

$$T_{ils} = 24,0 + 0,2 \cdot (T_{mmo} - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{T_{mmo} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]} - \left( \frac{Tr - T_{ls}}{2} \right)$$

$$- (Va \cdot 3,636) \pm F_{adap} \pm F_{contv} \pm F_{sexo} + F_{edad} - F_{clomet} \pm F_{ht} - F_{tp} \pm F_{exp}$$

$$T_{ili} = 20,0 + 0,18 \cdot (T_{mmo} - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{T_{mmo} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]} - \left( \frac{Tr - T_{ls}}{2} \right)$$

$$- (Va \cdot 3,636) \pm F_{adap} \pm F_{contv} \pm F_{sexo} + F_{edad} - F_{clomet} \pm F_{ht} - F_{tp} \pm F_{exp}$$

## Capítulo 6.

### Modelo Matemático de la Zona Variable de Confort Térmico.

## 6.0. Introducción.

En el capítulo anterior se han presentado y definido cada una de las variantes que integran el modelo de la zona de confort térmico que se propone en este trabajo, además de haber definido como se calcularán y se integrarán cada una de ellas en dicho modelo.

En el modelo matemático se integrarán todas las expresiones usadas para definir cada una de las variables que se ha considerado que deben de componer el modelo de la zona de confort térmico por su influencia en el ambiente térmico del espacio y en el confort térmico del ocupante.

### 6.1. Modelo Matemático de la Zona Variable de Confort Térmico.

El modelo matemático de la zona variable de confort térmico consiste en dos ecuaciones que delimitan la zona de confort. Una ecuación define las temperaturas máximas de confort y la otra las temperaturas mínimas de confort de la zona.

Estas ecuaciones están basadas en la ecuación del modelo adaptativo de Nicol [3] para la temperatura interior del aire. A éstas se han incorporado los términos que consideran la influencia de la temperatura radiante y de los diferentes factores y parámetros del modelo. Las ecuaciones básicas para los límites inferior y superior de la zona de confort son las siguientes:

**$T_{ls}$  = Temperatura del límite superior:**

$$T_{ls} = 24,0 + 0,20(T_{mmo} - 22) \cdot e^{\left[ -\left( \frac{T_{mmo} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]}$$

**$T_{li}$  = Temperatura del límite inferior:**

$$T_{li} = 20,0 + 0,18(T_{mmo} - 22) \cdot e^{\left[ -\left( \frac{T_{mmo} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]}$$

En donde:

**$T_{mmo}$**  es la temperatura exterior del aire horaria media mensual.

Y las ecuaciones para definir el límite superior e inferior de la zona variable de confort térmico que incorporan todas las variables del modelo son las siguientes:

**Ecuación Total Temperatura Límite Superior:  $Ttls$**

$$Ttls = 24,0 + 0,2 \cdot (Tmmo - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{Tmmo - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]} - \left( \frac{Tr - Tls}{2} \right) - Fva \pm F_{adap} \pm F_{contv} \pm F_{sexo} + F_{edad} - F_{clomet} \pm F_{ht} - F_{tp} \pm F_{exp}$$

**Ecuación Total Temperatura Límite Superior:  $Ttli$**

$$Ttli = 20,0 + 0,18 \cdot (Tmmo - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{Tmmo - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]} - \left( \frac{Tr - Tls}{2} \right) - Fva \pm F_{adap} \pm F_{contv} \pm F_{sexo} + F_{edad} - F_{clomet} \pm F_{ht} - F_{tp} \pm F_{exp}$$

en donde:

**$Tls$**  = Temperatura del límite superior:

$$Tls = 24,0 + 0,20(Tmmo - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{Tmmo - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]}$$

**$Tli$**  = Temperatura del límite inferior:

$$Tli = 20,0 + 0,18(Tmmo - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{Tmmo - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]}$$

**$Tmmo$**  = Temperatura mensual media horaria exterior:

**$Tr$**  = Temperatura radiante media:

$$te = x \cdot ta + (1 - x) \cdot tr$$

en donde:

$X = 0,5$  peso de  $tr$

$te$  = temperatura efectiva

$ta$  = temperatura del aire

$tr$  = temperatura media radiante

**$Fva$  = Velocidad del aire:**

$$Fva = Va \cdot 3,6363$$

**$Fadap$  = Factor de adaptabilidad:**

Entre  $-1$  y  $1^\circ\text{C}$

**$Fcontv$  = Factor de contacto visual:**

Entre  $0$  y  $2^\circ\text{C}$

**$Fsexo$  = Factor de sexo:**

$0,5^\circ\text{C}$  para introducir la variante del sexo

$$Fsexo = \%m / 200 \quad \text{en donde: } \%m = \text{porcentaje de mujeres}$$

**$Fedad$  = Factor de edad:**

$$F_{edad} = edad \times 0,025$$

**$Fclomet$  = Factor de vestimenta y nivel de actividad (clo, met):**

$$F_{clomet} = Tmmo - (Tmmo - clo \cdot 0,06 \cdot (met \times f_{cons}) - 0,018 \cdot (met \times f_{cons}))$$

En donde:

$Fclomet$ = factor de vestimenta y nivel de actividad (clo, met)

$Tmmo$ = temperatura mensual media horaria exterior

$clo$ = capacidad aislante de la vestimenta (en clo)

$met$ = nivel de actividad (en met)

$fcons$ = factor de constitución corporal

**Factor de constitución corporal:**

$$f_{cons} = \frac{(0,202 \times M^{0,425} \cdot H^{0,725})}{1,72}$$

En donde:

- $f_{cons}$ = factor de constitución corporal
- $M$ = masa del sujeto tipo (en kilogramos)
- $H$ = estatura del sujeto tipo (en metros)

**$F_{ht}$  = Factor de historial térmico:**

Entre -3 y 3

**$F_{tp}$  = Factor de tiempo de permanencia:**

$$Acl = \ln(480 - t) / \ln(21,5)$$

**$F_{exp}$  = Factor de expectativas de confort:**

Entre 0 y 2

**Humedad Relativa:**

Para la humedad relativa se han asignado un rango de valores para cada temperatura de los límites de la zona de confort basados en la gráfica de confort de Fanger [20], aplicando las siguientes expresiones:

| Límite Inferior:    | Límite Superior:    |
|---------------------|---------------------|
| SI Ta >=19 HR = 25  | SI Ta >=30 HR = 45  |
| SI Ta >=18 HR = 43  | SI Ta >=29 HR = 45  |
| SI Ta >=17 HR = 49  | SI Ta >=28 HR = 47  |
| SI Ta >=16 HR = 55  | SI Ta >=27 HR = 50  |
| SI Ta >=15 HR = 60  | SI Ta >=26 HR = 53  |
| SI Ta >=14 HR = 65  | SI Ta >=25 HR = 57  |
| SI Ta >=-20 HR = 65 | SI Ta >=24 HR = 60  |
|                     | SI Ta >=-20 HR = 75 |

En donde:

- Ta = Temperatura del aire
- HR = Humedad Relativa

## 6.2. Ejemplo.

Ahora se planteará un ejemplo en el que se calculará la zona de confort para condiciones y usuarios determinados. Este ejemplo se calculará con los siguientes datos:

| <i>T<sub>mmo</sub></i> =    | Temperatura mensual media horaria exterior   |                                |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
|-----------------------------|--|--------------------------------|---------------------|----|---------------------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|---|------|----|------|----|------|----|------|----|------|----|------|--|
|                             | <table border="1"> <thead> <tr> <th>hr</th> <th>T<sub>mmo</sub> °C</th> <th>hr</th> <th>T<sub>mmo</sub> °C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>24,4</td><td>12</td><td>30,6</td></tr> <tr><td>1</td><td>24,0</td><td>13</td><td>31,3</td></tr> <tr><td>2</td><td>23,6</td><td>14</td><td>32,0</td></tr> <tr><td>3</td><td>23,3</td><td>15</td><td>31,6</td></tr> <tr><td>4</td><td>23,0</td><td>16</td><td>31,2</td></tr> <tr><td>5</td><td>22,7</td><td>17</td><td>30,2</td></tr> <tr><td>6</td><td>22,4</td><td>18</td><td>29,0</td></tr> <tr><td>7</td><td>22,8</td><td>19</td><td>27,8</td></tr> <tr><td>8</td><td>23,3</td><td>20</td><td>26,5</td></tr> <tr><td>9</td><td>24,9</td><td>21</td><td>26,0</td></tr> <tr><td>10</td><td>27,9</td><td>22</td><td>25,3</td></tr> <tr><td>11</td><td>29,6</td><td>23</td><td>24,8</td></tr> </tbody> </table> | hr                             | T <sub>mmo</sub> °C | hr | T <sub>mmo</sub> °C | 0 | 24,4 | 12 | 30,6 | 1 | 24,0 | 13 | 31,3 | 2 | 23,6 | 14 | 32,0 | 3 | 23,3 | 15 | 31,6 | 4 | 23,0 | 16 | 31,2 | 5 | 22,7 | 17 | 30,2 | 6 | 22,4 | 18 | 29,0 | 7 | 22,8 | 19 | 27,8 | 8 | 23,3 | 20 | 26,5 | 9 | 24,9 | 21 | 26,0 | 10 | 27,9 | 22 | 25,3 | 11 | 29,6 | 23 | 24,8 |  |
| hr                          | T <sub>mmo</sub> °C  | hr                             | T <sub>mmo</sub> °C |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 0                           | 24,4   | 12                             | 30,6                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 1                           | 24,0   | 13                             | 31,3                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 2                           | 23,6   | 14                             | 32,0                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 3                           | 23,3   | 15                             | 31,6                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 4                           | 23,0   | 16                             | 31,2                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 5                           | 22,7   | 17                             | 30,2                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 6                           | 22,4   | 18                             | 29,0                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 7                           | 22,8   | 19                             | 27,8                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 8                           | 23,3   | 20                             | 26,5                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 9                           | 24,9   | 21                             | 26,0                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 10                          | 27,9   | 22                             | 25,3                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| 11                          | 29,6   | 23                             | 24,8                |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| <i>V<sub>a</sub></i> =      | Velocidad del aire:  | 0,4 m/s                        |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
|                             | $F_{va} = 0,4 \cdot 3,6363$ $F_{va} = -1,45$ °C  |                                |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| <i>F<sub>sexo</sub></i> =   | Factor de sexo:  | 45 % mujeres                   |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
|                             | $F_{sexo} = 45 / 200$ $F_{sexo} = 0,225$ °C  |                                |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| <i>F<sub>edad</sub></i> =   | Factor de edad:  | 21 años                        |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
|                             | $F_{edad} = 21 \times 0,025$ $F_{edad} = 0,525$ °C   |                                |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| <i>F<sub>cons</sub></i> =   | Factor de constitución corporal:   | Peso 65 Kg.<br>Estatura 1,70 m |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
|                             | $f_{cons} = \frac{(0,202 \times 65^{0,425} \cdot 1,7^{0,725})}{1,72}$ $f_{cons} = 1,017$   |                                |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |
| <i>F<sub>clomet</sub></i> = | Factor de vestimenta y nivel de actividad (clo, met):  | clo 0,95 / met 1,5             |                     |    |                     |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |   |      |    |      |    |      |    |      |    |      |    |      |  |

|               |  |                   |
|---------------|--|-------------------|
|               | $F_{clomet} = T_{mmo} - (T_{mmo} - 0,95 \cdot 0,06 \cdot (1,5 \times 1,017) - 0,018 \cdot (1,5 \times 1,017))$ |                   |
| $F_{ht} =$    | Factor de historial térmico:   | 0,1               |
|               | $F_{ht} = 0,1^\circ C$   |                   |
| $F_{tp} =$    | Factor de tiempo de permanencia:   | 3,5 hrs = 210 min |
|               | $Acl = \ln(480 - 210) / \ln(21,5) \quad F_{tp} = 1,82^\circ C$   |                   |
| $F_{adap}$    | Factor de adaptabilidad:   | 0,25              |
|               | $F_{adap} = 0,25^\circ C$  |                   |
| $F_{contv} =$ | Factor de contacto visual:   | 0,25              |
|               | $F_{contv} = 0,25^\circ C$   |                   |
| $F_{exp} =$   | Factor de expectativas de confort:   | 0                 |
|               | $F_{exp} = 0^\circ C$  |                   |
| $Tr =$        | Temperatura radiante media   | 21,8 °C           |

Por lo tendríamos para los límites de la zona de confort:

**Límite superior:**

$$T_{tls} = 24,0 + 0,2 \cdot (T_{mmo} - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{T_{mmo} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]} - \left( \frac{21,8 - T_{ls}}{2} \right)$$

$$-1,45 \pm 0,25 \pm 0,25 \pm 0,225 + 0,525 - F_{clomet} \pm 0,1 - 1,82 \pm 0$$

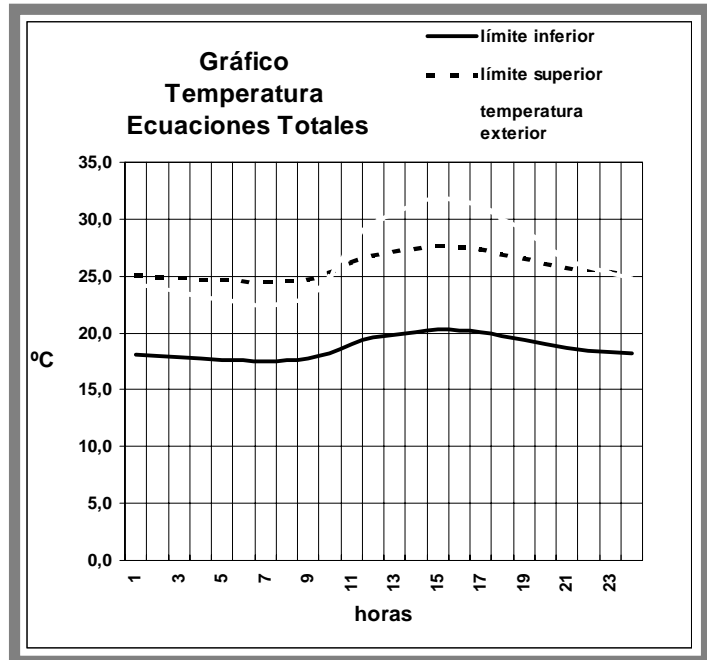
**Límite inferior:**

$$T_{tli} = 20,0 + 0,18 \cdot (T_{mmo} - 22) \cdot e^{\left[ \left( \frac{T_{mmo} - 22}{24\sqrt{2}} \right)^2 \right]} - \left( \frac{21,8 - T_{ls}}{2} \right)$$

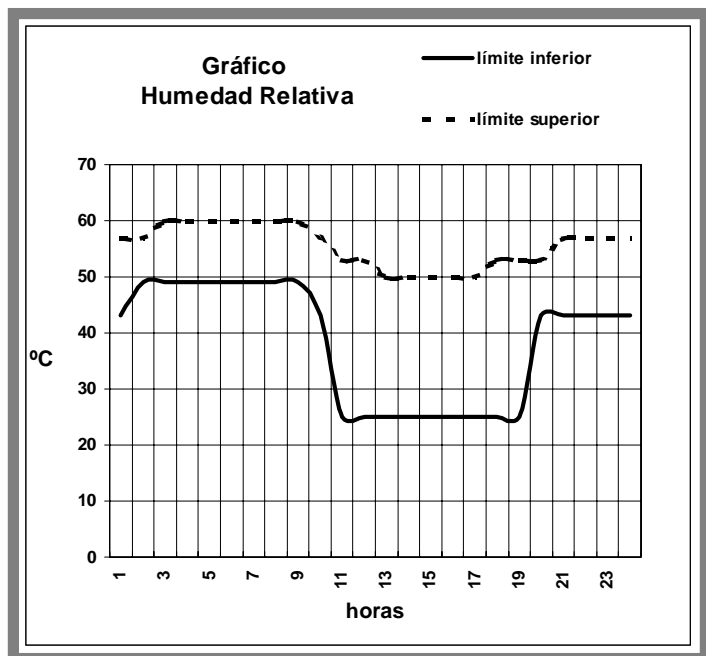
$$-1,45 \pm 0,25 \pm 0,25 \pm 0,225 + 0,525 - F_{clomet} \pm 0,1 - 1,82 \pm 0$$

Calculando la temperatura de confort para cada hora tendríamos los siguientes resultados:

| Tabla de temperaturas de los límites de la zona de confort |          |          |
|--|----------|----------|
| Límites  | inferior | superior |
| Hora   | -        | +        |
| 0  | 18,6     | 25,7     |
| 1  | 18,5     | 25,6     |
| 2  | 18,4     | 25,5     |
| 3  | 18,3     | 25,4     |
| 4  | 18,2     | 25,3     |
| 5  | 18,2     | 25,2     |
| 6  | 18,1     | 25,1     |
| 7  | 18,2     | 25,2     |
| 8  | 18,3     | 25,4     |
| 9  | 18,8     | 25,8     |
| 10   | 19,6     | 26,8     |
| 11   | 20,1     | 27,4     |
| 12   | 20,4     | 27,7     |
| 13   | 20,7     | 28,0     |
| 14   | 20,9     | 28,2     |
| 15   | 20,8     | 28,1     |
| 16   | 20,7     | 28,0     |
| 17   | 20,3     | 27,6     |
| 18   | 20,0     | 27,2     |
| 19   | 19,6     | 26,8     |
| 20   | 19,2     | 26,4     |
| 21   | 19,1     | 26,2     |
| 22   | 18,9     | 26,0     |
| 23   | 18,7     | 25,8     |



| Humedad relativa de los límites de la zona de confort |          |          |
|---|----------|----------|
| Límites   | inferior | superior |
| Hora  | HR -     | HR +     |
| 0   | 43       | 57       |
| 1   | 43       | 57       |
| 2   | 43       | 57       |
| 3   | 43       | 57       |
| 4   | 43       | 57       |
| 5   | 43       | 57       |
| 6   | 43       | 57       |
| 7   | 43       | 57       |
| 8   | 43       | 57       |
| 9   | 43       | 57       |
| 10  | 25       | 53       |
| 11  | 25       | 50       |
| 12  | 25       | 50       |
| 13  | 25       | 50       |
| 14  | 25       | 47       |
| 15  | 25       | 47       |
| 16  | 25       | 50       |
| 17  | 25       | 50       |
| 18  | 25       | 50       |
| 19  | 25       | 53       |
| 20  | 25       | 53       |
| 21  | 25       | 53       |
| 22  | 43       | 57       |
| 23  | 43       | 57       |





## 6.2. Comentario General.

Como se puede ver, las ecuaciones finales que definirán los límites de la zona de confort en este modelo son básicamente las ecuaciones de la temperatura que tomará en cuenta la temperatura exterior e introduciendo los valores del resto de los parámetros y factores, ya sea mediante otras ecuaciones o escalas empíricas.

Para cada una de las variables se han asignado diferentes valores, parte de los cuales son valores empíricos que tendrán que comprobarse y ajustarse en estudios posteriores para lograr una fiabilidad más alta de este modelo de confort térmico.