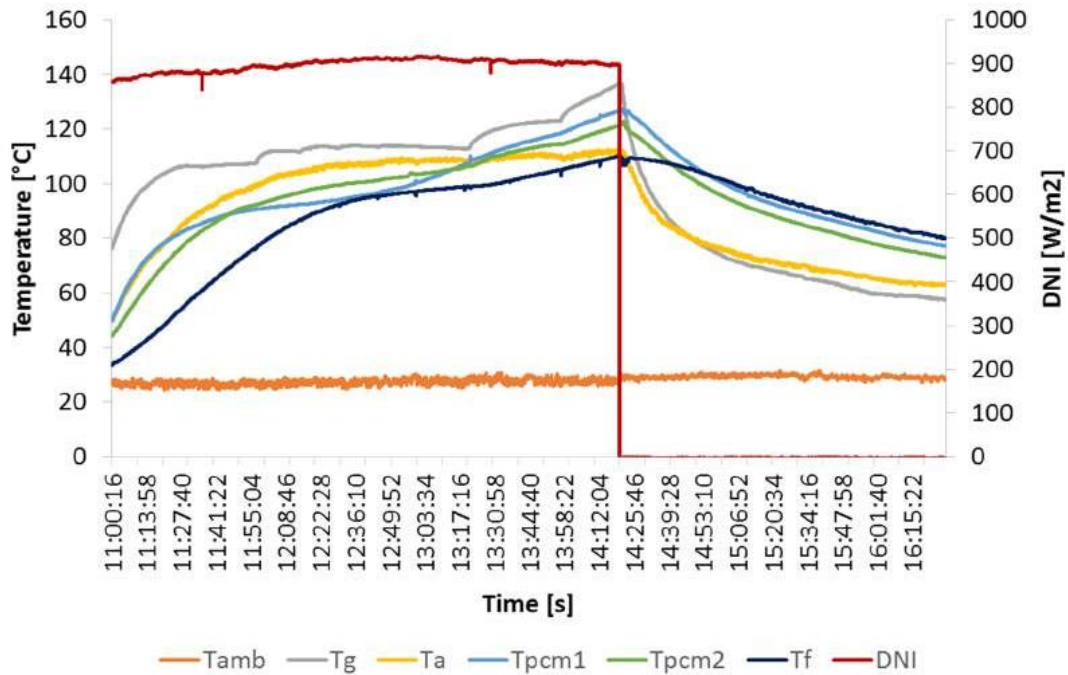
Il test è stato eseguito dalle 11:00 alle 16:30. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era  $896,67 \text{ W/m}^2$ , con una temperatura ambiente media di  $27,21 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di  $112,57 \text{ }^\circ\text{C}$ , il fluido impiegava circa 3 ore e 20 minuti per raggiungere la temperatura massima di  $110,28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di  $29,26 \text{ }^\circ\text{C}$ . La temperatura massima registrata per lo xilitolo era di  $126,7 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|             |          | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    |  | cp_olio  |
|-------------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|----------|
| 2019-06-031 | 11:00:16 | 857,52 | 27,05 | 76,06 | 49,69 | 49,57 | 44,24 | 33,44 |  | 1513,43  |
| 2019-06-031 | 11:00:17 | 857,67 | 27,1  | 76,09 | 49,74 | 49,6  | 44,26 | 33,44 |  | 1513,43  |
| 2019-06-031 | 11:00:18 | 857,72 | 27,1  | 76,13 | 49,72 | 49,62 | 44,27 | 33,44 |  | 1513,43  |
| 2019-06-031 | 11:00:19 | 857,72 | 27,12 | 76,21 | 49,83 | 49,68 | 44,29 | 33,44 |  | 1513,43  |
| 2019-06-031 | 11:00:20 | 857,45 | 27,21 | 76,24 | 49,79 | 49,71 | 44,29 | 33,46 |  | 1513,466 |
| 2019-06-031 | 11:00:21 | 857,52 | 27,27 | 76,28 | 49,8  | 49,75 | 44,31 | 33,45 |  | 1513,448 |
| 2019-06-031 | 11:00:22 | 857,84 | 27,3  | 76,34 | 49,82 | 49,78 | 44,33 | 33,46 |  | 1513,466 |
| 2019-06-031 | 11:00:23 | 857,58 | 27,35 | 76,38 | 49,8  | 49,81 | 44,35 | 33,47 |  | 1513,484 |
| 2019-06-031 | 11:00:24 | 857,57 | 27,44 | 76,44 | 49,85 | 49,85 | 44,37 | 33,49 |  | 1513,52  |
| 2019-06-031 | 11:00:25 | 857,11 | 27,48 | 76,48 | 49,9  | 49,87 | 44,36 | 33,48 |  | 1513,502 |
| 2019-06-031 | 11:00:26 | 857,53 | 27,51 | 76,51 | 49,91 | 49,92 | 44,39 | 33,5  |  | 1513,538 |
| 2019-06-031 | 11:00:27 | 857,53 | 27,51 | 76,56 | 49,96 | 49,95 | 44,4  | 33,5  |  | 1513,538 |
| 2019-06-031 | 11:00:28 | 857,72 | 27,5  | 76,65 | 49,97 | 50,01 | 44,43 | 33,52 |  | 1513,574 |
| 2019-06-031 | 11:00:29 | 857,91 | 27,42 | 76,69 | 49,96 | 50,04 | 44,44 | 33,52 |  | 1513,574 |
| 2019-06-031 | 11:00:30 | 857,77 | 27,44 | 76,73 | 49,93 | 50,07 | 44,46 | 33,53 |  | 1513,592 |
| 2019-06-031 | 11:00:31 | 857,79 | 27,45 | 76,77 | 49,91 | 50,09 | 44,47 | 33,53 |  | 1513,592 |
| 2019-06-031 | 11:00:32 | 858,18 | 27,5  | 76,79 | 49,97 | 50,13 | 44,49 | 33,54 |  | 1513,61  |
| 2019-06-031 | 11:00:33 | 858,23 | 27,53 | 76,79 | 50,07 | 50,16 | 44,49 | 33,55 |  | 1513,628 |
| 2019-06-031 | 11:00:34 | 858,27 | 27,55 | 76,86 | 50,14 | 50,19 | 44,51 | 33,55 |  | 1513,628 |
| 2019-06-031 | 11:00:35 | 858,06 | 27,56 | 76,91 | 50,16 | 50,22 | 44,52 | 33,56 |  | 1513,646 |
| 2019-06-031 | 11:00:36 | 857,92 | 27,59 | 76,95 | 50,19 | 50,25 | 44,53 | 33,56 |  | 1513,646 |
| 2019-06-031 | 11:00:37 | 858,23 | 27,62 | 77,03 | 50,22 | 50,33 | 44,56 | 33,59 |  | 1513,7   |
| 2019-06-031 | 11:00:38 | 858,21 | 27,67 | 77,08 | 50,19 | 50,37 | 44,58 | 33,6  |  | 1513,718 |
| 2019-06-031 | 11:00:39 | 858,04 | 27,66 | 77,12 | 50,17 | 50,39 | 44,61 | 33,61 |  | 1513,736 |
| 2019-06-031 | 11:00:40 | 858,42 | 27,71 | 77,14 | 50,22 | 50,43 | 44,62 | 33,62 |  | 1513,754 |
| 2019-06-031 | 11:00:41 | 858,23 | 27,74 | 77,19 | 50,24 | 50,46 | 44,63 | 33,64 |  | 1513,79  |
| 2019-06-031 | 11:00:42 | 858,59 | 27,63 | 77,23 | 50,24 | 50,48 | 44,64 | 33,63 |  | 1513,772 |
| 2019-06-031 | 11:00:43 | 858,37 | 27,51 | 77,28 | 50,23 | 50,52 | 44,65 | 33,65 |  | 1513,808 |
| 2019-06-031 | 11:00:44 | 858,44 | 27,41 | 77,33 | 50,24 | 50,56 | 44,68 | 33,67 |  | 1513,844 |

**Fig. 105** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 106** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 03/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $110 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,88 \text{ °C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $92 \text{ °C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dello xilitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .



**Tabella 35 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 18    | COOLING      | Test 18    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 03/06/2019 | Date         | 03/06/2019 |
| Start                     | 11:00      | Start        | 14:20      |
| End                       | 14:20      | End          | 16:28      |
| mf (kg)                   | 2,0        | Tmax (°C)    | 110,28     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)     | 2,5        | Tend (°C)    | 79,82      |
| Tstart (°C)               | 33,44      | Tamb,av (°C) | 29,26      |
| Tmax (°C)                 | 110,28     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 896,67     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 27,21      |              |            |

### 6.5.2 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 04/06/2019

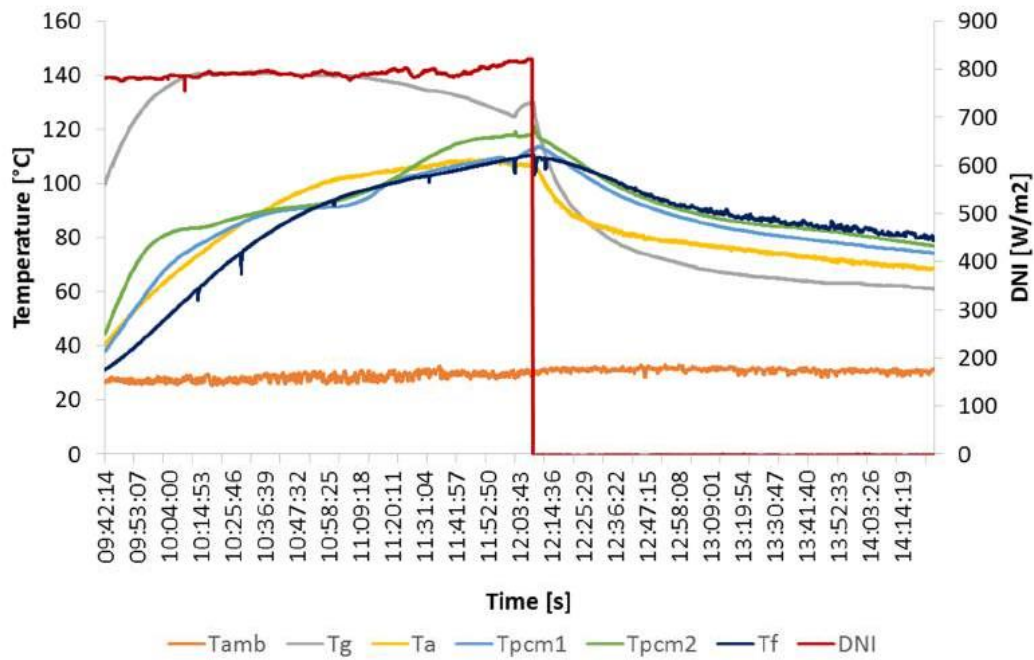
Il test è stato eseguito dalle 09:40 alle 14:25. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 791,93 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 28,40 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 108,33 °C, il fluido impiegava circa 2 ore e 30 minuti per raggiungere la temperatura massima di 110,63 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 31,03 °C. La temperatura massima registrata per lo xilitolo era di 118,98 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            |          | DNI    | Tamb  | Tg     | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    |  | cp_olio  |
|------------|----------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--|----------|
| 04/06/2019 | 09:42:14 | 781,24 | 26,81 | 99,6   | 40,46 | 37,86 | 44,17 | 31,1  |  | 1509,217 |
| 04/06/2019 | 09:42:15 | 781,13 | 26,88 | 99,65  | 40,41 | 37,88 | 44,21 | 31,12 |  | 1509,253 |
| 04/06/2019 | 09:42:16 | 781,19 | 26,87 | 99,7   | 40,4  | 37,9  | 44,25 | 31,13 |  | 1509,271 |
| 04/06/2019 | 09:42:17 | 781,08 | 26,59 | 99,79  | 40,43 | 37,95 | 44,33 | 31,16 |  | 1509,325 |
| 04/06/2019 | 09:42:18 | 781,22 | 26,52 | 99,84  | 40,42 | 37,97 | 44,36 | 31,17 |  | 1509,343 |
| 04/06/2019 | 09:42:19 | 781,13 | 26,44 | 99,89  | 40,4  | 37,99 | 44,41 | 31,19 |  | 1509,379 |
| 04/06/2019 | 09:42:20 | 781,12 | 26,41 | 99,93  | 40,4  | 38,01 | 44,44 | 31,2  |  | 1509,397 |
| 04/06/2019 | 09:42:21 | 780,95 | 26,4  | 99,99  | 40,36 | 38,03 | 44,48 | 31,22 |  | 1509,433 |
| 04/06/2019 | 09:42:22 | 781,31 | 26,44 | 100,04 | 40,38 | 38,07 | 44,52 | 31,23 |  | 1509,451 |
| 04/06/2019 | 09:42:23 | 781,29 | 26,58 | 100,09 | 40,45 | 38,08 | 44,56 | 31,25 |  | 1509,487 |
| 04/06/2019 | 09:42:24 | 781,36 | 26,66 | 100,13 | 40,51 | 38,1  | 44,59 | 31,25 |  | 1509,487 |
| 04/06/2019 | 09:42:25 | 781,29 | 26,69 | 100,18 | 40,49 | 38,12 | 44,62 | 31,26 |  | 1509,505 |
| 04/06/2019 | 09:42:26 | 781,02 | 26,61 | 100,27 | 40,51 | 38,17 | 44,7  | 31,28 |  | 1509,541 |
| 04/06/2019 | 09:42:27 | 780,93 | 26,57 | 100,31 | 40,58 | 38,18 | 44,73 | 31,31 |  | 1509,595 |
| 04/06/2019 | 09:42:28 | 781,19 | 26,6  | 100,36 | 40,55 | 38,21 | 44,77 | 31,31 |  | 1509,595 |
| 04/06/2019 | 09:42:29 | 781,08 | 26,62 | 100,4  | 40,54 | 38,23 | 44,8  | 31,32 |  | 1509,613 |
| 04/06/2019 | 09:42:30 | 781,19 | 26,66 | 100,45 | 40,54 | 38,24 | 44,85 | 31,34 |  | 1509,649 |
| 04/06/2019 | 09:42:31 | 781,25 | 26,8  | 100,51 | 40,66 | 38,27 | 44,89 | 31,35 |  | 1509,667 |
| 04/06/2019 | 09:42:32 | 781,24 | 26,9  | 100,55 | 40,78 | 38,29 | 44,93 | 31,37 |  | 1509,703 |
| 04/06/2019 | 09:42:33 | 781,22 | 26,92 | 100,6  | 40,82 | 38,32 | 44,97 | 31,39 |  | 1509,739 |
| 04/06/2019 | 09:42:34 | 781,39 | 26,92 | 100,64 | 40,83 | 38,35 | 45,01 | 31,4  |  | 1509,757 |
| 04/06/2019 | 09:42:35 | 781,49 | 26,93 | 100,72 | 40,81 | 38,39 | 45,07 | 31,41 |  | 1509,775 |
| 04/06/2019 | 09:42:36 | 781,53 | 26,88 | 100,77 | 40,81 | 38,39 | 45,1  | 31,42 |  | 1509,793 |
| 04/06/2019 | 09:42:37 | 781,59 | 26,8  | 100,81 | 40,88 | 38,41 | 45,13 | 31,43 |  | 1509,811 |
| 04/06/2019 | 09:42:38 | 781,7  | 26,79 | 100,86 | 40,88 | 38,44 | 45,17 | 31,45 |  | 1509,847 |
| 04/06/2019 | 09:42:39 | 781,66 | 26,82 | 100,91 | 40,83 | 38,45 | 45,21 | 31,46 |  | 1509,865 |
| 04/06/2019 | 09:42:40 | 781,48 | 26,9  | 100,96 | 40,8  | 38,48 | 45,26 | 31,47 |  | 1509,883 |
| 04/06/2019 | 09:42:41 | 781,48 | 26,93 | 101,01 | 40,78 | 38,5  | 45,29 | 31,48 |  | 1509,901 |
| 04/06/2019 | 09:42:42 | 781,59 | 26,96 | 101,05 | 40,76 | 38,53 | 45,33 | 31,48 |  | 1509,901 |

**Fig. 107** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 108** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 04/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $110,63 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,40 \text{ °C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $94,73 \text{ °C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dello xilitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 36 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                               | Test 19    | COOLING      | Test 19    |
|---------------------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                                  | 04/06/2019 | Date         | 04/06/2019 |
| Start                                 | 09:42      | Start        | 12:08      |
| End                                   | 12:08      | End          | 14:25      |
| mf (kg)                               | 2,0        | Tmax (°C)    | 110,63     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 79,40      |
| Tstart (°C)                           | 31,10      | Tamb,av (°C) | 31,03      |
| Tmax (°C)                             | 110,63     |              |            |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 791,93     |              |            |
| Tamb,av (°C)                          | 28,40      |              |            |

### 6.5.3 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 05/06/2019

Premessa: durante la prova sono stati riscontrati problemi nella fase di riscaldamento riguardanti un connettore di una delle due termocoppie utilizzate per rilevare la temperatura del PCM. Per questo motivo, abbiamo proceduto impostando le due temperature misurate uguali, facendo riferimento alla termocoppia funzionante tra le due.

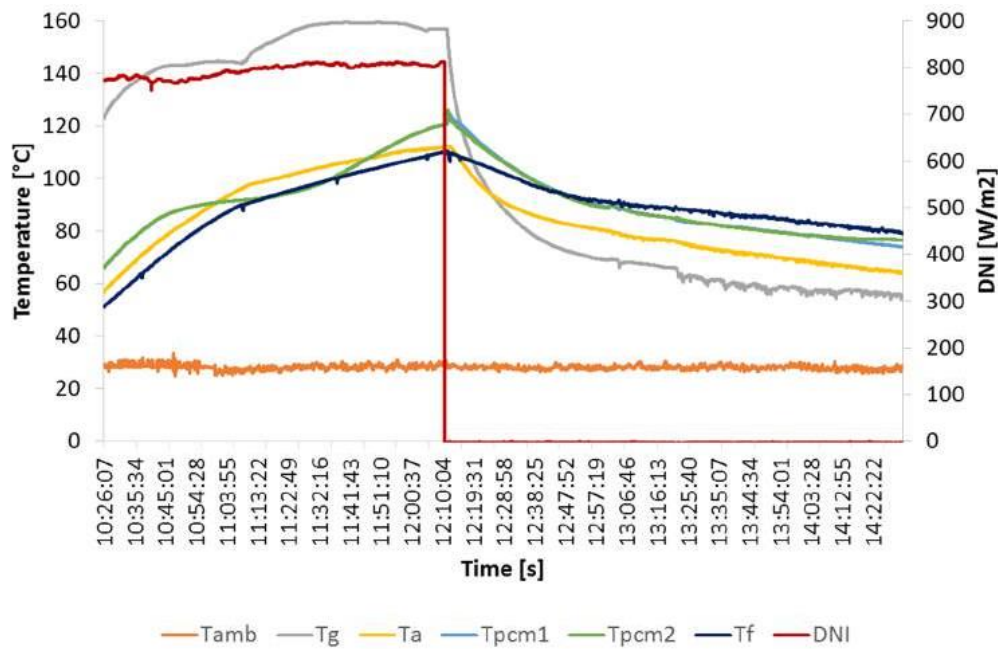
Il test è stato eseguito dalle 10:30 alle 14:30. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era  $793,81 \text{ W/m}^2$ , con una temperatura ambiente media di  $28,25 \text{ °C}$ . La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di  $112,12 \text{ °C}$ , il fluido impiegava circa 1 ora e 50 minuti per raggiungere la temperatura massima di  $110,29 \text{ °C}$ . Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di  $28,01 \text{ °C}$ . La temperatura massima registrata per lo xilitolo era di  $124,63 \text{ °C}$ .

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            |          | DNI    | Tamb  | Tg     | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    |  |          |
|------------|----------|--------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|--|----------|
| 2019-06-05 | 10:26:07 | 771,69 | 28,53 | 122,64 | 56,58 | 65,93 | 65,93 | 51,16 |  | 1545,333 |
| 2019-06-05 | 10:26:08 | 771,88 | 28,32 | 122,69 | 56,64 | 65,96 | 65,96 | 51,18 |  | 1545,369 |
| 2019-06-05 | 10:26:09 | 771,76 | 28,52 | 122,73 | 56,79 | 65,98 | 65,98 | 51,19 |  | 1545,387 |
| 2019-06-05 | 10:26:10 | 771,88 | 28,31 | 122,77 | 56,89 | 65,99 | 65,99 | 51,2  |  | 1545,405 |
| 2019-06-05 | 10:26:11 | 772,06 | 28,32 | 122,85 | 56,88 | 66,03 | 66,03 | 51,23 |  | 1545,459 |
| 2019-06-05 | 10:26:12 | 772,13 | 28,31 | 122,91 | 57    | 66,06 | 66,06 | 51,25 |  | 1545,495 |
| 2019-06-05 | 10:26:13 | 772,13 | 28,31 | 122,91 | 57    | 66,06 | 66,06 | 51,25 |  | 1545,495 |
| 2019-06-05 | 10:26:14 | 772,3  | 29,2  | 123,02 | 57,06 | 66,11 | 66,11 | 51,29 |  | 1545,567 |
| 2019-06-05 | 10:26:15 | 772,66 | 28,16 | 123,07 | 57,05 | 66,13 | 66,13 | 51,32 |  | 1545,621 |
| 2019-06-05 | 10:26:16 | 772,63 | 28,56 | 123,12 | 57,12 | 66,15 | 66,15 | 51,33 |  | 1545,639 |
| 2019-06-05 | 10:26:17 | 772,59 | 28,3  | 123,16 | 57,08 | 66,17 | 66,17 | 51,33 |  | 1545,639 |
| 2019-06-05 | 10:26:18 | 772,73 | 28,53 | 123,21 | 57,08 | 66,18 | 66,18 | 51,36 |  | 1545,693 |
| 2019-06-05 | 10:26:19 | 772,92 | 28,27 | 123,25 | 57,09 | 66,21 | 66,21 | 51,38 |  | 1545,729 |
| 2019-06-05 | 10:26:20 | 773,07 | 28,31 | 123,3  | 57,17 | 66,23 | 66,23 | 51,38 |  | 1545,729 |
| 2019-06-05 | 10:26:21 | 773,24 | 29,31 | 123,34 | 57,29 | 66,26 | 66,26 | 51,41 |  | 1545,783 |
| 2019-06-05 | 10:26:22 | 773,46 | 28,51 | 123,4  | 57,37 | 66,28 | 66,28 | 51,42 |  | 1545,801 |
| 2019-06-05 | 10:26:23 | 773,19 | 28,51 | 123,48 | 57,38 | 66,32 | 66,32 | 51,45 |  | 1545,855 |
| 2019-06-05 | 10:26:24 | 773    | 28,32 | 123,52 | 57,29 | 66,34 | 66,34 | 51,46 |  | 1545,873 |
| 2019-06-05 | 10:26:25 | 772,97 | 28,81 | 123,56 | 57,27 | 66,36 | 66,36 | 51,48 |  | 1545,909 |
| 2019-06-05 | 10:26:26 | 772,61 | 28,57 | 123,6  | 57,22 | 66,38 | 66,38 | 51,49 |  | 1545,927 |
| 2019-06-05 | 10:26:27 | 772,41 | 28,22 | 123,63 | 57,24 | 66,4  | 66,4  | 51,51 |  | 1545,963 |
| 2019-06-05 | 10:26:28 | 772,59 | 28,2  | 123,69 | 57,31 | 66,42 | 66,42 | 51,53 |  | 1545,999 |
| 2019-06-05 | 10:26:29 | 772,59 | 28,14 | 123,74 | 57,4  | 66,44 | 66,44 | 51,54 |  | 1546,017 |
| 2019-06-05 | 10:26:30 | 772,87 | 28,47 | 123,78 | 57,44 | 66,46 | 66,46 | 51,56 |  | 1546,053 |
| 2019-06-05 | 10:26:31 | 772,73 | 28,43 | 123,81 | 57,46 | 66,47 | 66,47 | 51,56 |  | 1546,053 |
| 2019-06-05 | 10:26:32 | 771,98 | 28,14 | 123,89 | 57,49 | 66,51 | 66,51 | 51,59 |  | 1546,107 |
| 2019-06-05 | 10:26:33 | 771,79 | 28,56 | 123,93 | 57,44 | 66,54 | 66,54 | 51,62 |  | 1546,161 |
| 2019-06-05 | 10:26:34 | 771,98 | 28,66 | 123,98 | 57,46 | 66,56 | 66,56 | 51,64 |  | 1546,197 |
| 2019-06-05 | 10:26:35 | 771,88 | 28,67 | 124,03 | 57,56 | 66,59 | 66,59 | 51,65 |  | 1546,215 |

**Fig. 109** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 110** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 05/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questo, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $110,29 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $78,74 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{\text{PCM}}$ ). Osservando la linea verde è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $95,73 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dello xilitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 37 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 20    | COOLING      | Test 20    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 05/06/2019 | Date         | 05/06/2019 |
| Start                     | 10:26      | Start        | 12:11      |
| End                       | 12:11      | End          | 14:31      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 110,29     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)     | 2,5        | Tend (°C)    | 78,74      |
| Tstart (°C)               | 51,16      | Tamb,av (°C) | 28,01      |
| Tmax (°C)                 | 110,29     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 793,81     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 28,25      |              |            |

#### **6.5.4 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 06/06/2019**

Il test è stato eseguito dalle 10:15 alle 16:00. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 670,48 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 26,29 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 104,97 °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 35 minuti per raggiungere la temperatura massima di 110,22 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 26,26 °C. La temperatura massima registrata per lo xilitolo era di 120,54 °C.

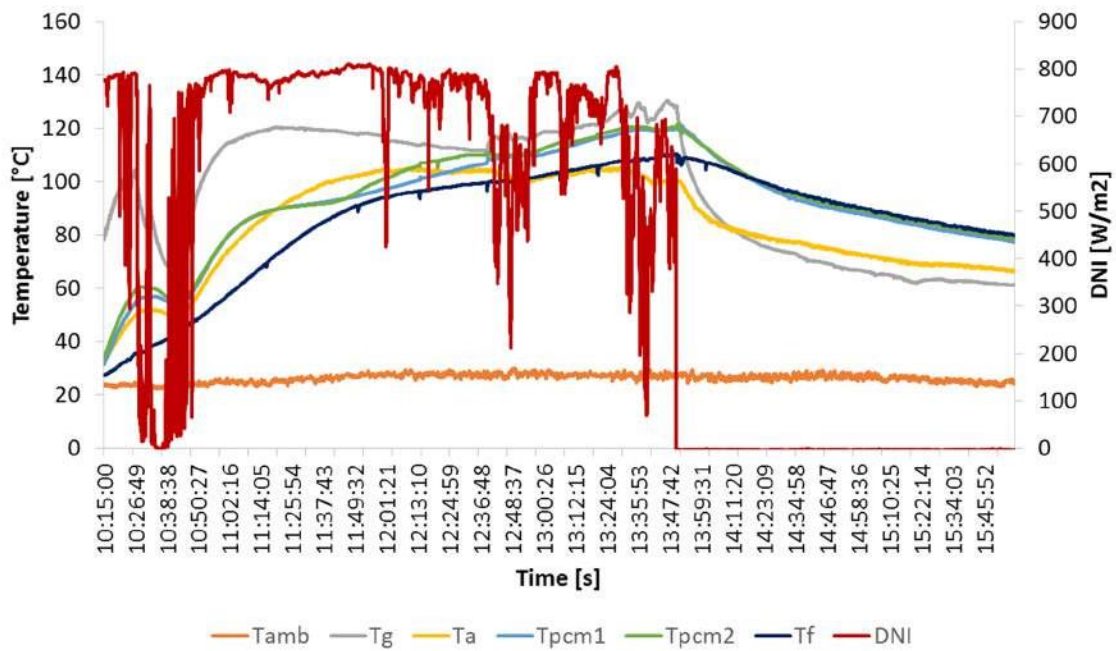
Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            | Ora      | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    |  | cp_olio  |
|------------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|----------|
| 2019-06-06 | 10:15:00 | 775,99 | 23,68 | 77,73 | 32,35 | 31,28 | 33,28 | 27,26 |  | 1502,303 |
| 2019-06-06 | 10:15:01 | 775,99 | 23,68 | 77,73 | 32,35 | 31,28 | 33,28 | 27,26 |  | 1502,303 |
| 2019-06-06 | 10:15:02 | 776,19 | 23,71 | 77,85 | 32,37 | 31,31 | 33,32 | 27,27 |  | 1502,321 |
| 2019-06-06 | 10:15:03 | 776,19 | 23,69 | 77,96 | 32,41 | 31,35 | 33,36 | 27,27 |  | 1502,321 |
| 2019-06-06 | 10:15:04 | 776,59 | 23,74 | 78,12 | 32,44 | 31,4  | 33,42 | 27,29 |  | 1502,357 |
| 2019-06-06 | 10:15:05 | 777,4  | 23,75 | 78,27 | 32,49 | 31,46 | 33,5  | 27,3  |  | 1502,375 |
| 2019-06-06 | 10:15:06 | 777,2  | 23,74 | 78,37 | 32,51 | 31,48 | 33,53 | 27,31 |  | 1502,393 |
| 2019-06-06 | 10:15:07 | 776,68 | 23,63 | 78,48 | 32,49 | 31,52 | 33,57 | 27,3  |  | 1502,375 |
| 2019-06-06 | 10:15:08 | 776,02 | 23,66 | 78,55 | 32,55 | 31,56 | 33,61 | 27,31 |  | 1502,393 |
| 2019-06-06 | 10:15:09 | 776,28 | 23,82 | 78,64 | 32,62 | 31,59 | 33,65 | 27,32 |  | 1502,411 |
| 2019-06-06 | 10:15:10 | 776,6  | 23,96 | 78,75 | 32,66 | 31,62 | 33,69 | 27,32 |  | 1502,411 |
| 2019-06-06 | 10:15:11 | 777,21 | 24,1  | 78,82 | 32,71 | 31,65 | 33,74 | 27,34 |  | 1502,447 |
| 2019-06-06 | 10:15:12 | 777,11 | 24,15 | 78,79 | 32,75 | 31,68 | 33,77 | 27,34 |  | 1502,447 |
| 2019-06-06 | 10:15:13 | 777,06 | 24,11 | 78,95 | 32,84 | 31,74 | 33,84 | 27,37 |  | 1502,501 |
| 2019-06-06 | 10:15:14 | 776,43 | 24,1  | 78,99 | 32,84 | 31,8  | 33,91 | 27,37 |  | 1502,501 |
| 2019-06-06 | 10:15:15 | 776,72 | 24,12 | 79,06 | 32,85 | 31,83 | 33,95 | 27,39 |  | 1502,537 |
| 2019-06-06 | 10:15:16 | 776    | 24,1  | 78,48 | 32,99 | 31,87 | 33,99 | 27,39 |  | 1502,537 |
| 2019-06-06 | 10:15:17 | 776,02 | 24,12 | 78,42 | 33,02 | 31,89 | 34,03 | 27,4  |  | 1502,555 |
| 2019-06-06 | 10:15:18 | 775,83 | 23,98 | 78,69 | 32,99 | 31,93 | 34,08 | 27,4  |  | 1502,555 |
| 2019-06-06 | 10:15:19 | 775,51 | 23,84 | 78,87 | 33,02 | 31,96 | 34,12 | 27,42 |  | 1502,591 |
| 2019-06-06 | 10:15:20 | 775,18 | 23,85 | 79,09 | 33,05 | 32,01 | 34,16 | 27,43 |  | 1502,609 |
| 2019-06-06 | 10:15:21 | 775,46 | 23,75 | 79,2  | 33,09 | 32,04 | 34,21 | 27,43 |  | 1502,609 |
| 2019-06-06 | 10:15:22 | 775,3  | 23,75 | 79,31 | 33,12 | 32,09 | 34,26 | 27,44 |  | 1502,627 |
| 2019-06-06 | 10:15:23 | 775,3  | 23,78 | 79,44 | 33,15 | 32,14 | 34,33 | 27,45 |  | 1502,645 |
| 2019-06-06 | 10:15:24 | 775,08 | 23,79 | 79,37 | 33,11 | 32,18 | 34,38 | 27,46 |  | 1502,663 |
| 2019-06-06 | 10:15:25 | 774,95 | 23,84 | 79,33 | 33,12 | 32,21 | 34,41 | 27,47 |  | 1502,681 |
| 2019-06-06 | 10:15:26 | 775,01 | 23,91 | 79,49 | 33,16 | 32,23 | 34,45 | 27,47 |  | 1502,681 |
| 2019-06-06 | 10:15:27 | 775,15 | 23,97 | 79,62 | 33,21 | 32,28 | 34,49 | 27,47 |  | 1502,681 |
| 2019-06-06 | 10:15:28 | 775,51 | 23,95 | 79,77 | 33,26 | 32,3  | 34,53 | 27,47 |  | 1502,681 |

**Fig. 111** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:





**Fig. 112** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 06/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Questa presenta numerose cime, implicando la presenza di numerose nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $110,22 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $80,08 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea verde è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $93,43 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dello xilitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 38 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 21    | COOLING      | Test 21    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 06/06/2019 | Date         | 06/06/2019 |
| Start                     | 10:15      | Start        | 13:50      |
| End                       | 13:50      | End          | 15:57      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 110,22     |
| mPCM (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 79,72      |
| Tstart (°C)               | 27,26      | Tamb,av (°C) | 26,26      |
| Tmax (°C)                 | 110,22     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 670,48     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 26,29      |              |            |

### **6.5.5 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo del 07/06/2019**

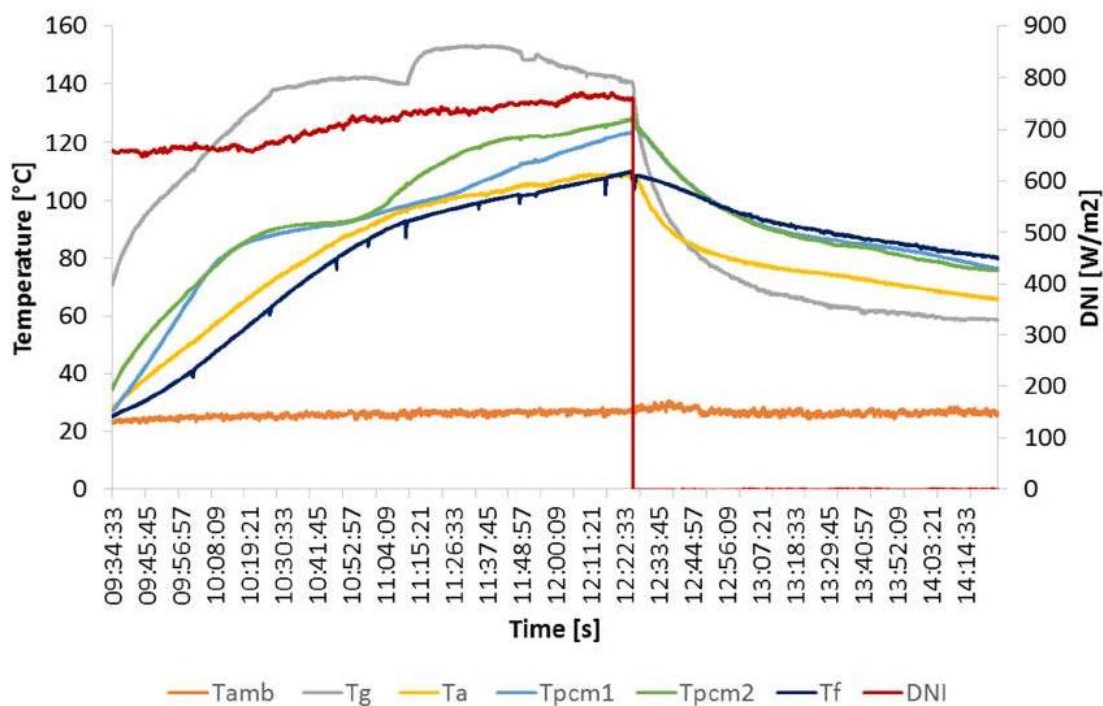
Il test è stato eseguito dalle 09:35 alle 14:25. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 709,95 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 25,68 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 108,97 °C, il fluido impiegava circa 2 ore e 50 minuti per raggiungere la temperatura massima di 109,07 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 26,64 °C. La temperatura massima registrata per lo xilitolo era di 127,85 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            | Ora      | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm1 | Tpcm2 | Tf    |  | cp_olio  |
|------------|----------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--|----------|
| 2019-06-07 | 09:34:33 | 659,25 | 23,28 | 70,96 | 27,9  | 26,82 | 34,63 | 25,09 |  | 1498,396 |
| 2019-06-07 | 09:34:34 | 659,49 | 23,2  | 71    | 27,88 | 26,84 | 34,66 | 25,1  |  | 1498,414 |
| 2019-06-07 | 09:34:35 | 659,86 | 23,21 | 71,06 | 27,88 | 26,85 | 34,69 | 25,1  |  | 1498,414 |
| 2019-06-07 | 09:34:36 | 659,65 | 23,28 | 71,02 | 27,94 | 26,88 | 34,74 | 25,12 |  | 1498,45  |
| 2019-06-07 | 09:34:37 | 659,64 | 23,37 | 71,05 | 27,96 | 26,9  | 34,78 | 25,14 |  | 1498,486 |
| 2019-06-07 | 09:34:38 | 659,52 | 23,35 | 71,15 | 27,96 | 26,93 | 34,83 | 25,15 |  | 1498,504 |
| 2019-06-07 | 09:34:39 | 659,5  | 23,17 | 71,26 | 27,97 | 26,95 | 34,86 | 25,15 |  | 1498,504 |
| 2019-06-07 | 09:34:40 | 659,42 | 23,2  | 71,28 | 27,99 | 26,97 | 34,9  | 25,16 |  | 1498,522 |
| 2019-06-07 | 09:34:41 | 659,52 | 23,16 | 71,37 | 28,01 | 26,99 | 34,93 | 25,17 |  | 1498,54  |
| 2019-06-07 | 09:34:42 | 659,66 | 23,2  | 71,39 | 28,02 | 27    | 34,96 | 25,18 |  | 1498,558 |
| 2019-06-07 | 09:34:43 | 659,57 | 23,21 | 71,36 | 28,02 | 27,02 | 34,99 | 25,19 |  | 1498,576 |
| 2019-06-07 | 09:34:44 | 659,28 | 23,24 | 71,41 | 28,01 | 27,03 | 35,02 | 25,19 |  | 1498,576 |
| 2019-06-07 | 09:34:45 | 659,07 | 23,27 | 71,35 | 28,07 | 27,07 | 35,08 | 25,22 |  | 1498,63  |
| 2019-06-07 | 09:34:46 | 659,13 | 23,22 | 71,44 | 28,1  | 27,11 | 35,12 | 25,24 |  | 1498,666 |
| 2019-06-07 | 09:34:47 | 659,15 | 23,19 | 71,55 | 28,11 | 27,12 | 35,16 | 25,25 |  | 1498,684 |
| 2019-06-07 | 09:34:48 | 659,01 | 23,15 | 71,48 | 28,1  | 27,14 | 35,19 | 25,26 |  | 1498,702 |
| 2019-06-07 | 09:34:49 | 658,98 | 23,18 | 71,66 | 28,1  | 27,16 | 35,23 | 25,27 |  | 1498,72  |
| 2019-06-07 | 09:34:50 | 658,75 | 23,1  | 71,77 | 28,1  | 27,18 | 35,25 | 25,27 |  | 1498,72  |
| 2019-06-07 | 09:34:51 | 658,6  | 23    | 71,85 | 28,1  | 27,2  | 35,28 | 25,29 |  | 1498,756 |
| 2019-06-07 | 09:34:52 | 658,16 | 22,94 | 71,93 | 28,14 | 27,22 | 35,31 | 25,29 |  | 1498,756 |
| 2019-06-07 | 09:34:53 | 657,85 | 22,88 | 72,02 | 28,21 | 27,24 | 35,36 | 25,31 |  | 1498,792 |
| 2019-06-07 | 09:34:54 | 657,8  | 22,84 | 72,02 | 28,29 | 27,28 | 35,41 | 25,32 |  | 1498,81  |
| 2019-06-07 | 09:34:55 | 657,92 | 22,84 | 72,14 | 28,31 | 27,3  | 35,46 | 25,33 |  | 1498,828 |
| 2019-06-07 | 09:34:56 | 657,94 | 22,83 | 72,16 | 28,3  | 27,32 | 35,49 | 25,34 |  | 1498,846 |
| 2019-06-07 | 09:34:57 | 658,07 | 22,89 | 72,21 | 28,31 | 27,34 | 35,53 | 25,36 |  | 1498,882 |
| 2019-06-07 | 09:34:58 | 658,17 | 23,04 | 72,32 | 28,31 | 27,37 | 35,57 | 25,37 |  | 1498,9   |
| 2019-06-07 | 09:34:59 | 658,14 | 23,1  | 72,33 | 28,32 | 27,39 | 35,59 | 25,38 |  | 1498,918 |
| 2019-06-07 | 09:35:00 | 658,14 | 23,13 | 72,43 | 28,36 | 27,41 | 35,63 | 25,39 |  | 1498,936 |
| 2019-06-07 | 09:35:01 | 657,95 | 23,14 | 72,49 | 28,36 | 27,43 | 35,66 | 25,39 |  | 1498,936 |

**Fig. 113** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 114** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 07/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $109,07 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,94 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea verde è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $94,63 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase dello xilitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 39** - Riepilogo dei parametri

| HEATING                               | Test 22    | COOLING                  | Test 22    |
|---------------------------------------|------------|--------------------------|------------|
| Date                                  | 07/06/2019 | Date                     | 07/06/2019 |
| Start                                 | 09:34      | Start                    | 12:25      |
| End                                   | 12:25      | End                      | 14:25      |
| m <sub>f</sub> (kg)                   | 1,5        | T <sub>max</sub> (°C)    | 109,07     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | T <sub>end</sub> (°C)    | 79,84      |
| T <sub>start</sub> (°C)               | 25,09      | T <sub>amb,av</sub> (°C) | 26,64      |
| T <sub>max</sub> (°C)                 | 109,07     |                          |            |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 709,95     |                          |            |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 25,68      |                          |            |

### 6.5.6 Riepilogo delle prove a carico con xilitolo come accumulo di energia termica

Le tabelle seguenti mostrano le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale del fluido al termine del test che verranno utilizzate in il prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ . I dati relativi a tutti i test effettuati usando l'olio di silicone come fluido di prova inserito nella pentola con il PCM è inserito per avere una panoramica generale del comportamento del fluido testato all'interno del nostro forno solare. Nei paragrafi seguenti analizzeremo le differenze riscontrate tra solo olio e olio e xilitolo.

**Tabella 40** - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio di silicone come liquido di prova e xilitolo come PCM

| HEATING                               | Test 18    | Test 19    | Test 20    | Test 21    | Test 22    |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date                                  | 03/06/2019 | 04/06/2019 | 05/06/2019 | 06/06/2019 | 07/06/2019 |
| Start                                 | 11:00      | 09:42      | 10:26      | 10:15      | 09:34      |
| End                                   | 14:20      | 12:08      | 12:11      | 13:50      | 12:25      |
| m <sub>f</sub> (kg)                   | 2,0        | 2,0        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| T <sub>start</sub> (°C)               | 33,44      | 31,10      | 51,16      | 27,26      | 25,09      |
| T <sub>max</sub> (°C)                 | 110,28     | 110,63     | 110,29     | 110,22     | 109,07     |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 869,67     | 791,93     | 793,81     | 670,48     | 709,95     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 27,21      | 28,40      | 28,25      | 26,29      | 25,68      |

**Tabella 41** - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio di silicone come liquido di prova e xilitolo come PCM

| COOLING           | Test 18    | Test 19    | Test 20    | Test 21    | Test 22    |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date              | 03/06/2019 | 04/06/2019 | 05/06/2019 | 06/06/2019 | 07/06/2019 |
| Start             | 14:20      | 12:08      | 12:11      | 13:50      | 12:25      |
| End               | 16:28      | 14:25      | 14:31      | 15:57      | 14:25      |
| $m_f$ (kg)        | 2,0        | 2,0        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| $m_{PCM}$ (kg)    | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| $T_{max}$ (°C)    | 110,28     | 110,63     | 110,29     | 110,22     | 109,07     |
| $T_{end}$ (°C)    | 79,82      | 79,40      | 78,74      | 79,72      | 79,84      |
| $T_{amb,av}$ (°C) | 29,26      | 31,03      | 28,01      | 26,26      | 26,64      |

## 6.6 Prove a carico con xilitolo-mannitolo come accumulo di energia termica

Per i seguenti test è stata utilizzata la pentola a doppio fondo descritta nel capitolo 2, riempita con la miscela dei due PCM nella composizione 70% di xilitolo e 30% di mannitolo. Il mannitolo puro ha una temperatura di fusione molto elevata, una temperatura che il forno solare analizzato in questo lavoro non è in grado di raggiungere, quindi una piccola percentuale di essa è stata combinata con lo xilitolo, dal quale abbiamo già ottenuto risultati positivi dei test effettuati e descritto al paragrafo 6.5.

Il liquido di prova era olio di silicone. Le quantità di liquido utilizzato sono 1,5 kg di olio e 2,5 kg di miscela PCM. Durante questi test sono state rilevate le temperature fondamentali sia nelle fasi di riscaldamento che di raffreddamento:

- Temperatura ambiente  $T_{amb}$  [°C];
- Temperatura del vetro  $T_g$  [°C];
- Temperatura dell'assorbitore  $T_a$  [°C];
- Temperatura del fluido interno nella pentola:  $T_f$  [°C];
- Temperatura PCM nell'intercapedine della pentola:  $T_{PCM1}$  e  $T_{PCM2}$  [°C];
- Radiazione solare DNI [W/m<sup>2</sup>].

Una volta raggiunta la temperatura massima del fluido, il forno solare è stato orientato nella direzione opposta rispetto al Sole in modo da non essere colpito dalla radiazione solare diretta, ma abbiamo continuato a rilevare temperature e tempi di raffreddamento. Abbiamo quindi scelto intervalli di temperature comuni a tutti i test effettuati, sia in fase di riscaldamento che di raffreddamento, al fine di poter calcolare i parametri necessari per la determinazione della seconda figura di merito  $F_2$  durante la fase di elaborazione dei dati.

### 6.6.1 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del 18/06/2019

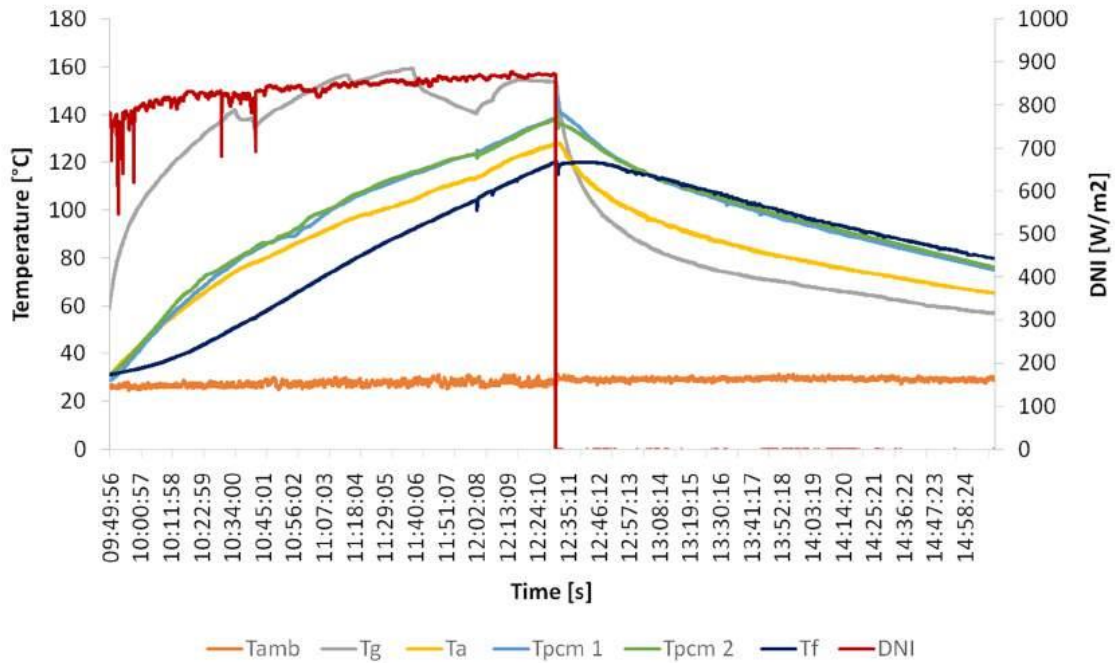
Il test è stato eseguito dalle 09:50 alle 15:10. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 837,22 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 27,44 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 127,58 °C, il fluido impiegava circa 2 ore e 40 minuti per raggiungere la temperatura massima di 120,05 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 29,22 °C. La temperatura massima registrata per la miscela di xilitolo-mannitolo era di 140,75 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|             |          | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm 1 | Tpcm 2 | Tf    | cp      |
|-------------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|---------|
| 2019-06-18T | 09:49:56 | 780,95 | 25,72 | 58,74 | 30,98 | 28,63  | 31,02  | 30,96 | 1508,96 |
| 2019-06-18T | 09:49:57 | 780,81 | 25,77 | 58,89 | 30,99 | 28,64  | 31,03  | 30,97 | 1508,98 |
| 2019-06-18T | 09:49:58 | 780,9  | 26,07 | 59,04 | 31    | 28,63  | 31,03  | 30,98 | 1509    |
| 2019-06-18T | 09:49:59 | 780,88 | 26,22 | 59,17 | 31,02 | 28,64  | 31,04  | 30,97 | 1508,98 |
| 2019-06-18T | 09:50:00 | 781,08 | 26,1  | 59,31 | 31,03 | 28,65  | 31,05  | 30,98 | 1509    |
| 2019-06-18T | 09:50:01 | 781,24 | 26,03 | 59,47 | 31,04 | 28,65  | 31,05  | 30,98 | 1509    |
| 2019-06-18T | 09:50:02 | 782,19 | 25,91 | 59,76 | 31,08 | 28,67  | 31,08  | 30,99 | 1509,02 |
| 2019-06-18T | 09:50:03 | 782,4  | 25,68 | 59,93 | 31,09 | 28,68  | 31,09  | 31    | 1509,04 |
| 2019-06-18T | 09:50:04 | 782,67 | 25,56 | 60,07 | 31,1  | 28,7   | 31,1   | 30,99 | 1509,02 |
| 2019-06-18T | 09:50:05 | 782,67 | 25,62 | 60,22 | 31,13 | 28,7   | 31,11  | 31,01 | 1509,05 |
| 2019-06-18T | 09:50:06 | 782,84 | 25,57 | 60,38 | 31,16 | 28,71  | 31,13  | 31,02 | 1509,07 |
| 2019-06-18T | 09:50:07 | 782,48 | 25,48 | 60,51 | 31,17 | 28,72  | 31,15  | 31,01 | 1509,05 |
| 2019-06-18T | 09:50:08 | 782,43 | 25,58 | 60,67 | 31,19 | 28,73  | 31,15  | 31,02 | 1509,07 |
| 2019-06-18T | 09:50:09 | 782,07 | 25,72 | 60,81 | 31,21 | 28,73  | 31,17  | 31,02 | 1509,07 |
| 2019-06-18T | 09:50:10 | 781,42 | 25,9  | 60,96 | 31,22 | 28,75  | 31,18  | 31,03 | 1509,09 |
| 2019-06-18T | 09:50:11 | 780,96 | 26,24 | 61,23 | 31,23 | 28,75  | 31,19  | 31,03 | 1509,09 |
| 2019-06-18T | 09:50:12 | 780,93 | 26,47 | 61,38 | 31,25 | 28,76  | 31,21  | 31,04 | 1509,11 |
| 2019-06-18T | 09:50:13 | 780,57 | 26,51 | 61,51 | 31,26 | 28,77  | 31,21  | 31,03 | 1509,09 |
| 2019-06-18T | 09:50:14 | 780,11 | 26,61 | 61,66 | 31,29 | 28,78  | 31,21  | 31,04 | 1509,11 |
| 2019-06-18T | 09:50:15 | 779,96 | 26,47 | 61,8  | 31,31 | 28,78  | 31,23  | 31,04 | 1509,11 |
| 2019-06-18T | 09:50:16 | 779,98 | 26,67 | 61,92 | 31,31 | 28,78  | 31,23  | 31,04 | 1509,11 |
| 2019-06-18T | 09:50:17 | 780,2  | 26,88 | 62,06 | 31,33 | 28,8   | 31,24  | 31,04 | 1509,11 |
| 2019-06-18T | 09:50:18 | 780,16 | 26,62 | 62,19 | 31,33 | 28,8   | 31,25  | 31,05 | 1509,13 |
| 2019-06-18T | 09:50:19 | 780,21 | 26,42 | 62,34 | 31,35 | 28,81  | 31,27  | 31,05 | 1509,13 |
| 2019-06-18T | 09:50:20 | 779,79 | 26,2  | 62,61 | 31,38 | 28,82  | 31,28  | 31,05 | 1509,13 |
| 2019-06-18T | 09:50:21 | 779,96 | 26,09 | 62,75 | 31,39 | 28,84  | 31,3   | 31,06 | 1509,14 |
| 2019-06-18T | 09:50:22 | 778,94 | 26,08 | 62,88 | 31,4  | 28,85  | 31,31  | 31,07 | 1509,16 |
| 2019-06-18T | 09:50:23 | 777,04 | 26,1  | 63    | 31,4  | 28,86  | 31,32  | 31,07 | 1509,16 |
| 2019-06-18T | 09:50:24 | 770,48 | 26,18 | 63,12 | 31,41 | 28,87  | 31,33  | 31,07 | 1509,16 |

**Fig. 115** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 116** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 18/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante il test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $120,05 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,75 \text{ °C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $92,67 \text{ °C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase della miscela xilitolo-mannitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .



**Tabella 42 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 23    | COOLING      | Test 23    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 18/06/2019 | Date         | 18/06/2019 |
| Start                     | 09:49      | Start        | 12:30      |
| End                       | 12:30      | End          | 15:09      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 120,05     |
| mPCM (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 79,75      |
| Tstart (°C)               | 30,96      | Tamb,av (°C) | 29,22      |
| Tmax (°C)                 | 120,05     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 837,22     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 27,44      |              |            |

### 6.6.2 Prova a carico (olio silconico) con xilitolo-mannitolo del 19/06/2019

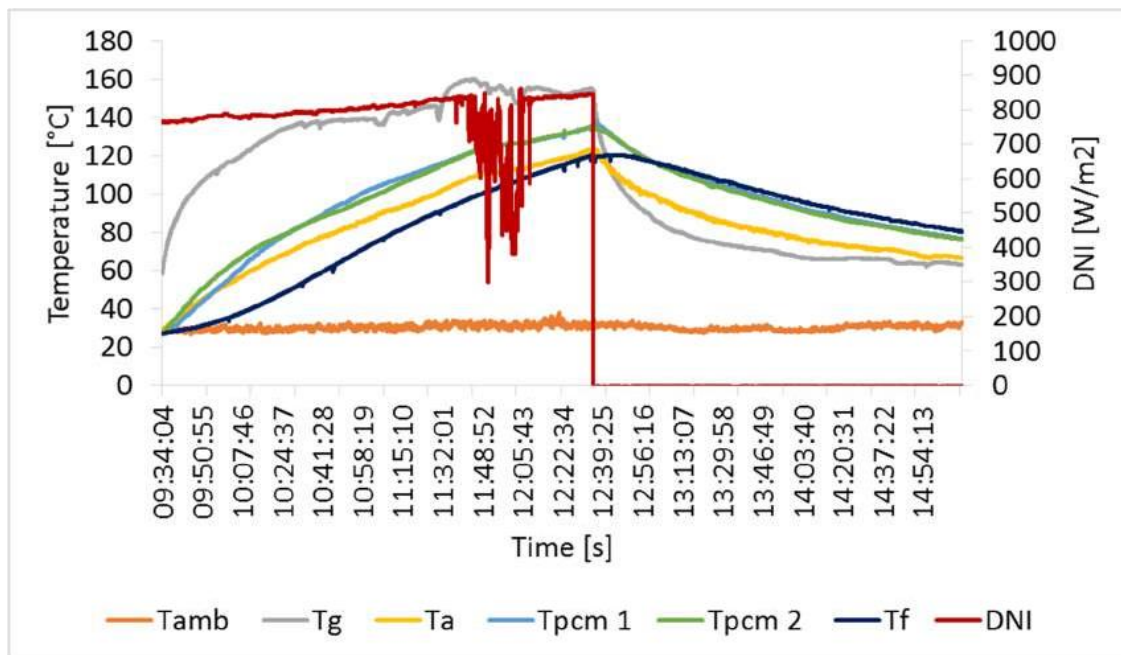
Il test è stato eseguito dalle 09:35 alle 15:10. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 785,84 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 30,40 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 122,78 °C, il fluido impiegava circa 3 ore per raggiungere la temperatura massima di 120,13 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 30,23 °C. La temperatura massima registrata per la miscela di xilitolo-mannitolo era di 139,22 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            |          | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm 1 | Tpcm 2 | Tf    |  | cp       |
|------------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--|----------|
| 2019-06-19 | 09:34:04 | 763,42 | 27,25 | 58,22 | 28,93 | 26,49  | 27,27  | 26,8  |  | 1501,475 |
| 2019-06-19 | 09:34:05 | 763,44 | 27,27 | 58,36 | 28,94 | 26,5   | 27,27  | 26,8  |  | 1501,475 |
| 2019-06-19 | 09:34:06 | 763,45 | 27,33 | 58,46 | 28,95 | 26,51  | 27,29  | 26,8  |  | 1501,475 |
| 2019-06-19 | 09:34:07 | 763,44 | 27,34 | 58,53 | 28,96 | 26,51  | 27,3   | 26,8  |  | 1501,475 |
| 2019-06-19 | 09:34:08 | 763,39 | 27,42 | 58,78 | 28,97 | 26,52  | 27,33  | 26,82 |  | 1501,511 |
| 2019-06-19 | 09:34:09 | 763,44 | 27,44 | 58,92 | 28,99 | 26,52  | 27,34  | 26,82 |  | 1501,511 |
| 2019-06-19 | 09:34:10 | 763,42 | 27,49 | 59,05 | 29    | 26,54  | 27,35  | 26,82 |  | 1501,511 |
| 2019-06-19 | 09:34:11 | 763,69 | 27,49 | 59,18 | 29,01 | 26,53  | 27,36  | 26,82 |  | 1501,511 |
| 2019-06-19 | 09:34:12 | 763,74 | 27,4  | 59,3  | 29,02 | 26,54  | 27,37  | 26,82 |  | 1501,511 |
| 2019-06-19 | 09:34:13 | 763,81 | 27,53 | 59,4  | 29,04 | 26,56  | 27,39  | 26,83 |  | 1501,529 |
| 2019-06-19 | 09:34:14 | 763,9  | 27,74 | 59,47 | 29,05 | 26,56  | 27,41  | 26,84 |  | 1501,547 |
| 2019-06-19 | 09:34:15 | 763,91 | 27,72 | 59,33 | 29,05 | 26,58  | 27,41  | 26,84 |  | 1501,547 |
| 2019-06-19 | 09:34:16 | 763,98 | 27,77 | 59,5  | 29,07 | 26,58  | 27,43  | 26,84 |  | 1501,547 |
| 2019-06-19 | 09:34:17 | 764    | 27,95 | 59,8  | 29,13 | 26,59  | 27,45  | 26,85 |  | 1501,565 |
| 2019-06-19 | 09:34:18 | 764,07 | 28,09 | 59,94 | 29,15 | 26,61  | 27,48  | 26,86 |  | 1501,583 |
| 2019-06-19 | 09:34:19 | 764,24 | 28,1  | 60,05 | 29,18 | 26,61  | 27,49  | 26,87 |  | 1501,601 |
| 2019-06-19 | 09:34:20 | 764,29 | 28,09 | 60,13 | 29,21 | 26,62  | 27,51  | 26,86 |  | 1501,583 |
| 2019-06-19 | 09:34:21 | 764,51 | 28,14 | 60,26 | 29,23 | 26,63  | 27,52  | 26,88 |  | 1501,619 |
| 2019-06-19 | 09:34:22 | 764,49 | 28,11 | 60,34 | 29,26 | 26,64  | 27,54  | 26,88 |  | 1501,619 |
| 2019-06-19 | 09:34:23 | 764,58 | 28,18 | 60,4  | 29,26 | 26,64  | 27,55  | 26,88 |  | 1501,619 |
| 2019-06-19 | 09:34:24 | 764,29 | 28,17 | 60,55 | 29,27 | 26,65  | 27,55  | 26,88 |  | 1501,619 |
| 2019-06-19 | 09:34:25 | 764,29 | 28,09 | 60,71 | 29,31 | 26,66  | 27,58  | 26,89 |  | 1501,637 |
| 2019-06-19 | 09:34:26 | 764,41 | 27,62 | 60,94 | 29,35 | 26,67  | 27,59  | 26,89 |  | 1501,637 |
| 2019-06-19 | 09:34:27 | 764,51 | 27,52 | 61,08 | 29,36 | 26,69  | 27,61  | 26,89 |  | 1501,637 |
| 2019-06-19 | 09:34:28 | 764,49 | 27,64 | 61,21 | 29,38 | 26,7   | 27,63  | 26,91 |  | 1501,673 |
| 2019-06-19 | 09:34:29 | 764,63 | 27,55 | 61,32 | 29,39 | 26,7   | 27,64  | 26,91 |  | 1501,673 |
| 2019-06-19 | 09:34:30 | 764,8  | 27,53 | 61,42 | 29,4  | 26,71  | 27,65  | 26,91 |  | 1501,673 |
| 2019-06-19 | 09:34:31 | 764,78 | 27,39 | 61,54 | 29,42 | 26,71  | 27,67  | 26,91 |  | 1501,673 |
| 2019-06-19 | 09:34:32 | 764,82 | 27,36 | 61,65 | 29,43 | 26,71  | 27,68  | 26,92 |  | 1501,691 |

**Fig. 117** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 118** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 19/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, ad eccezione di alcuni picchi dalle 11:35 alle 12:05, rimane quasi costante, risultando orizzontale, nel senso che non c'erano nuvole durante la maggior parte del test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza aumenta nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $120,13 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,97 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $91,47 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase della miscela xilitolo-mannitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 43 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 24    | COOLING      | Test 24    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 19/06/2019 | Date         | 19/06/2019 |
| Start                     | 09:34      | Start        | 12:35      |
| End                       | 12:35      | End          | 15:11      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 120,13     |
| mPCM (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 79,97      |
| Tstart (°C)               | 26,80      | Tamb,av (°C) | 30,23      |
| Tmax (°C)                 | 120,13     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 785,84     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 30,40      |              |            |

### 6.6.3 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del 20/06/2019

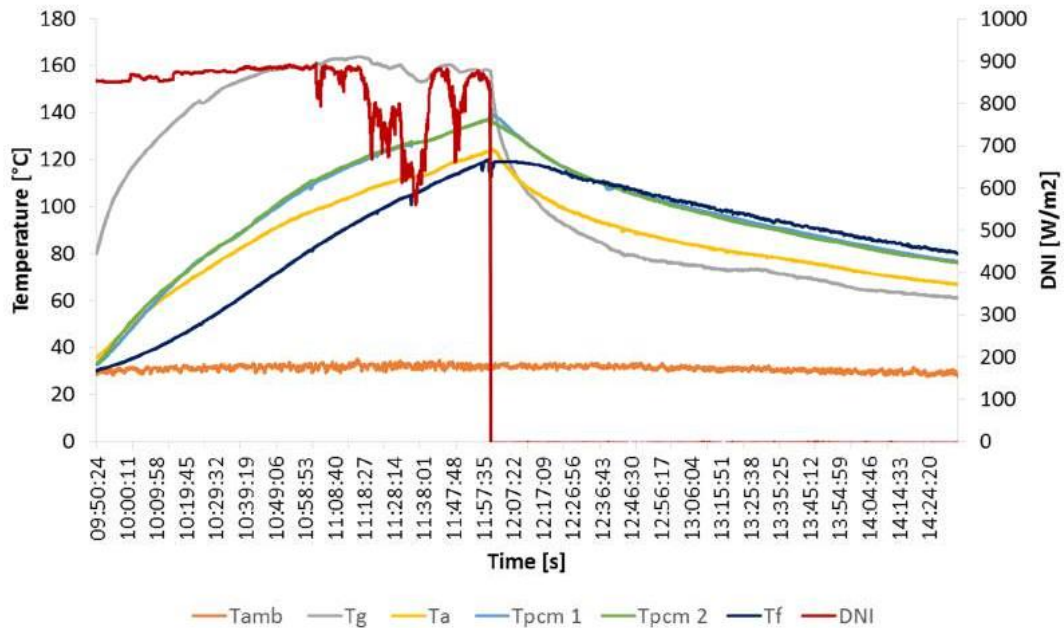
Il test è stato eseguito dalle 09:50 alle 14:34. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 840,61 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 31,58 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 124,39 °C, il fluido impiegava circa 2 ore e 10 minuti per raggiungere la temperatura massima di 120,04 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 30,81 °C. La temperatura massima registrata per la miscela xilitolo-mannitolo era di 139,12 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|             |          | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm 1 | Tpcm 2 | Tf    |  | cp       |
|-------------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--|----------|
| 2019-06-20T | 09:50:24 | 853,97 | 29,72 | 80,19 | 35,7  | 32,71  | 33,01  | 30    |  | 1507,236 |
| 2019-06-20T | 09:50:25 | 853,63 | 29,37 | 80,25 | 35,72 | 32,72  | 33,03  | 30,03 |  | 1507,29  |
| 2019-06-20T | 09:50:26 | 853,66 | 29,32 | 80,35 | 35,73 | 32,74  | 33,05  | 30,04 |  | 1507,308 |
| 2019-06-20T | 09:50:27 | 853,53 | 29,01 | 80,41 | 35,73 | 32,76  | 33,09  | 30,07 |  | 1507,362 |
| 2019-06-20T | 09:50:28 | 853,46 | 28,85 | 80,49 | 35,73 | 32,77  | 33,1   | 30,08 |  | 1507,38  |
| 2019-06-20T | 09:50:29 | 853,16 | 28,81 | 80,61 | 35,73 | 32,8   | 33,13  | 30,11 |  | 1507,434 |
| 2019-06-20T | 09:50:30 | 853,08 | 28,74 | 80,74 | 35,74 | 32,82  | 33,16  | 30,11 |  | 1507,434 |
| 2019-06-20T | 09:50:31 | 852,88 | 28,71 | 80,82 | 35,75 | 32,83  | 33,18  | 30,08 |  | 1507,38  |
| 2019-06-20T | 09:50:32 | 852,9  | 28,75 | 80,89 | 35,77 | 32,84  | 33,19  | 30,1  |  | 1507,416 |
| 2019-06-20T | 09:50:33 | 852,76 | 28,6  | 80,95 | 35,79 | 32,86  | 33,21  | 30,11 |  | 1507,434 |
| 2019-06-20T | 09:50:34 | 852,69 | 28,55 | 81    | 35,81 | 32,87  | 33,23  | 30,13 |  | 1507,47  |
| 2019-06-20T | 09:50:35 | 852,69 | 28,56 | 81,09 | 35,81 | 32,89  | 33,24  | 30,12 |  | 1507,452 |
| 2019-06-20T | 09:50:36 | 852,66 | 28,58 | 81,17 | 35,82 | 32,9   | 33,27  | 30,15 |  | 1507,506 |
| 2019-06-20T | 09:50:37 | 852,45 | 28,62 | 81,26 | 35,85 | 32,93  | 33,3   | 30,17 |  | 1507,542 |
| 2019-06-20T | 09:50:38 | 852,37 | 28,68 | 81,34 | 35,88 | 32,95  | 33,31  | 30,16 |  | 1507,524 |
| 2019-06-20T | 09:50:39 | 852,37 | 28,66 | 81,39 | 35,94 | 32,96  | 33,33  | 30,16 |  | 1507,524 |
| 2019-06-20T | 09:50:40 | 852,4  | 28,75 | 81,42 | 35,98 | 32,97  | 33,36  | 30,16 |  | 1507,524 |
| 2019-06-20T | 09:50:41 | 852,55 | 28,8  | 81,46 | 36,01 | 32,99  | 33,37  | 30,16 |  | 1507,524 |
| 2019-06-20T | 09:50:42 | 852,35 | 28,89 | 81,48 | 36,01 | 33     | 33,39  | 30,16 |  | 1507,524 |
| 2019-06-20T | 09:50:43 | 852,42 | 28,97 | 81,51 | 36,02 | 33,03  | 33,41  | 30,17 |  | 1507,542 |
| 2019-06-20T | 09:50:44 | 852,25 | 29,02 | 81,55 | 36,06 | 33,04  | 33,43  | 30,15 |  | 1507,506 |
| 2019-06-20T | 09:50:45 | 852,16 | 28,99 | 81,58 | 36,08 | 33,06  | 33,46  | 30,15 |  | 1507,506 |
| 2019-06-20T | 09:50:46 | 851,99 | 29    | 81,63 | 36,08 | 33,07  | 33,47  | 30,16 |  | 1507,524 |
| 2019-06-20T | 09:50:47 | 851,93 | 29,05 | 81,73 | 36,05 | 33,09  | 33,49  | 30,18 |  | 1507,56  |
| 2019-06-20T | 09:50:48 | 852,15 | 29,25 | 81,85 | 36,04 | 33,1   | 33,52  | 30,2  |  | 1507,596 |
| 2019-06-20T | 09:50:49 | 851,99 | 29,43 | 81,93 | 36,07 | 33,13  | 33,55  | 30,21 |  | 1507,614 |
| 2019-06-20T | 09:50:50 | 852,13 | 29,61 | 82,02 | 36,1  | 33,14  | 33,56  | 30,23 |  | 1507,65  |
| 2019-06-20T | 09:50:51 | 852,35 | 29,75 | 82,12 | 36,16 | 33,16  | 33,57  | 30,24 |  | 1507,668 |
| 2019-06-20T | 09:50:52 | 852,38 | 29,78 | 82,2  | 36,21 | 33,19  | 33,6   | 30,25 |  | 1507,686 |

**Fig. 119** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 120** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}/\text{m}^2$ ; 20/06/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, ad eccezione di alcuni picchi dalle 10:59 alle 11:50, rimane quasi costante, risultando orizzontale, nel senso che non c'erano nuvole durante la maggior parte del test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza aumenta nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di 120.04 °C e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di 79,96 °C. La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a 91,12 °C. Questo punto identifica la transizione di fase della miscela xilitolo-mannitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 44 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                               | Test 25    | COOLING      | Test 25    |
|---------------------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                                  | 20/06/2019 | Date         | 20/06/2019 |
| Start                                 | 09:50      | Start        | 12:00      |
| End                                   | 12:00      | End          | 14:34      |
| mf (kg)                               | 1,5        | Tmax (°C)    | 120,04     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 79,96      |
| Tstart (°C)                           | 30,00      | Tamb,av (°C) | 30,81      |
| Tmax (°C)                             | 120,04     |              |            |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 840,61     |              |            |
| Tamb,av (°C)                          | 31,58      |              |            |

#### **6.6.4 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del 02/07/2019**

Il test è stato eseguito dalle 09:40 alle 16:00. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era 803,22 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 31,76 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 135,78 °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 20 minuti per raggiungere la temperatura massima di 130,54 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 33,22 °C. La temperatura massima registrata per la miscela xilitolo-mannitolo era di 147,87 °C.

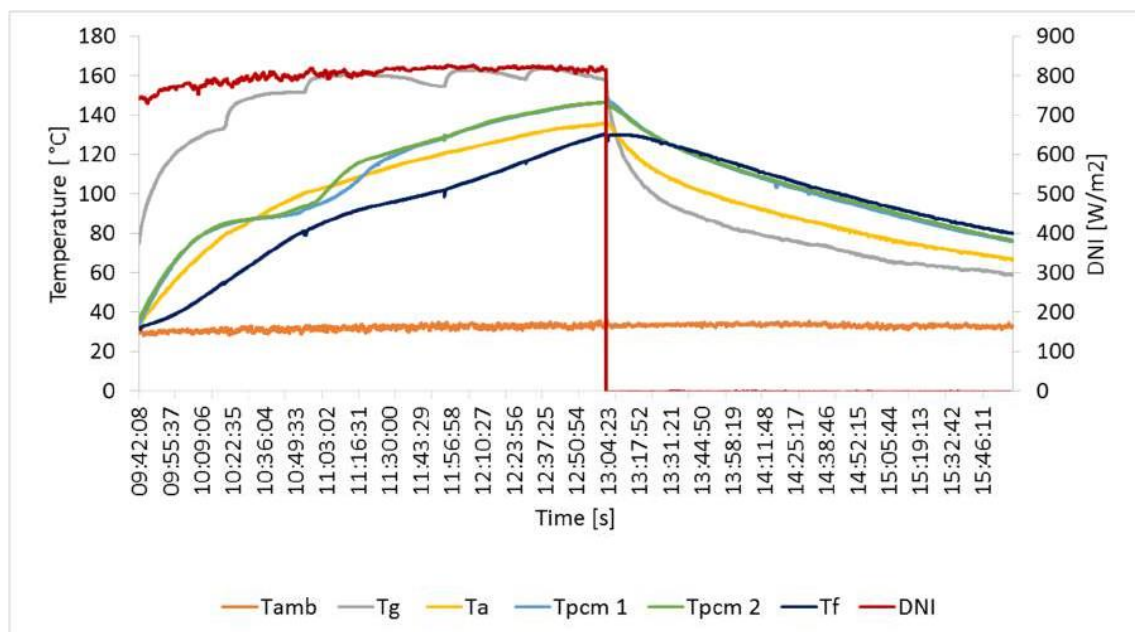
Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            |          | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm 1 | Tpcm 2 | Tf    |  | cp       |
|------------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--|----------|
| 2019-07-02 | 09:42:08 | 742,04 | 29,94 | 74,53 | 32,98 | 33,67  | 36,18  | 31,82 |  | 1510,513 |
| 2019-07-02 | 09:42:09 | 741,94 | 29,95 | 74,67 | 33,01 | 33,71  | 36,22  | 31,82 |  | 1510,513 |
| 2019-07-02 | 09:42:10 | 741,73 | 29,95 | 74,82 | 33,03 | 33,73  | 36,23  | 31,83 |  | 1510,531 |
| 2019-07-02 | 09:42:11 | 741,54 | 30,01 | 75,03 | 33,06 | 33,78  | 36,28  | 31,83 |  | 1510,531 |
| 2019-07-02 | 09:42:12 | 741,38 | 29,91 | 75,23 | 33,09 | 33,84  | 36,34  | 31,84 |  | 1510,549 |
| 2019-07-02 | 09:42:13 | 741,17 | 29,58 | 75,31 | 33,11 | 33,85  | 36,35  | 31,84 |  | 1510,549 |
| 2019-07-02 | 09:42:14 | 741,34 | 29,35 | 75,46 | 33,14 | 33,89  | 36,39  | 31,86 |  | 1510,585 |
| 2019-07-02 | 09:42:15 | 742,18 | 29,27 | 75,6  | 33,16 | 33,92  | 36,42  | 31,86 |  | 1510,585 |
| 2019-07-02 | 09:42:16 | 743,05 | 29,29 | 75,72 | 33,19 | 33,96  | 36,45  | 31,87 |  | 1510,603 |
| 2019-07-02 | 09:42:17 | 743,59 | 29,4  | 75,85 | 33,2  | 33,99  | 36,48  | 31,88 |  | 1510,621 |
| 2019-07-02 | 09:42:18 | 743,93 | 29,49 | 75,97 | 33,22 | 34,02  | 36,52  | 31,88 |  | 1510,621 |
| 2019-07-02 | 09:42:19 | 744,22 | 29,41 | 76,07 | 33,23 | 34,04  | 36,55  | 31,89 |  | 1510,639 |
| 2019-07-02 | 09:42:20 | 744,62 | 29,38 | 76,26 | 33,25 | 34,09  | 36,59  | 31,89 |  | 1510,639 |
| 2019-07-02 | 09:42:21 | 744,99 | 29,37 | 76,46 | 33,28 | 34,15  | 36,65  | 31,91 |  | 1510,675 |
| 2019-07-02 | 09:42:22 | 745,04 | 29,31 | 76,59 | 33,3  | 34,18  | 36,68  | 31,92 |  | 1510,693 |
| 2019-07-02 | 09:42:23 | 744,75 | 29,35 | 76,71 | 33,31 | 34,21  | 36,69  | 31,92 |  | 1510,693 |
| 2019-07-02 | 09:42:24 | 744,12 | 29,45 | 76,83 | 33,33 | 34,23  | 36,73  | 31,92 |  | 1510,693 |
| 2019-07-02 | 09:42:25 | 743,78 | 29,51 | 76,97 | 33,35 | 34,27  | 36,77  | 31,93 |  | 1510,711 |
| 2019-07-02 | 09:42:26 | 743,61 | 29,56 | 77,09 | 33,37 | 34,3   | 36,8   | 31,94 |  | 1510,729 |
| 2019-07-02 | 09:42:27 | 743,01 | 29,61 | 77,21 | 33,38 | 34,33  | 36,82  | 31,93 |  | 1510,711 |
| 2019-07-02 | 09:42:28 | 742,43 | 29,63 | 77,33 | 33,4  | 34,35  | 36,85  | 31,94 |  | 1510,729 |
| 2019-07-02 | 09:42:29 | 742,39 | 29,65 | 77,5  | 33,43 | 34,4   | 36,89  | 31,95 |  | 1510,747 |
| 2019-07-02 | 09:42:30 | 742,35 | 29,67 | 77,68 | 33,48 | 34,45  | 36,94  | 31,95 |  | 1510,747 |
| 2019-07-02 | 09:42:31 | 742,18 | 29,7  | 77,79 | 33,5  | 34,48  | 36,97  | 31,96 |  | 1510,765 |
| 2019-07-02 | 09:42:32 | 741,9  | 29,71 | 77,89 | 33,53 | 34,52  | 37     | 31,96 |  | 1510,765 |
| 2019-07-02 | 09:42:33 | 741,9  | 29,72 | 78,03 | 33,58 | 34,54  | 37,04  | 31,97 |  | 1510,783 |
| 2019-07-02 | 09:42:34 | 742,11 | 29,74 | 78,11 | 33,59 | 34,56  | 37,05  | 31,96 |  | 1510,765 |
| 2019-07-02 | 09:42:35 | 742,23 | 29,74 | 78,24 | 33,62 | 34,61  | 37,1   | 31,97 |  | 1510,783 |
| 2019-07-02 | 09:42:36 | 742,42 | 29,76 | 78,37 | 33,63 | 34,64  | 37,13  | 31,99 |  | 1510,819 |

**Fig. 121** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:





**Fig. 122** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ } ^\circ\text{C/W/m}^2$ ; 02/07/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante la maggior parte del test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $130,54 \text{ } ^\circ\text{C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,96 \text{ } ^\circ\text{C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $93,84 \text{ } ^\circ\text{C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase della miscela xilitolo-mannitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 45 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                   | Test 26    | COOLING      | Test 26    |
|---------------------------|------------|--------------|------------|
| Date                      | 02/07/2019 | Date         | 02/07/2019 |
| Start                     | 09:42      | Start        | 13:03      |
| End                       | 13:03      | End          | 15:59      |
| mf (kg)                   | 1,5        | Tmax (°C)    | 130,54     |
| mPCM (kg)                 | 2,5        | Tend (°C)    | 79,96      |
| Tstart (°C)               | 31,82      | Tamb,av (°C) | 33,22      |
| Tmax (°C)                 | 130,54     |              |            |
| DNIav (W/m <sup>2</sup> ) | 803,22     |              |            |
| Tamb,av (°C)              | 31,76      |              |            |

### **6.6.5 Prova a carico (olio di silicone) con xilitolo-mannitolo del 03/07/2019**

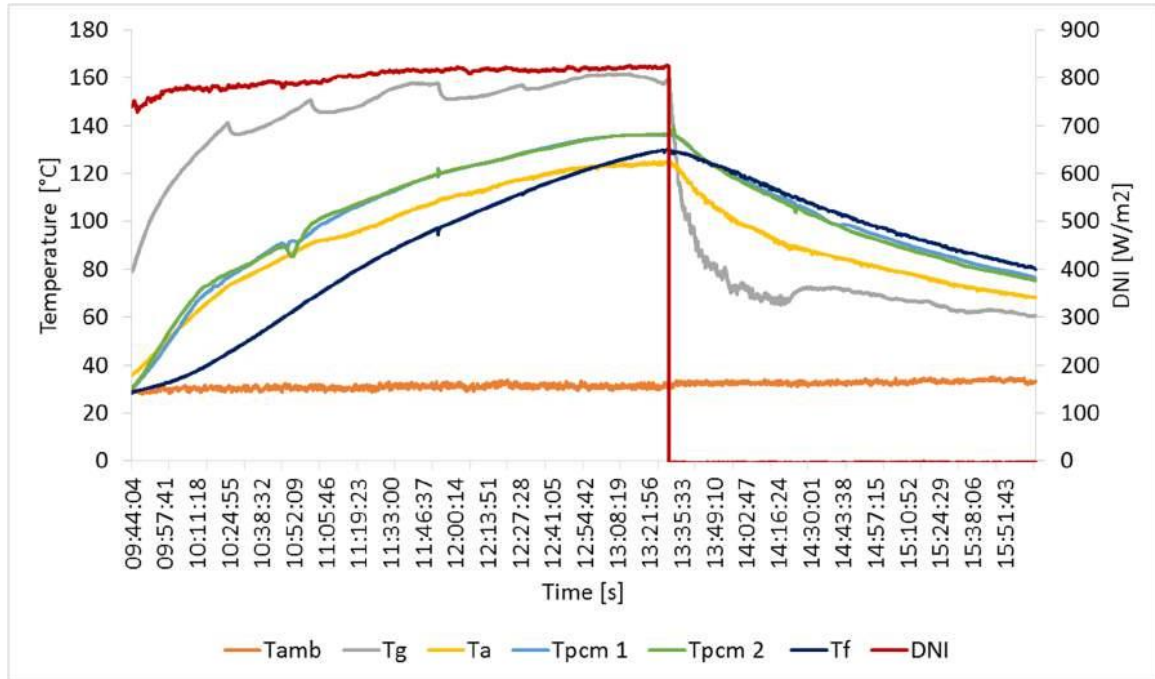
Il test è stato eseguito dalle 09:45 alle 16:00. Nella fase di riscaldamento del fluido, la radiazione solare media rilevata era di 801,40 W/m<sup>2</sup>, con una temperatura ambiente media di 30,75 °C. La temperatura massima raggiunta all'interno della camera di cottura era di 124,94 °C, il fluido impiegava circa 3 ore e 45 minuti per raggiungere la temperatura massima di 130,09 °C. Una volta raggiunta la temperatura massima, il forno solare si è spostato in modo da non essere raggiunto dalla radiazione solare diretta per studiare i tempi di raffreddamento. Da questo momento, quindi, è iniziata la fase di raffreddamento del fluido che presentava una temperatura ambiente media di 32,82 °C. La temperatura massima registrata per la miscela di xilitolo-mannitolo era di 139,63 °C.

Abbiamo utilizzato il software Microsoft Excel per elaborare i dati raccolti attraverso il sistema di acquisizione, come si può vedere facilmente dalla figura seguente. Queste operazioni di elaborazione e calcolo sono state eseguite per tutti i test eseguiti.

|            |          | DNI    | Tamb  | Tg    | Ta    | Tpcm 1 | Tpcm 2 | Tf    |  | cp       |
|------------|----------|--------|-------|-------|-------|--------|--------|-------|--|----------|
| 2019-07-03 | 09:44:04 | 738,6  | 29,04 | 79,19 | 35,56 | 30,12  | 30,32  | 28,25 |  | 1504,086 |
| 2019-07-03 | 09:44:05 | 738,6  | 29,04 | 79,19 | 35,56 | 30,12  | 30,32  | 28,25 |  | 1504,086 |
| 2019-07-03 | 09:44:06 | 738,77 | 29,01 | 79,17 | 35,61 | 30,14  | 30,34  | 28,25 |  | 1504,086 |
| 2019-07-03 | 09:44:07 | 738,95 | 28,81 | 79,15 | 35,64 | 30,16  | 30,35  | 28,27 |  | 1504,122 |
| 2019-07-03 | 09:44:08 | 738,97 | 28,71 | 79,15 | 35,63 | 30,18  | 30,38  | 28,28 |  | 1504,14  |
| 2019-07-03 | 09:44:09 | 739,53 | 28,82 | 79,13 | 35,63 | 30,21  | 30,39  | 28,29 |  | 1504,158 |
| 2019-07-03 | 09:44:10 | 739,53 | 28,82 | 79,13 | 35,63 | 30,21  | 30,39  | 28,29 |  | 1504,158 |
| 2019-07-03 | 09:44:11 | 739,7  | 28,98 | 79,12 | 35,64 | 30,21  | 30,41  | 28,28 |  | 1504,14  |
| 2019-07-03 | 09:44:12 | 739,84 | 29,05 | 79,12 | 35,66 | 30,23  | 30,42  | 28,3  |  | 1504,176 |
| 2019-07-03 | 09:44:13 | 739,79 | 29,12 | 79,11 | 35,69 | 30,25  | 30,44  | 28,3  |  | 1504,176 |
| 2019-07-03 | 09:44:14 | 739,94 | 29,16 | 79,12 | 35,73 | 30,27  | 30,46  | 28,31 |  | 1504,194 |
| 2019-07-03 | 09:44:15 | 740,37 | 29,08 | 79,12 | 35,77 | 30,28  | 30,48  | 28,33 |  | 1504,23  |
| 2019-07-03 | 09:44:16 | 740,66 | 29,21 | 79,11 | 35,8  | 30,3   | 30,49  | 28,33 |  | 1504,23  |
| 2019-07-03 | 09:44:17 | 740,98 | 29,17 | 79,1  | 35,84 | 30,3   | 30,51  | 28,34 |  | 1504,248 |
| 2019-07-03 | 09:44:18 | 741,32 | 29,21 | 79,11 | 35,85 | 30,33  | 30,51  | 28,35 |  | 1504,266 |
| 2019-07-03 | 09:44:19 | 741,26 | 29,32 | 79,08 | 35,85 | 30,35  | 30,54  | 28,36 |  | 1504,284 |
| 2019-07-03 | 09:44:20 | 740,9  | 29,35 | 79,11 | 35,87 | 30,36  | 30,55  | 28,36 |  | 1504,284 |
| 2019-07-03 | 09:44:21 | 741,07 | 29,34 | 79,1  | 35,86 | 30,37  | 30,56  | 28,37 |  | 1504,302 |
| 2019-07-03 | 09:44:22 | 741,09 | 29,34 | 79,11 | 35,86 | 30,39  | 30,58  | 28,38 |  | 1504,32  |
| 2019-07-03 | 09:44:23 | 741,03 | 29,2  | 79,11 | 35,86 | 30,41  | 30,6   | 28,38 |  | 1504,32  |
| 2019-07-03 | 09:44:24 | 740,93 | 29,08 | 79,13 | 35,88 | 30,42  | 30,62  | 28,4  |  | 1504,356 |
| 2019-07-03 | 09:44:25 | 741,1  | 29,05 | 79,14 | 35,88 | 30,44  | 30,63  | 28,41 |  | 1504,374 |
| 2019-07-03 | 09:44:26 | 741,05 | 29,12 | 79,15 | 35,89 | 30,46  | 30,64  | 28,41 |  | 1504,374 |
| 2019-07-03 | 09:44:27 | 740,52 | 29,1  | 79,16 | 35,91 | 30,48  | 30,65  | 28,43 |  | 1504,41  |
| 2019-07-03 | 09:44:28 | 740,26 | 28,76 | 79,17 | 35,96 | 30,47  | 30,68  | 28,43 |  | 1504,41  |
| 2019-07-03 | 09:44:29 | 740,11 | 28,64 | 79,19 | 36,01 | 30,5   | 30,7   | 28,44 |  | 1504,428 |
| 2019-07-03 | 09:44:30 | 740,39 | 28,73 | 79,19 | 36,04 | 30,51  | 30,7   | 28,44 |  | 1504,428 |
| 2019-07-03 | 09:44:31 | 740,4  | 28,77 | 79,21 | 36,09 | 30,53  | 30,72  | 28,45 |  | 1504,446 |
| 2019-07-03 | 09:44:32 | 740,51 | 28,82 | 79,22 | 36,1  | 30,54  | 30,73  | 28,46 |  | 1504,464 |

**Fig. 123** - Temperature misurate in relazione alla radiazione solare registrata e riportate in Microsoft Excel

Il grafico seguente mostra l'andamento delle temperature misurate in relazione alla radiazione solare misurata durante l'intero test:



**Fig. 124** - Grafico delle letture ( $F_1 = 0,19 \text{ °C/W/m}^2$ ; 03/07/2019)

Dal grafico è possibile notare come la linea arancione, che rappresenta la temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) sia rimasta costante per la totalità del test. La linea rossa identifica la radiazione solare (DNI). Anche questa, come la temperatura ambiente, rimane quasi costante, risultando orizzontale, il che significa che non c'erano nuvole durante la maggior parte del test. La linea blu identifica la temperatura del fluido ( $T_f$ ), ovvero l'olio di silicone. La tendenza sta aumentando nella fase di riscaldamento del fluido fino a una temperatura di  $130,09 \text{ °C}$  e quindi inizia a diminuire, nella fase di raffreddamento, fino a raggiungere la temperatura di  $79,88 \text{ °C}$ . La linea azzurra e quella verde identificano le temperature PCM ( $T_{PCM}$ ). Osservando la linea azzurra è possibile distinguere chiaramente un ginocchio vicino a  $94,71 \text{ °C}$ . Questo punto identifica la transizione di fase della miscela xilitolo-mannitolo.

La tabella seguente mostra le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale al termine del test del fluido che verranno utilizzate nel prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

**Tabella 46 - Riepilogo dei parametri**

| HEATING                               | Test 27    | COOLING                  | Test 27    |
|---------------------------------------|------------|--------------------------|------------|
| Date                                  | 03/07/2019 | Date                     | 03/07/2019 |
| Start                                 | 09:44      | Start                    | 13:30      |
| End                                   | 13:30      | End                      | 16:05      |
| m <sub>f</sub> (kg)                   | 1,5        | T <sub>max</sub> (°C)    | 130,09     |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | T <sub>end</sub> (°C)    | 79,88      |
| T <sub>start</sub> (°C)               | 28,25      | T <sub>amb,av</sub> (°C) | 32,82      |
| T <sub>max</sub> (°C)                 | 130,09     |                          |            |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 801,40     |                          |            |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 30,75      |                          |            |

### 6.6.6 Riepilogo delle prove a carico con xilitolo-mannitolo come accumulo di energia termica

Le tabelle seguenti mostrano le temperature ambientali medie e la radiazione solare media per le fasi di riscaldamento e raffreddamento, la temperatura iniziale del fluido, la temperatura massima del fluido e la temperatura finale del fluido al termine del test che verranno utilizzate in il prossimo passo per calcolare i vari parametri che ci porteranno a determinare la seconda figura di merito  $F_2$ . I dati relativi a tutti i test effettuati usando l'olio di silicone come fluido di prova inserito nella pentola con il PCM è inserito per avere una panoramica generale del comportamento del fluido testato all'interno del nostro forno solare. Nei paragrafi seguenti analizzeremo le differenze riscontrate tra il solo olio e l'olio e la miscela di xilitolo-mannitolo.

**Tabella 47 - Riepilogo dei risultati per la fase di riscaldamento durante le prove con olio silconico come liquido di prova e miscela di xilitolo-manichino come PCM**

| HEATING                               | Test 23    | Test 24    | Test 25    | Test 26    | Test 27    |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date                                  | 18/06/2019 | 19/06/2019 | 20/06/2019 | 02/07/2019 | 03/07/2019 |
| Start                                 | 09:49      | 09:34      | 09:50      | 09:42      | 09:44      |
| End                                   | 12:30      | 12:35      | 12:00      | 13:03      | 13:30      |
| m <sub>f</sub> (kg)                   | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| m <sub>PCM</sub> (kg)                 | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| T <sub>start</sub> (°C)               | 30,96      | 26,80      | 30,00      | 31,82      | 28,25      |
| T <sub>max</sub> (°C)                 | 120,05     | 120,13     | 120,04     | 130,54     | 130,09     |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 837,22     | 785,84     | 840,61     | 803,22     | 801,40     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 27,44      | 30,40      | 31,58      | 31,76      | 30,75      |

**Tabella 48** - Riepilogo dei risultati per la fase di raffreddamento durante le prove con olio siliconico come liquido di prova e miscela di xilitolo-manichino come PCM

| COOLING           | Test 23    | Test 24    | Test 25    | Test 26    | Test 27    |
|-------------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Date              | 18/06/2019 | 19/06/2019 | 20/06/2019 | 02/07/2019 | 03/07/2019 |
| Start             | 12:30      | 12:35      | 12:00      | 13:03      | 13:30      |
| End               | 15:09      | 15:11      | 14:34      | 15:59      | 16:05      |
| $m_f$ (kg)        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| $m_{PCM}$ (kg)    | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| $T_{max}$ (°C)    | 120,05     | 120,13     | 120,04     | 130,54     | 130,09     |
| $T_{end}$ (°C)    | 79,75      | 79,97      | 79,96      | 79,96      | 79,88      |
| $T_{amb,av}$ (°C) | 29,22      | 30,23      | 30,81      | 33,22      | 32,82      |

## 6.7 Confronto dei risultati

Nei paragrafi seguenti analizzeremo i risultati ottenuti nei test con solo olio e olio e i PCM testati al fine di confrontare i tempi di riscaldamento e raffreddamento del fluido nelle varie situazioni e i vari parametri calcolati per ciascun test. Sarà quindi determinato quanto la presenza di PCM all'interno della pentola influenzi i tempi di riscaldamento e raffreddamento del fluido, comprendendo così se ciò porta ad un miglioramento o ad un peggioramento in termini di tempo.

Il primo passo è stato quello di trovare una gamma di temperature comuni a tutti i test effettuati secondo il PCM utilizzato. Ciò era necessario perché i 3 PCM scelti presentavano 3 diverse temperature di fusione, rispettivamente 117-120 °C per eritritolo, 92-94 °C per xilitolo e 162-167 °C per mannitolo. Come spiegato nei paragrafi precedenti, non è stato possibile testare il mannitolo come sostanza pura proprio a causa della sua elevata temperatura di fusione, che non può essere raggiunta con il fornello solare in prova. Si è quindi deciso di fare una miscela con xilitolo, una composizione di xilitolo al 70% e mannitolo al 30%, per abbassare la temperatura di fusione. Dai test abbiamo scoperto che per la miscela questo è tra 90 e 94 °C, come facilmente prevedibile data la composizione.

Un intervallo di temperatura del fluido ci consente di confrontare i risultati ottenuti dai test con solo olio ai test con olio e PCM. Pertanto, sono state identificate le gamme per la fase di riscaldamento e la fase di raffreddamento che saranno spiegate in dettaglio nelle seguenti sottosezioni.

### 6.7.1 Confronto solo olio / Olio ed eritritolo

Per questo confronto, date le alte temperature raggiunte dal fluido di prova sia nei test con solo olio che nei test dell'olio e del PCM all'interno della pentola, è stato possibile prendere come intervallo di temperature comuni per la fase di riscaldamento un intervallo che va dalla temperatura  $T1 = 55 \text{ °C}$  alla temperatura  $T2 = 125 \text{ °C}$  del fluido, avendo quindi un  $\Delta T$  pari a  $70 \text{ °C}$ .

In questo intervallo la radiazione solare media  $DNI_{av}$  ( $\text{W/m}^2$ ), la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ), il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T1$  alla temperatura  $T2$  ( $\Delta t_h$  [h]) e sono stati calcolati i vari parametri  $t_s$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ),  $t_{c,heating}$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ) e  $\eta_{av}$  necessari per determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

Per la fase di raffreddamento, è stata eseguita una gamma di temperature comuni a test di olio e olio e PCM, che vanno dalla temperatura  $T2 = 125 \text{ °C}$  alla temperatura  $T3 = 100 \text{ °C}$ , avendo quindi un  $\Delta T$  pari a  $25 \text{ °C}$ .

In questo intervallo sono stati calcolati la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ) e il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T2$  alla temperatura  $T3$ .

Le tabelle seguenti mostrano i dati in dettaglio per la fase di riscaldamento e per la fase di raffreddamento (test con solo olio da 9 a 13; test con olio ed eritritolo da 14 a 17):

**Tabella 49 - Riepilogo della fase di riscaldamento (solo olio e olio ed eritritolo)**

| Quantity/Test                         | Oil only   |            |            |            |            | Oil plus Erythritol |            |            |            |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|------------|
|                                       | 9          | 10         | 11         | 12         | 13         | 14                  | 15         | 16         | 17         |
| Date                                  | 11/06/2018 | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 | 24/07/2018          | 11/09/2018 | 12/09/2018 | 25/09/2018 |
| Start                                 | 11:45      | 10:33      | 11:00      | 09:50      | 09:50      | 11:40               | 10:59      | 10:36      | 10:39      |
| End                                   | 15:20      | 12:33      | 12:40      | 11:40      | 11:08      | 15:02               | 14:37      | 15:07      | 14:12      |
| mf (kg)                               | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5                 | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)                             | -          | -          | -          | -          | -          | 2,5                 | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tstart (°C)                           | 49,14      | 37,73      | 29,07      | 48,10      | 39,51      | 52,39               | 28,41      | 25,29      | 24,23      |
| Tmax (°C)                             | 161,95     | 131,25     | 131,32     | 133,27     | 133,79     | 134,47              | 134,32     | 128,15     | 128,92     |
| T <sub>1</sub> (°C)                   | 55         | 55         | 55         | 55         | 55         | 55                  | 55         | 55         | 55         |
| T <sub>2</sub> (°C)                   | 125        | 125        | 125        | 125        | 125        | 125                 | 125        | 125        | 125        |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 767,22     | 882,77     | 720,04     | 601,80     | 751,80     | 834,99              | 855,53     | 867,96     | 946,62     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)              | 31,38      | 17,35      | 30,35      | 28,15      | 28,83      | 28,62               | 26,70      | 28,14      | 19,33      |
| Δth (h)                               | 1,11       | 1,58       | 1,27       | 1,01       | 0,95       | 1,94                | 2,30       | 3,35       | 2,52       |
| ts (h m <sup>2</sup> /kg)             | 0,50       | 0,72       | 0,57       | 0,46       | 0,43       | 0,88                | 1,04       | 1,52       | 1,14       |
| tch (h m <sup>2</sup> /kg)            | 0,43       | 0,71       | 0,46       | 0,31       | 0,36       | 0,82                | 0,99       | 1,47       | 1,20       |
| η <sub>av</sub>                       | 0,08       | 0,05       | 0,08       | 0,11       | 0,10       | 0,04                | 0,04       | 0,02       | 0,03       |
| F <sub>2</sub>                        | 0,06       | 0,04       | 0,06       | 0,13       | 0,08       | 0,03                | 0,03       | 0,02       | 0,02       |

**Tabella 50 - Riepilogo della fase di raffreddamento (solo olio e olio ed eritritolo)**

| Quantity/Test            | Oil only   |            |            |            |            | Oil plus Erythritol |            |            |            |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|------------|---------------------|------------|------------|------------|
|                          | 9          | 10         | 11         | 13         | 13         | 14                  | 15         | 16         | 17         |
| Date                     | 11/06/2018 | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 | 24/07/2018          | 11/09/2018 | 12/09/2018 | 25/09/2018 |
| Start                    | 15:20      | 12:33      | 12:40      | 11:40      | 11:08      | 15:02               | 14:37      | 15:07      | 14:12      |
| End                      | 16:30      | 13:38      | 14:00      | 12:25      | 12:25      | 16:40               | 17:15      | 17:21      | 16:28      |
| mf (kg)                  | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5                 | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)                | -          | -          | -          | -          | -          | 2,5                 | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tmax (°C)                | 161,95     | 131,25     | 131,32     | 133,27     | 133,79     | 134,47              | 134,32     | 128,15     | 128,92     |
| Tend (°C)                | 107,95     | 70,33      | 79,19      | 75,14      | 78,99      | 98,94               | 97,61      | 98,43      | 89,84      |
| T <sub>2</sub> (°C)      | 125        | 125        | 125        | 125        | 125        | 125                 | 125        | 125        | 125        |
| T <sub>3</sub> (°C)      | 100        | 100        | 100        | 100        | 100        | 100                 | 100        | 100        | 100        |
| T <sub>amb,av</sub> (°C) | 29,24      | 17,35      | 29,69      | 29,02      | 28,46      | 29,77               | 26,46      | 27,57      | 19,87      |
| Δtc (h)                  | 0,40       | 0,31       | 0,50       | 0,48       | 0,46       | 1,88                | 2,19       | 2,03       | 1,67       |



**Tabella 51** - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di riscaldamento medio  $\Delta t_{h,av}$  per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM)

| Set       | $\Delta t_{h,av}$ (h) | AD,av (%) | AD,min (%) | AD,max (%) |
|-----------|-----------------------|-----------|------------|------------|
| Oil       | 1,18                  | -         | -          | -          |
| Oil + PCM | 2,53                  | 114,41    | 22,78      | 252,63     |

**Tabella 52** - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di raffreddamento medio  $\Delta t_{c,av}$  per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM)

| Set       | $\Delta t_{c,av}$ (h) | AD,av (%) | AD,min (%) | AD,max (%) |
|-----------|-----------------------|-----------|------------|------------|
| Oil       | 0,43                  | -         | -          | -          |
| Oil + PCM | 1,94                  | 351,16    | 234,00     | 606,45     |

### 6.7.2 Confronto solo olio / Olio e xilitolo

Per questo confronto, date le alte temperature raggiunte dal fluido di prova sia nei test con solo olio che nei test dell'olio e del PCM all'interno della pentola, è stato possibile prendere come intervallo di temperature comuni per la fase di riscaldamento un intervallo che va dalla temperatura  $T1 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$  alla temperatura  $T2 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  del fluido, avendo quindi un  $\Delta T$  pari a  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In questo intervallo la radiazione solare media  $DNI_{av}$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ), il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T1$  alla temperatura  $T2$  ( $\Delta t_h$  [h]) e sono stati calcolati i vari parametri  $t_s$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ),  $t_{c,heating}$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ) e  $\eta_{av}$  necessari per determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

Per la fase di raffreddamento, è stata eseguita una gamma di temperature comuni a test di olio e olio e PCM, che vanno dalla temperatura  $T2 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  alla temperatura  $T3 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , con un  $\Delta T$  pari a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In questo intervallo sono stati calcolati la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ) e il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T2$  alla temperatura  $T3$ .

Le tabelle seguenti mostrano i dati in dettaglio per la fase di riscaldamento e per la fase di raffreddamento (test con solo olio da 10 a 13; test con olio e xilitolo da 18 a 22):

**Tabella 53 - Riepilogo della fase di riscaldamento (solo olio e olio e xilitolo)**

| Oil only                              |            |            |            |            | Oil plus Xylitol |            |            |            |            |
|---------------------------------------|------------|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| Quantity/Test                         | 10         | 11         | 12         | 13         | 18               | 19         | 20         | 21         | 22         |
| Date                                  | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 | 03/06/2019       | 04/06/2019 | 05/06/2019 | 06/06/2019 | 07/06/2019 |
| Start                                 | 10:33      | 11:00      | 09:50      | 09:50      | 11:00            | 09:42      | 10:26      | 12:36      | 09:34      |
| End                                   | 12:33      | 12:40      | 11:40      | 11:08      | 14:20            | 12:08      | 12:11      | 13:50      | 12:25      |
| mf (kg)                               | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 2,0              | 2,0        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)                             | -          | -          | -          | -          | 2,5              | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tstart (°C)                           | 37,73      | 29,07      | 48,10      | 39,51      | 33,44            | 31,10      | 51,16      | 27,26      | 25,09      |
| Tmax (°C)                             | 131,25     | 131,32     | 133,27     | 133,79     | 110,24           | 110,63     | 110,29     | 110,22     | 109,07     |
| T <sub>1</sub> (°C)                   | 55         | 55         | 55         | 55         | 55               | 55         | 55         | 55         | 55         |
| T <sub>2</sub> (°C)                   | 110        | 110        | 110        | 110        | 110              | 110        | 110        | 110        | 110        |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> ) | 876,49     | 718,69     | 588,64     | 749,41     | 900,72           | 793,43     | 794,45     | 719,75     | 726,24     |
| Tamb,av (°C)                          | 14,22      | 30,91      | 28,17      | 28,57      | 27,29            | 28,64      | 28,23      | 26,97      | 26,09      |
| Δth (h)                               | 1,24       | 0,83       | 0,73       | 0,71       | 2,85             | 1,95       | 1,68       | 2,83       | 2,13       |
| ts (h m <sup>2</sup> /kg)             | 0,56       | 0,38       | 0,33       | 0,32       | 0,97             | 0,67       | 0,76       | 1,28       | 0,96       |
| tch (h m <sup>2</sup> /kg)            | 0,55       | 0,30       | 0,22       | 0,27       | 0,97             | 0,59       | 0,67       | 1,03       | 0,78       |
| η <sub>av</sub>                       | 0,05       | 0,09       | 0,13       | 0,10       | 0,03             | 0,05       | 0,04       | 0,03       | 0,04       |
| F2                                    | 0,04       | 0,07       | 0,12       | 0,07       | 0,02             | 0,03       | 0,03       | 0,02       | 0,03       |

**Tabella 54 - Riepilogo della fase di raffreddamento (solo olio e olio e xilitolo)**

| Oil only            |            |            |            |            | Oil plus Xylitol |            |            |            |            |
|---------------------|------------|------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------|------------|
| Quantity/Test       | 10         | 11         | 12         | 13         | 18               | 19         | 20         | 21         | 22         |
| Date                | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 | 03/06/2019       | 04/06/2019 | 05/06/2019 | 06/06/2019 | 07/06/2019 |
| Start               | 12:33      | 12:40      | 11:40      | 11:08      | 14:20            | 12:08      | 12:11      | 13:50      | 12:25      |
| End                 | 13:38      | 14:00      | 12:25      | 12:25      | 16:28            | 14:25      | 14:31      | 15:57      | 14:25      |
| mf (kg)             | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 2,0              | 2,0        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)           | -          | -          | -          | -          | 2,5              | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tmax (°C)           | 131,25     | 131,32     | 133,27     | 133,79     | 110,24           | 110,63     | 110,29     | 110,22     | 110,01     |
| Tend (°C)           | 70,33      | 79,19      | 75,14      | 78,99      | 79,82            | 79,40      | 78,74      | 79,72      | 79,84      |
| T <sub>2</sub> (°C) | 110        | 110        | 110        | 110        | 110              | 110        | 110        | 110        | 110        |
| T <sub>3</sub> (°C) | 80         | 80         | 80         | 80         | 80               | 80         | 80         | 80         | 80         |
| Tamb,av (°C)        | 17,51      | 30,36      | 29,87      | 28,64      | 29,27            | 31,03      | 28,08      | 26,26      | 26,64      |
| Δtc (h)             | 0,48       | 0,78       | 0,78       | 0,69       | 2,11             | 2,27       | 1,64       | 2,11       | 2,00       |

**Tabella 55** - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di riscaldamento medio  $\Delta t_{h,av}$  per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM)

| Set       | $\Delta t_{h,av}$ (h) | AD,av (%) | AD,min (%) | AD,max (%) |
|-----------|-----------------------|-----------|------------|------------|
| Oil       | 0,88                  | -         | -          | -          |
| Oil + PCM | 2,29                  | 160,23    | 35,48      | 301,41     |

**Tabella 56** - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di raffreddamento medio  $\Delta t_{c,av}$  per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM)

| Set       | $\Delta t_{c,av}$ (h) | AD,av (%) | AD,min (%) | AD,max (%) |
|-----------|-----------------------|-----------|------------|------------|
| Oil       | 0,68                  | -         | -          | -          |
| Oil + PCM | 2,03                  | 198,53    | 110,26     | 372,92     |

### 6.7.3 Confronto solo olio / Olio e xilitolo-mannitolo

Per questo confronto, date le alte temperature raggiunte dal fluido di prova sia nei test con solo olio che nei test dell'olio e del PCM all'interno della pentola, è stato possibile prendere come intervallo di temperature comuni per la fase di riscaldamento un intervallo che va dalla temperatura  $T_1 = 55 \text{ }^\circ\text{C}$  alla temperatura  $T_2 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  del fluido, avendo quindi un  $\Delta T$  pari a  $55 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In questo intervallo la radiazione solare media  $DNI_{av}$  ( $\text{W}/\text{m}^2$ ), la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ), il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T_1$  alla temperatura  $T_2$  ( $\Delta t_h$  [h]) e sono stati calcolati i vari parametri  $t_s$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ),  $t_{c,heating}$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ) e  $\eta_{av}$  necessari per determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

Per la fase di raffreddamento, è stata eseguita una gamma di temperature comuni a test di olio e olio e PCM, che vanno dalla temperatura  $T_2 = 110 \text{ }^\circ\text{C}$  alla temperatura  $T_3 = 80 \text{ }^\circ\text{C}$ , con un  $\Delta T$  pari a  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ .

In questo intervallo sono stati calcolati la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ) e il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T_2$  alla temperatura  $T_3$ .

Le tabelle seguenti mostrano i dati in dettaglio per la fase di riscaldamento e per la fase di raffreddamento (test con solo olio da 10 a 13; test con olio e xilitolo-mannitolo da 23 a 27):

**Tabella 57** - Riepilogo della fase di riscaldamento (solo olio e olio e xilitolo-mannitolo)

| Oil only                               |            |            |            |            | Oil plus Xylitol - Mannitol |            |            |            |            |
|--|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Quantity/Test                          | 10         | 11         | 12         | 13         | 23                          | 24         | 25         | 26         | 27         |
| Date                                   | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 | 18/06/2019                  | 19/06/2019 | 20/06/2019 | 02/07/2019 | 03/07/2019 |
| Start                                  | 10:33      | 11:00      | 09:50      | 09:50      | 09:49                       | 09:34      | 09:50      | 09:42      | 09:44      |
| End                                    | 12:33      | 12:40      | 11:40      | 11:08      | 12:30                       | 12:35      | 12:00      | 13:03      | 13:30      |
| mf (kg)                                | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5                         | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)                              | -          | -          | -          | -          | 2,5                         | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tstart (°C)                            | 37,73      | 29,07      | 48,10      | 39,51      | 30,96                       | 26,80      | 30,00      | 31,82      | 28,25      |
| Tmax (°C)                              | 131,25     | 131,32     | 133,27     | 133,79     | 120,05                      | 120,13     | 120,04     | 130,54     | 130,09     |
| T <sub>1</sub> (°C)                    | 55         | 55         | 55         | 55         | 55                          | 55         | 55         | 55         | 55         |
| T <sub>2</sub> (°C)                    | 110        | 110        | 110        | 110        | 110                         | 110        | 110        | 110        | 110        |
| DNI <sub>av</sub> (W/m <sup>2</sup> )  | 876,49     | 718,69     | 588,64     | 749,41     | 849,84                      | 775,80     | 828,82     | 808,09     | 806,39     |
| T <sub>amb,av</sub> (°C)               | 14,22      | 30,91      | 28,17      | 28,57      | 27,81                       | 30,77      | 31,97      | 31,79      | 30,96      |
| Δth (h)                                | 1,24       | 0,83       | 0,73       | 0,71       | 1,48                        | 1,58       | 1,19       | 1,91       | 1,72       |
| t <sub>s</sub> (h m <sup>2</sup> /kg)  | 0,56       | 0,38       | 0,33       | 0,32       | 0,67                        | 0,72       | 0,54       | 0,87       | 0,78       |
| t <sub>ch</sub> (h m <sup>2</sup> /kg) | 0,55       | 0,30       | 0,22       | 0,27       | 0,64                        | 0,62       | 0,50       | 0,78       | 0,70       |
| η <sub>av</sub>                        | 0,05       | 0,09       | 0,13       | 0,10       | 0,04                        | 0,04       | 0,05       | 0,04       | 0,04       |
| F <sub>2</sub>                         | 0,04       | 0,07       | 0,12       | 0,07       | 0,03                        | 0,03       | 0,04       | 0,02       | 0,03       |

**Tabella 58** - Riepilogo della fase di raffreddamento (solo olio e olio e xilitolo-mannitolo)

| Oil only                 |            |            |            |            | Oil plus Xylitol - Mannitol |            |            |            |            |
|--------------------------|------------|------------|------------|------------|-----------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Quantity/Test            | 10         | 11         | 12         | 13         | 23                          | 24         | 25         | 26         | 27         |
| Date                     | 27/09/2018 | 11/06/2019 | 12/06/2019 | 17/06/2019 | 18/06/2019                  | 19/06/2019 | 20/06/2019 | 02/07/2019 | 03/07/2019 |
| Start                    | 12:33      | 12:40      | 11:40      | 11:08      | 12:30                       | 12:35      | 12:00      | 13:03      | 13:30      |
| End                      | 13:38      | 14:00      | 12:25      | 12:25      | 15:09                       | 15:11      | 14:34      | 15:59      | 16:05      |
| mf (kg)                  | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5                         | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)                | -          | -          | -          | -          | 2,5                         | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tmax (°C)                | 131,25     | 131,32     | 133,27     | 133,79     | 120,05                      | 120,13     | 120,04     | 130,54     | 130,09     |
| Tend (°C)                | 70,33      | 79,19      | 75,14      | 78,99      | 79,75                       | 79,97      | 79,96      | 79,96      | 79,88      |
| T <sub>2</sub> (°C)      | 110        | 110        | 110        | 110        | 110                         | 110        | 110        | 110        | 110        |
| T <sub>3</sub> (°C)      | 80         | 80         | 80         | 80         | 80                          | 80         | 80         | 80         | 80         |
| T <sub>amb,av</sub> (°C) | 17,51      | 30,36      | 29,87      | 28,64      | 29,29                       | 30,10      | 30,40      | 33,02      | 33,03      |
| Δtc (h)                  | 0,48       | 0,78       | 0,78       | 0,69       | 1,80                        | 1,84       | 1,92       | 1,75       | 1,68       |

**Tabella 59** - Deviazioni assolute (%) tra il tempo medio di riscaldamento  $\Delta t_{h,av}$  per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM)

| Set       | $\Delta t_{h,av}$ (h) | AD <sub>av</sub> (%) | AD <sub>min</sub> (%) | AD <sub>max</sub> (%) |
|-----------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Oil       | 0,88                  | -                    | -                     | -                     |
| Oil + PCM | 1,58                  | 79,55                | 43,37                 | 169,01                |

**Tabella 60** - Deviazioni assolute (%) tra il tempo di raffreddamento medio  $\Delta t_{c,av}$  per il set 1 (solo olio) e il set 2 (olio e PCM)

| Set       | $\Delta t_{c,av}$ (h) | AD <sub>av</sub> (%) | AD <sub>min</sub> (%) | AD <sub>max</sub> (%) |
|-----------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Oil       | 0,68                  | -                    | -                     | -                     |
| Oil + PCM | 1,60                  | 135,29               | 115,38                | 300,00                |

#### 6.7.4 Confronto tra olio e xilitolo / Olio e xilitolo-mannitolo

Per questo confronto, date le alte temperature raggiunte dal fluido di prova sia nell'olio che nello xilitolo e nelle prove di olio e miscela all'interno della pentola, è stato possibile prendere come intervallo di temperature comuni per la fase di riscaldamento un intervallo che va dalla temperatura  $T_1 = 55 \text{ °C}$  alla temperatura  $T_2 = 110 \text{ °C}$  del fluido, avendo quindi un  $\Delta T$  pari a  $55 \text{ °C}$ .

In questo intervallo la radiazione solare media  $DNI_{av}$  ( $\text{W/m}^2$ ), la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ), il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T_1$  alla temperatura  $T_2$  ( $\Delta t_h$  [h]) e sono stati calcolati i vari parametri  $t_s$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ),  $t_{c,heating}$  ( $\text{h m}^2/\text{kg}$ ) e  $\eta_{av}$  necessari per determinare la seconda figura di merito  $F_2$ .

Per la fase di raffreddamento, è stata eseguita una gamma di temperature comuni a test di olio e olio e PCM, che vanno dalla temperatura  $T_2 = 110 \text{ °C}$  alla temperatura  $T_3 = 80 \text{ °C}$ , con un  $\Delta T$  pari a  $30 \text{ °C}$ .

In questo intervallo sono stati calcolati la temperatura ambiente media ( $T_{amb,av}$ ) e il tempo impiegato dal fluido per passare dalla temperatura  $T_2$  alla temperatura  $T_3$ .

Le tabelle seguenti mostrano i dati in dettaglio per la fase di riscaldamento e per la fase di raffreddamento (test olio e xilitolo da 18 a 22; test olio e xilitolo-mannitolo da 23 a 27):

**Tabella 61 - Riepilogo della fase di riscaldamento (olio e xilitolo e olio e xilitolo-mannitolo)**

| Oil plus Xylitol |            |            |            |            |            | Oil plus Xylitol and Mannitol |            |            |            |            |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Quantity/Test    | 18         | 19         | 20         | 21         | 22         | 23                            | 24         | 25         | 26         | 27         |
| Date             | 03/06/2019 | 04/06/2019 | 05/06/2019 | 06/06/2019 | 07/06/2019 | 18/06/2019                    | 19/06/2019 | 20/06/2019 | 02/07/2019 | 03/07/2019 |
| Start            | 11:00      | 09:42      | 10:26      | 12:36      | 09:34      | 09:49                         | 09:34      | 09:50      | 09:42      | 09:44      |
| End              | 14:20      | 12:08      | 12:11      | 13:50      | 12:25      | 12:30                         | 12:35      | 12:00      | 13:03      | 13:30      |
| mf (kg)          | 2,0        | 2,0        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5                           | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5                           | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tstart (°C)      | 33,44      | 31,10      | 51,16      | 27,26      | 25,09      | 30,96                         | 26,80      | 30,00      | 31,82      | 28,25      |
| Tmax (°C)        | 110,24     | 110,63     | 110,29     | 110,22     | 109,07     | 120,05                        | 120,13     | 120,04     | 130,54     | 130,09     |
| T1 (°C)          | 55         | 55         | 55         | 55         | 55         | 55                            | 55         | 55         | 55         | 55         |
| T2 (°C)          | 110        | 110        | 110        | 110        | 110        | 110                           | 110        | 110        | 110        | 110        |
| DNlav (W/m²)     | 900,72     | 793,43     | 794,45     | 719,75     | 726,24     | 849,84                        | 775,80     | 828,82     | 808,09     | 806,39     |
| Tamb,av (°C)     | 27,29      | 28,64      | 28,23      | 26,97      | 26,09      | 27,81                         | 30,77      | 31,97      | 31,79      | 30,96      |
| Δth (h)          | 2,85       | 1,95       | 1,68       | 2,83       | 2,13       | 1,48                          | 1,58       | 1,19       | 1,91       | 1,72       |
| ts (h m²/kg)     | 0,97       | 0,67       | 0,76       | 1,28       | 0,96       | 0,67                          | 0,72       | 0,54       | 0,87       | 0,78       |
| tch (h m²/kg)    | 0,97       | 0,59       | 0,67       | 1,03       | 0,78       | 0,64                          | 0,62       | 0,50       | 0,78       | 0,70       |
| ηav              | 0,03       | 0,05       | 0,04       | 0,03       | 0,04       | 0,04                          | 0,04       | 0,05       | 0,04       | 0,04       |
| F2               | 0,02       | 0,03       | 0,03       | 0,02       | 0,03       | 0,03                          | 0,03       | 0,04       | 0,02       | 0,03       |

**Tabella 62 - Riepilogo della fase di raffreddamento (olio e xilitolo e olio e xilitolo-mannitolo)**

| Oil plus Xylitol |            |            |            |            |            | Oil plus Xylitol and Mannitol |            |            |            |            |
|------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Quantity/Test    | 18         | 19         | 20         | 21         | 22         | 23                            | 24         | 25         | 26         | 27         |
| Date             | 03/06/2019 | 04/06/2019 | 05/06/2019 | 06/06/2019 | 07/06/2019 | 18/06/2019                    | 19/06/2019 | 20/06/2019 | 02/07/2019 | 03/07/2019 |
| Start            | 14:20      | 12:08      | 12:11      | 13:50      | 12:25      | 12:30                         | 12:35      | 12:00      | 13:03      | 13:30      |
| End              | 16:28      | 14:25      | 14:31      | 15:57      | 14:25      | 15:09                         | 15:11      | 14:34      | 15:59      | 16:05      |
| mf (kg)          | 2,0        | 2,0        | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5                           | 1,5        | 1,5        | 1,5        | 1,5        |
| mPCM (kg)        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5                           | 2,5        | 2,5        | 2,5        | 2,5        |
| Tmax (°C)        | 110,24     | 110,63     | 110,29     | 110,22     | 110,01     | 120,05                        | 120,13     | 120,04     | 130,54     | 130,09     |
| Tend (°C)        | 79,82      | 79,40      | 78,74      | 79,72      | 79,84      | 79,75                         | 79,97      | 79,96      | 79,96      | 79,88      |
| T2 (°C)          | 110        | 110        | 110        | 110        | 110        | 110                           | 110        | 110        | 110        | 110        |
| T3 (°C)          | 80         | 80         | 80         | 80         | 80         | 80                            | 80         | 80         | 80         | 80         |
| Tamb,av (°C)     | 29,27      | 31,03      | 28,08      | 26,26      | 26,64      | 29,29                         | 30,10      | 30,40      | 33,02      | 33,03      |
| Δte (h)          | 2,11       | 2,27       | 1,64       | 2,11       | 2,00       | 1,80                          | 1,84       | 1,92       | 1,75       | 1,68       |

## 6.8 Riepilogo dei risultati

Dopo aver confrontato tutti i risultati ottenuti dai test effettuati con solo olio di silicone con quelli con olio e l'aggiunta di PCM all'interno della pentola, abbiamo una visione molto chiara di come cambiano i tempi.

Tutti i test hanno mostrato come risultato finale un sostanziale aumento dei tempi nella fase di riscaldamento. In questa fase, infatti, l'olio di silicone, quando testato insieme al PCM (eritritolo, xilitolo o miscela) impiega due volte, in alcuni casi tre volte il tempo per raggiungere la temperatura presa come riferimento (questo è T2 scelto per fase di riscaldamento, che era di 125 °C con eritritolo e 110 °C con xilitolo o miscela) rispetto a quando viene testato da solo. Questo aumento nel tempo era facilmente prevedibile. In alcuni casi la causa sta nella quantità di massa del fluido testato: in alcuni test olio e xilitolo, infatti, è stata utilizzata una quantità di olio siliconico pari a 2,0 kg anziché 1,5 kg. La causa principale, tuttavia, è la massa del PCM stesso che deve essere riscaldata insieme al fluido. Tale aumento di massa del PCM provoca un rallentamento del riscaldamento del fluido. Altre possibili deviazioni nei risultati possono dipendere dal fatto che gli operatori non mantengano il fornello solare sempre correttamente allineato verso il sole durante le prove.

D'altra parte, il periodo di raffreddamento dell'olio di silicone quando testato con qualsiasi PCM aumenta di circa 3 volte. Questo risultato era quello che speravamo. L'introduzione dei PCM nella pentola provoca un aumento del tempo di riscaldamento del fluido in esso contenuto ma provoca anche un rallentamento del raffreddamento del fluido, quindi la fase di raffreddamento è molto più lunga in tutti i test.

## Conclusioni

---

Lo scopo di questo lavoro era di analizzare, attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti, tutti i test effettuati con il fornello a scatola solare portatile negli anni 2017, 2018 e 2019 effettuati in laboratorio, con e senza l'uso dei PCM. I test sperimentali effettuati hanno permesso di raccogliere dati rilevanti sull'efficienza del forno solare, che risulta essere di buon livello.

Una delle principali limitazioni dei forni solari, ignorando ad esempio variabili imprevedibili come il vento, che porterebbe a fluttuazioni di temperatura all'interno della camera di cottura, è rappresentata dalla possibilità di essere utilizzata solo in presenza di radiazioni solari. Per questo motivo, è emersa la necessità di utilizzare un sistema di energia termica per consentire l'utilizzo del forno solare anche quando la fonte solare è intermittente (in particolare giorno nuvoloso) o completamente assente (di notte). Abbiamo quindi proceduto alla scelta dei PCM adatti ai nostri casi d'uso in termini di temperature di fusione in base alle temperature massime registrate all'interno della camera di cottura durante i test a vuoto del nostro forno solare.

I test hanno dimostrato che l'uso di PCM porta ad un notevole aumento dei tempi di riscaldamento del fluido di prova testato: ciò è dovuto alla presenza della massa di PCM che deve essere riscaldata. D'altra parte hanno anche dimostrato che c'è un aumento dei tempi di raffreddamento dell'olio che è ciò che speravamo di ottenere, ovvero poter continuare a cucinare anche quando la radiazione solare è scarsa o assente.

Il problema riscontrato durante il lavoro era come confrontare i dati ottenuti in base ai PCM utilizzati. Per sviluppi futuri, pertanto, è necessario trovare una metodologia più sistematica di confronto tra vari PCM testati, indipendente dalla temperatura. Inoltre, in futuro si cercherà di creare e successivamente studiare, analizzando i risultati di nuovi test, miscele con temperature ad hoc per soddisfare requisiti precisi.



## Bibliografia

---

- [1] E. Cuce and P. M. Cuce, "A comprehensive review on solar cookers," *Applied Energy*, vol. 102, pp. 1399-1421, 2013.
- [2] G. Coccia, G. Di Nicola, M. Pierantozzi, S. Tomassetti and A. Aquilanti, "Design, manufacturing, and test of a high concentration ratio solar box cooker with multiple reflectors," *Solar Energy*, vol. 155, pp. 781-792, 2017.
- [3] Alanor GmbH & Co. KG, [Online].  
Sito internet:  
<https://docplayer.net/58013156-Miro-sun-1-structure-of-miro-sun.html>.
- [4] SOLEC - Solar Energy Corporation, [Online].  
Sito internet:  
<https://www.solec.org/wpcontent/uploads/2014/02/SOLKOTEbrochure.pdf>.
- [5] Sito internet <http://ecoage.it>
- [6] Sito internet <https://www.heliac.dk/solar-cooker>
- [7] K. Schwarzer and M. E. V. d. S. E. Vieira da Silva, "Solar cooking system with or without heat storage for families and institutions," *Solar Energy*, vol. 75, no. 1, pp. 35-41, 2003.
- [8] S. Cohen, Y. Marcus, Y. Migron, S. Dikstein and A. Shafran, "Water sorption, binding and solubility of polyols," *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions*, vol. 89, no. 17, pp. 3271-3275, 1993.
- [9] A. Kaizawa, N. Maruoka, A. Kawai, H. Kamano, T. Jozuka, T. Senda and T. Akiyama, "Thermophysical and heat transfer properties of phase change material candidate for waste heat transportation system," *Heat and Mass Transfer*, vol. 44, no. 7, pp. 763-769, 2008.
- [10] A. J. Lopes Jesus, S. C. C. Nunes, M. Ramos Silva, A. M. Matos-Beja and J. S. Redinha, "Erythritol: Crystal growth from the melt," *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 388, no. 1-2, pp. 129-135, 2010.
- [11] U. Pawar, S. J. Shankargouda and P. Honguntiker, "Solar Energy for Cooking Food in Urban Buildings," *International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences*, vol. 3, pp. 190-194, 2015.
- [12] S. Höhle, A. König-Haagen and D. Brüggemann, "Thermophysical Characterization of MgCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O, Xylitol and Erythritol as Phase Change Materials (PCM) for Latent Heat Thermal Energy Storage (LHTES)," *Materials*, 2017.

- [13] A. Seppälä, A. Meriläinen, L. Wikström and P. S. Kauranen, “The effect of additives on the speed of the crystallization front of xylitol with various degrees of supercooling,” *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 34, no. 5, pp. 523-527, 2010.
- [14] S. D. Sharma, D. Buddhi, R. L. Sawhney and A. Sharma, “Design, development and performance evaluation of a latent heat storage unit for evening cooking in a solar cooker,” *Energy Conversion and Management*, vol. 41, no. 14, pp. 1497-1508, 2000.
- [15] Silitech SA, [Online].  
Sito internet: [http://www.silitech.ch/upload/complement\\_info\\_fournisseur\\_d/32.pdf](http://www.silitech.ch/upload/complement_info_fournisseur_d/32.pdf).
- [16] G. Crovatto. [Online].  
Sito internet: <https://digilander.libero.it/giannicrovatto/f-m-eff.htm>.
- [17] AGC Glass Europe, “4 mm Planibel Clearvision technical data sheet,” [Online].  
Sito internet: <https://www.agc-yourglass.com/>.
- [18] S. D. Sharma, T. Iwata, H. Kitano and K. Sagara, “Thermal performance of a solar cooker based on an evacuated tube solar collector with a PCM storage unit,” *Solar Energy*, vol. 78, no. 3, pp. 416-426, 2005.

# Ringraziamenti

---

*Il mio primo ringraziamento va al Prof. Giovanni di Nicola per gli insegnamenti che mi ha impartito nel corso della laurea triennale, e soprattutto per avermi concesso l'opportunità di partecipare a questo lavoro le cui tematiche (quali l'utilizzo di energia rinnovabile e dei PCM) sono molto interessanti ed attuali nel campo dell'Ingegneria Edile.*

*Ringrazio i miei genitori che, nonostante qualche caduta durante il percorso, non hanno mai smesso di credere nelle mie potenzialità e capacità e che mi hanno sempre permesso di scegliere autonomamente del mio futuro.*

*Ringrazio mia sorella Flavia, che riesce sempre a strapparmi un sorriso in qualsiasi situazione e a rallegrare le mie giornate, grazie per i mille momenti che trascorriamo insieme e per avermi trasmesso un po' di quella leggerezza di cui ogni tanto mi sono dimenticata.*

*Ringrazio i miei parenti, vicini e lontani, per avermi sempre spronata a dare il massimo e per aver gioito insieme a me delle mie piccole vittorie. Un grazie particolare a zio Brizio il quale mi è sempre accanto come un fratello maggiore, nonostante i chilometri che ci separano.*

*Ringrazio i miei amici ed i compagni d'università, sempre pronti a sostenermi e a festeggiare. Grazie per essere stati miei complici, ognuno a suo modo, in questo percorso intenso ed entusiasmante.*

*Ringrazio Marco, colui che mi ha sopportato e supportato, che ha sempre creduto in me, che mi ha confortato quando qualcosa andava storto, che mi ha aiutato con pazienza e generosità e non c'è stata una volta in cui io non abbia potuto contare su di lui. Grazie per tutto il tempo che mi hai dedicato. Grazie perché ci sei sempre stato.*

*Infine ringrazio me stessa, per esser stata forte, per aver dimostrato di essere all'altezza di affrontare ogni piccola e grande difficoltà, per aver creduto in me fino alla fine, per avuto la determinazione che mi ha portata al raggiungimento di questo traguardo con fierezza.*