

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA CULTIVOS IN VITRO CON  
AMBIENTE CONTROLADO**

**SANDRA MILENA JURADO MUÑOZ  
VICTORIA EUGENIA ERAZO MACA**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
POPAYÁN  
2006**

**DISEÑO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA CULTIVOS IN VITRO CON  
AMBIENTE CONTROLADO**

**SANDRA MILENA JURADO MUÑOZ  
VICTORIA EUGENIA ERAZO MACA**

**Trabajo de Grado**

**Presentado para optar al título de Ingeniera en Automática Industrial**

**Director: Ing. José Rafael Díaz**

**UNIVERSIDAD DEL CAUCA  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES  
DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA, INSTRUMENTACIÓN Y CONTROL  
POPAYÁN**

**2006**

## **AGRADECIMIENTOS**

A la Universidad del Cauca, Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones, Departamento de Electrónica, Instrumentación y Control, Programa de Ingeniería en Automática Industrial; al Ingeniero José Rafael Díaz Chávez director de este trabajo de grado quien con su experiencia y sus constantes aportes fue factor de constante motivación y certera guía en el desarrollo del proyecto.

A la facultad de Ciencias Agropecuarias, especialmente al Ingeniero Juan Miguel Villa Latorre cuya disposición y apoyo hicieron posible el trabajo conjunto entre las dos facultades; a los asesores: Ingeniero José Luís Hoyos y Magíster Martha Almaza quienes compartieron su conocimiento y experiencia en el área de Biotecnología.

Al ingeniero Jean Alejandro Cubillos Rojas por su constante acompañamiento y sus valiosos aportes y al Ingeniero Fabio Antonio Ocampo Muñoz por sus enseñanzas, su gran amistad y apoyo.

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo con gran amor a mi familia Uriel, Laura y Anny quienes han acompañado todo el proceso de mi formación personal y profesional de manera incondicional siendo fuente de amor, motivación y enseñanzas de vida.

Este es un logro alcanzado gracias a los aportes de todas las personas que hacen parte de mi vida, especialmente a Jean Alejandro Cubillos y los miembros de las familias Muñoz y Jurado.

**Sandra Milena**

Con gran afecto a mi familia, especialmente a mis padres quienes me han brindado su cariño, comprensión y apoyo constante, permitiéndome obtener un logro más en mi proceso de formación.

**Victoria Eugenia**

## CONTENIDO

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>INTRODUCCIÓN</b>   | <b>19</b>   |
| <b>1. ESPECIFICACIONES DEL LABORATORIO DE BIOTECNOLOGÍA<br/>CON AMBIENTE CONTROLADO</b> | <b>21</b>   |
| <b>1.1 DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA DEL EDIFICIO Y DE LOS<br/>LOCALES CONTROLADOS</b>     | <b>22</b>   |
| <b>1.2 DEFINICIÓN DEL ENTORNO FÍSICO DEL EDIFICIO</b>                                   | <b>29</b>   |
| <b>1.3 CONDICIONES INTERIORES DEL LABORATORIO</b>                                       | <b>30</b>   |
| <b>1.3.1 Sistema de almacenamiento de productos</b>                                     | <b>31</b>   |
| <b>1.3.2 Número de ocupantes</b>  | <b>33</b>   |
| <b>1.3.3 Iluminación</b>  | <b>33</b>   |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1.3.4 Equipos</b>   | <b>34</b> |
| <b>2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA</b>   | <b>35</b> |
| <b>2.1 ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DE LAS SECCIONES CLIMÁTICAS RESPECTO A LAS CONDICIONES DE DISEÑO</b> | <b>36</b> |
| <b>2.1.1 Sección climática fría</b>  | <b>36</b> |
| <b>2.1.2 Sección climática templada</b>  | <b>37</b> |
| <b>2.1.3 Sección climática cálida</b>  | <b>37</b> |
| <b>2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN</b>  | <b>38</b> |
| <b>2.2.1 Sistemas de calefacción</b>   | <b>39</b> |
| <b>2.2.2 Sistemas de aire acondicionado</b>  | <b>40</b> |
| <b>2.3 ELECCIÓN DEL SISTEMA MÁS CONVENIENTE FRENTE A LAS CONDICIONES DE DISEÑO</b>                         | <b>41</b> |
| <b>2.4 CALCULO DE LA POTENCIA DEL EQUIPO DE CLIMATIZACIÓN</b>  | <b>44</b> |

|              |   |           |
|--------------|---|-----------|
| <b>2.4.1</b> | <b>Elección del porcentaje de renovación del aire</b>                                   | <b>44</b> |
| <b>2.4.2</b> | <b>Cálculo de la temperatura de impulsión</b>   | <b>45</b> |
| <b>2.4.3</b> | <b>Cálculo del aire de impulsión y volumen de recirculación</b>                         | <b>47</b> |
| <b>2.4.4</b> | <b>Cálculo de los coeficientes de performance (COP) y energy efficiency ratio (EER)</b> | <b>50</b> |
| <b>2.4.5</b> | <b>Cálculo de la potencia del equipo</b>  | <b>52</b> |
| <b>2.5</b>   | <b>CONSIDERACIONES SOBRE PARTES CONSTITUTIVAS, ACCESORIOS Y OTROS</b>                   | <b>54</b> |
| <b>2.6</b>   | <b>PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA</b>                              | <b>63</b> |
| <b>2.7</b>   | <b>ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA</b>                                    | <b>65</b> |
| <b>3.</b>    | <b>DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN</b>                                     | <b>66</b> |
| <b>3.1</b>   | <b>ELECCIÓN DEL TIPO DE LÁMPARAS A UTILIZAR</b>   | <b>66</b> |
| <b>3.1.1</b> | <b>Opciones de control de cantidad de luz</b>   | <b>70</b> |

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 3.1.2 | Selección del tipo de luz                                | 71 |
| 3.2   | PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN      | 82 |
| 3.2.1 | Rediseño del sistema de almacenamiento                   | 82 |
| 3.2.2 | Emplazamiento o distribución de las lámparas             | 83 |
| 3.2.3 | Diseño del sistema de control de cantidad de luz         | 83 |
| 3.2.4 | Configuración para mejorar la distribución de la luz     | 88 |
| 3.2.5 | Diseño del sistema de control de fotoperíodos            | 88 |
| 3.2.6 | Selección de equipos y dispositivos                      | 90 |
| 3.3   | ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN POR BLOQUE | 94 |
| 3.4   | PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN      | 96 |
| 4.    | DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD                 | 98 |



|              |  |            |
|--------------|--|------------|
| <b>4.1</b>   | <b>CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO DEL SISTEMA DE HUMEDAD</b> | <b>99</b>  |
| <b>4.2</b>   | <b>ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE HUMEDAD</b>          | <b>100</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE HUMIDIFICACION</b>               | <b>103</b> |
| <b>4.3.1</b> | <b>Sistemas de humidificación Adiabáticos</b>                      | <b>103</b> |
| <b>4.3.2</b> | <b>Sistemas de humidificación Isotérmicos</b>                      | <b>104</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESHUMIDIFICACION</b>            | <b>106</b> |
| <b>4.4.1</b> | <b>Sistema de deshumidificación por desecante</b>                  | <b>106</b> |
| <b>4.5</b>   | <b>PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD</b>             | <b>108</b> |
| <b>4.5.1</b> | <b>Selección del equipo humidificador</b>                          | <b>108</b> |
| <b>4.5.2</b> | <b>Selección del equipo deshumidificador</b>                       | <b>108</b> |
| <b>4.5.3</b> | <b>Consideraciones sobre los equipos seleccionados</b>             | <b>111</b> |

**4.6 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD 120**

**5. CONCLUSIONES 121**

**BIBLIOGRAFIA 123**

**ANEXO A. Laboratorios de Biotecnología y cultivos in Vitro**

**ANEXO B. Cálculo de pérdidas y cargas de calor en  
Condiciones críticas**

**ANEXO C. Refrigerantes ecológicos**

**ANEXO D. Cálculo de las pérdidas y cargas de vapor de agua**

**ANEXO E. Herramienta gráfica para el cálculo de pérdidas de  
carga en conductos**

**ANEXO F. Sistema bomba de calor**

## LISTA DE FIGURAS

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Figura 1.1</b> <b>Dimensión mínima cámara de aire</b>                      | <b>25</b>   |
| <b>Figura 1.2</b> <b>Propuesta construcción de cámaras de aire</b>            | <b>25</b>   |
| <b>Figura 1.3</b> <b>Distribución del laboratorio</b>                         | <b>29</b>   |
| <b>Figura 1.4</b> <b>Distribución de estantes y corredores</b>                | <b>32</b>   |
| <b>Figura 1.5</b> <b>Área útil de Peldaño de estantes</b>                     | <b>33</b>   |
| <b>Figura 2.1</b> <b>Clasificación general de los sistemas de calefacción</b> | <b>39</b>   |
| <b>Figura 2.2</b> <b>Esquema de sistema de calefacción central</b>            | <b>39</b>   |
| <b>Figura 2.3</b> <b>Ciclo de evolución del aire</b>                          | <b>44</b>   |
| <b>Figura 2.4</b> <b>Ejemplo de cálculo de temperatura de rocío</b>           | <b>48</b>   |

|                   |   |           |
|-------------------|---|-----------|
| <b>Figura 2.5</b> | <b>Vista superior del sistema de suministros y retorno</b>  | <b>58</b> |
| <b>Figura 2.6</b> | <b>Esquema del sistema de control de temperatura</b>  | <b>65</b> |
| <b>Figura 3.1</b> | <b>Área útil a controlar o peldaño de un bloque</b>   | <b>75</b> |
| <b>Figura 3.2</b> | <b>Uso de tubos comerciales para diferentes opciones de áreas</b>   | <b>76</b> |
| <b>Figura 3.3</b> | <b>Cálculo del índice del local k</b>   | <b>78</b> |
| <b>Figura 3.4</b> | <b>Emplazamiento o distribución de las lámparas</b>   | <b>83</b> |
| <b>Figura 3.5</b> | <b>Posible configuración de encendido de lámparas</b>   | <b>88</b> |
| <b>Figura 3.6</b> | <b>GRAFSET para el sistema de control de iluminación</b>  | <b>93</b> |
| <b>Figura 3.7</b> | <b>Esquema de ubicación del tablero perforado y dispositivos en un bloque</b>                               | <b>94</b> |
| <b>Figura 3.8</b> | <b>Esquema de conexión del PLC, relés y balastos para el sistema de control de iluminación de un bloque</b> | <b>95</b> |
| <b>Figura 3.9</b> | <b>Esquema de conexión de un peldaño</b>  | <b>95</b> |

|                   |  |            |
|-------------------|--|------------|
| <b>Figura 4.1</b> | <b>Calefacción Vs. %HR en el gráfico sicrométrico</b>                                  | <b>100</b> |
| <b>Figura 4.2</b> | <b>Refrigeración Vs. %HR, antes del punto de saturación</b>                            | <b>101</b> |
| <b>Figura 4.3</b> | <b>Refrigeración Vs. %HR, después del punto de saturación</b>                          | <b>102</b> |
| <b>Figura 4.4</b> | <b>Principio de operación de la rueda desecante</b>                                    | <b>107</b> |
| <b>Figura 4.5</b> | <b>Variación de humedad absoluta para mantener el %HR ante procesos de calefacción</b> | <b>115</b> |
| <b>Figura 4.6</b> | <b>Esquema del Sistema de Control de Humedad. Vista superior</b>                       | <b>120</b> |

## LISTA DE TABLAS

|   | <b>pág.</b> |
|---|-------------|
| <b>Tabla 1.1 Dimensiones del laboratorio</b>                                    | <b>26</b>   |
| <b>Tabla 1.2 Materiales de construcción</b>                                     | <b>28</b>   |
| <b>Tabla 1.3 Condiciones de temperatura, humedad, iluminación y ventilación</b> | <b>30</b>   |
| <b>Tabla 2.1 Aire por persona y renovaciones de aire recomendadas</b>           | <b>45</b>   |
| <b>Tabla 2.2 Temperaturas en el sistema de refrigeración</b>                    | <b>46</b>   |
| <b>Tabla 2.3 Temperaturas en el sistema de calefacción</b>                      | <b>46</b>   |
| <b>Tabla 2.4 Cálculo de los valores de factor de calor sensible</b>             | <b>48</b>   |
| <b>Tabla 2.5 Cálculo del caudal de impulsión</b>                                | <b>49</b>   |
| <b>Tabla 2.6 Cálculo del caudal de recirculación</b>                            | <b>49</b>   |

|                  |  |           |
|------------------|--|-----------|
| <b>Tabla 2.7</b> | <b>Coeficientes de desempeño COP</b>   | <b>52</b> |
| <b>Tabla 2.8</b> | <b>Coeficientes de desempeño EER</b>   | <b>52</b> |
| <b>Tabla 2.9</b> | <b>Toneladas de Refrigerante por Sección</b>                                 | <b>54</b> |
| <b>Tabla 3.1</b> | <b>Comparación entre algunas características de las lámparas</b>             | <b>68</b> |
| <b>Tabla 3.2</b> | <b>Información técnica de diferentes tipos de lámparas<br/>Fluorescentes</b> | <b>73</b> |
| <b>Tabla 3.3</b> | <b>Posibles áreas útiles a analizar para el control de<br/>Iluminación</b>   | <b>75</b> |
| <b>Tabla 3.4</b> | <b>Factores de utilización</b>   | <b>77</b> |
| <b>Tabla 3.5</b> | <b>Coeficientes de reflexión de techo paredes y suelo</b>                    | <b>78</b> |
| <b>Tabla 3.6</b> | <b>Factor de mantenimiento</b>   | <b>79</b> |
| <b>Tabla 3.7</b> | <b>Índices del local para diferentes áreas</b>                               | <b>79</b> |
| <b>Tabla 3.8</b> | <b>Factores de utilización para diferentes áreas</b>                         | <b>80</b> |

|                   |   |            |
|-------------------|---|------------|
| <b>Tabla 3.9</b>  | <b>Cálculo del número de lámparas para diferentes áreas y tipos de luz</b>                        | <b>81</b>  |
| <b>Tabla 3.10</b> | <b>Señales de entrada del PLC para las diferentes referencias de cantidad de luz de un bloque</b> | <b>86</b>  |
| <b>Tabla 3.11</b> | <b>Señales de salida del PLC para la activación de los relés</b>                                  | <b>87</b>  |
| <b>Tabla 3.12</b> | <b>Combinaciones de señales de salida para obtener los puntos de control de cantidad de luz</b>   | <b>87</b>  |
| <b>Tabla 3.13</b> | <b>Señales de entrada del PLC para las diferentes referencias de fotoperíodos de un bloque</b>    | <b>89</b>  |
| <b>Tabla 4.1</b>  | <b>Comparación de un sistema de aire acondicionado y un sistema con desecantes</b>                | <b>110</b> |
| <b>Tabla 4.2</b>  | <b>Cálculo de la capacidad de los equipos de control de humedad</b>                               | <b>112</b> |



## GLOSARIO

**AIRE DE EXTRACCIÓN:** aire, normalmente viciado, que se expulsa al exterior.

**AIRE DE IMPULSIÓN:** aire que se introduce en los espacios acondicionados.

**AIRE DE RECIRCULACIÓN:** aire de retorno que se vuelve a introducir en los espacios acondicionados.

**AIRE DE RETORNO:** aire procedente de los espacios acondicionados. El aire de retorno estará constituido por el aire de recirculación y, eventualmente, por el aire de expulsión.

**AIRE EXTERIOR:** aire del ambiente exterior que se introduce en el circuito de climatización.

**AISLANTE TÉRMICO:** es todo material que posee un bajo coeficiente de conductividad térmica.

**BOMBA DE CALOR:** máquina térmica que permite transferir calor de una fuente fría a otra más caliente, en calefacción o refrigeración.

**BTU (British Thermal Unit):** es la cantidad de calor para elevar en un grado Fahrenheit una libra de agua (de 59°F a 60°F ). Equivalencias: 1/4 Caloría = 1BTU.

**CALOR ESPECÍFICO:** cantidad de calor que es necesario suministrar a la unidad de masa de un cuerpo para elevar un grado su temperatura.

**CALOR LATENTE:** cantidad de calor que cede o absorbe un cuerpo al cambiar de estado.

**CALOR SENSIBLE:** cantidad de calor que cede o absorbe un cuerpo sin cambiar de estado.

**CALORÍA:** una caloría-gramo es la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1° C la temperatura de 1 gramo de agua.

**CLIMATIZACIÓN:** proceso de tratamiento de aire que se efectúa a lo largo de todo el año, controlando, en los espacios interiores, temperatura, humedad, pureza y velocidad del aire.

**COEFICIENTE DE EFICIENCIA ENERGÉTICA, EER:** cociente entre la potencia térmica total útil y la potencia total absorbida, para unas condiciones de funcionamiento determinadas.

**COEFICIENTE DE DESEMPEÑO DE UN SISTEMA, COP:** relación entre la energía térmica cedida por el sistema y la energía de tipo convencional absorbida.

**COEFICIENTE DE TRANSMISIÓN DE CALOR:** cantidad de calor que atraviesa la unidad de superficie en la unidad de tiempo, cuando se establece entre las caras paralelas del cerramiento una diferencia de temperatura de un grado.

**COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSMISIÓN (U):** media ponderada de los coeficientes de transmisión de cada uno de los elementos de separación del edificio con el exterior.

**CONTROLADOR:** dispositivo que se utiliza para establecer o programar el funcionamiento de los aparatos o sistemas de control.

**CONTROL PROPORCIONAL:** Acción de un dispositivo de control que modifica la actuación del elemento regulador proporcionalmente a la desviación entre la magnitud medida y el punto de referencia.

**CONTROL PROPORCIONAL INTEGRAL:** acción capaz de hacer que la variable controlada sea igual a la referencia, con una señal de error de 0, eliminando la principal desventaja del control proporcional.

**CONTROL PRPORCIONAL INTEGRAL DERIVATIVO:** provee una respuesta rápida gracias a la acción derivativa que anticipa la salida del controlador y la acción integral hace el error cero. Ofrece un excelente control cuando esta bien sintonizado.

**EVAPORACIÓN:** cambio de fase del agua de un estado líquido a gaseoso por absorción de calor.

**FLUIDO PRIMARIO:** en un intercambiador de calor, el fluido que aporta la energía térmica de intercambio.

**FLUIDO SECUNDARIO:** en un intercambiador de calor, el fluido que recibe la energía térmica de intercambio.

**FLUIDO TÉRMICO:** medio canalizado encargado de transportar la energía en un sistema de climatización.

**HIGROSCOPICIDAD (de higroscópico):** propiedad de algunas sustancias de absorber y exhalar la humedad según el medio en que se encuentran

**HIGRÓMETRO:** aparato para medir la humedad relativa del aire.

**HUMEDAD ABSOLUTA:** en un sistema de aire húmedo, es la razón de la masa del vapor de agua respecto al volumen total del sistema.

**HUMEDAD ESPECÍFICA:** relación entre la masa de vapor de agua y la masa del aire húmedo.

**HUMEDAD RELATIVA:** tipo de humedad que se basa en el cociente entre la presión actual del vapor del aire y la saturación de la presión del vapor. Usualmente se expresa en porcentajes.

**INFILTRACIÓN:** caudal de aire que penetra en un local desde el exterior, de forma incontrolada por puertas y ventanas.

**INSTALACIÓN CENTRALIZADA:** instalación de climatización que dispone de un generador de calor o frío y un sistema de distribución del mismo a las diferentes unidades de consumo.

**INSTALACIÓN INDIVIDUAL:** instalación de climatización que dispone de un generador de calor o frío y un sistema de distribución del mismo a las diferentes dependencias que componen la única unidad de consumo.

**INSTALACIÓN DE BAJA VELOCIDAD:** técnica de distribución del aire que se realiza a una velocidad suficientemente baja para no necesitar dispositivos reductores de presión y ruido.

**PÉRDIDA DE CARGA:** caída de presión en un fluido desde un punto de una tubería o conducto a otro, debido a pérdidas por rozamiento.

**PÉRDIDAS POR TRANSMISIÓN:** cantidad de calor que se pierde a través de los cerramientos exteriores.

**PUNTO DE REFERENCIA:** valor de una magnitud controlada al que se ajusta el dispositivo de control para que lo mantenga.

**RED DE DISTRIBUCIÓN:** conjunto de circuitos que canalizan el fluido térmico desde la sala de máquinas hasta las unidades terminales, incluyendo las redes de impulsión y retorno.

**RENOVACIONES:** relación entre el caudal de aire exterior impulsado al espacio climatizado y el volumen de éste. También, número de veces que se realiza el proceso.

**SATURACIÓN:** condición del aire que se presenta cuando la cantidad de vapor de agua que contiene es el máximo posible para la temperatura existente.

**SECCIÓN:** zona o espacio climatizado cuya carga térmica varía en forma distinta a la de otros espacios.

**TEMPERATURA DE IMPULSIÓN:** la temperatura de diseño del fluido transmisor de la energía térmica a la salida de la red de distribución.

**TEMPERATURA EXTERIOR DE CÁLCULO:** temperatura, que se fija en el exterior de la construcción considerando la orientación, el color, la fecha, entre otros, para hacer el cálculo de pérdidas o cargas de calor.

**TEMPERATURA INTERIOR DE CÁLCULO:** temperatura, que se fija en el interior para hacer el cálculo de pérdidas o cargas de calor, prevista en el proyecto como condiciones normales de funcionamiento.

**TONELADA DE REFRIGERANTE:** es el calor que absorbe una tonelada de hielo al derretirse en 24 horas. Equivalencias: 1Ton = 12.000 BTU

## RESUMEN

El diseño de los sistemas de control de Temperatura, Humedad e Iluminación, para el área de incubación del Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, partió de la definición de los requerimientos y especificaciones a tener en cuenta en la construcción de la planta física donde se van a implementar los sistemas de control. En este aspecto, se realizaron consideraciones importantes en cuanto a materiales de construcción, aislamiento de las condiciones exteriores, adecuación del ambiente interior, distribución de los espacios, entre otras. Además se estableció la construcción de tres secciones, que permitan la simulación de tres ambientes climáticos independientes.

Posteriormente se realizó el diseño del sistema de control de Temperatura. Para este diseño se analizó el comportamiento de la variable en cada una de las secciones, se estudiaron los diferentes sistemas de climatización, se definieron los criterios de selección y se eligió el equipo necesario para el control de temperatura, argumentando las razones por las cuales se eligió el equipo. Se realizó el cálculo de la potencia requerida por el equipo, su capacidad y otras características y especificaciones técnicas, considerando especialmente el cálculo de las pérdidas y cargas térmicas que debía soportar. Finalmente, se presenta un esquema de distribución de los equipos y dispositivos del sistema de control de temperatura.

Para el sistema de control de Iluminación, se establecen como requerimientos la necesidad de controlar la cantidad de luz y el tiempo de iluminación en los

estantes de almacenamiento de los cultivos. Para este diseño, fue necesario como primera medida realizar la selección del tipo de luz a utilizar, eligiendo así un tipo de luz que favoreciera el crecimiento de las plantas y no generará demasiada carga térmica al sistema de control de temperatura. Además, se realizaron los cálculos del número de lámparas necesarias para cubrir un rango de iluminación de 2000 a 7000 luxes con varias referencias de lámparas comerciales. Se establecieron dos métodos a través de los cuales controlar la cantidad de luz, y se trabajó la opción más razonable en cuanto a costos. Se determinó controlar la cantidad de luz a través del encendido de determinado número de lámparas para cada punto de control y se realizaron consideraciones para obtener la mejor distribución de luz posible. Se seleccionaron los elementos y las técnicas de control para obtener diferentes valores de cantidad de luz y tiempo de iluminación, en cada uno de los bloques (2 estantes) de almacenamiento. Finalmente, se establecen las especificaciones de los elementos seleccionados, y se presentan los esquemas de conexión para implementar el sistema de control de iluminación.

Para controlar la humedad, primero se estudió esta variable y su interacción con la variable temperatura, se realizó una predicción del comportamiento de la variable humedad, en cada una de las secciones climáticas, frente a cambios en la variable temperatura, con lo que se establecieron los requerimientos para controlar el porcentaje de humedad relativa en un valor constante, independientemente del valor de temperatura. Se presentan las opciones y equipos existentes para humidificar y deshumidificar, con sus ventajas y desventajas, eligiendo los equipos necesarios para controlar la humedad, con las especificaciones mínimas que el sistema debe poseer. Por último se presenta un esquema gráfico de la instalación y los equipos del sistema de control. Además se realizaron los cálculos de las pérdidas y cargas de vapor de agua o calor latente, que el sistema debía soportar.

## INTRODUCCIÓN

Los fenómenos naturales alteran el comportamiento natural del clima; a su vez, el clima condiciona rigurosamente la temperatura y la humedad de una región en cada época del año. Variables tales como la temperatura, humedad e iluminación, entre otras, afectan las condiciones de crecimiento y desarrollo de las especies vegetales. Para optimizar los procesos de producción agrícola y mejorar las diferentes especies, es preciso controlar las condiciones climáticas, generando ambientes artificiales adecuados que suplan y garanticen las necesidades ambientales que las especies demandan como en su hábitat natural.

Las características climáticas en el ambiente exterior no se pueden controlar, pero si se pueden modificar, acondicionar y controlar en un ambiente interior, por tanto, los diseños y construcciones de espacios bioclimáticos responden a las necesidades de bienestar y mejoramiento tanto de las condiciones de vida del ser humano, como en las aplicaciones del sector industrial agropecuario y otras áreas de la investigación.

La aplicación de la tecnología e implementación de sistemas de control automático para mejorar procesos de producción en el ámbito agroindustrial, está tomando mucho peso. En particular, la generación de sistemas artificiales que simulan las condiciones naturales requeridas en la producción agrícola se han convertido en uno de los principales soluciones tendientes a incrementar la productividad, garantizando el éxito de la obtención de cultivos, permitiendo obtener productos de otros climas y principalmente teniendo la posibilidad de introducir mejoras en los procesos y productos, todo bajo un ambiente artificial controlado.



La implementación de sistemas de control para regular y conservar las variables establecidas para aplicaciones en Laboratorios de Biotecnología son de gran importancia, ya que la obtención de resultados exitosos de investigación dependen no solo de las técnicas biológicas, sino de que dichas técnicas se realicen en le ambiente adecuado.

Algunos laboratorios implementados han prescindido del uso de estos sistemas automáticos de control, sin descartar su importancia, debido al costo que estos representan. La Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, desea implementar un laboratorio de Biotecnología para llevar a cabo procesos de de cultivo in Vitro con fines académicos de investigación y de producción industrial.

El presente proyecto, presenta el diseño de un sistema de control que permite controlar las variables temperatura, humedad e iluminación, de forma eficiente, con el fin de optimizar los procesos llevados a cabo en el área de incubación de un laboratorio de Biotecnología. Se busca con este diseño, presentar una propuesta tecnológica y económicamente viable, que incluya la definición de los criterios fundamentales para el debido análisis de costos, tanto de implementación como de funcionamiento y mantenimiento.

## **1. ESPECIFICACIONES DEL LABORATORIO DE BIOTECNOLOGÍA CON AMBIENTE CONTROLADO**

La construcción de un laboratorio de biotecnología consta de la implementación de varias áreas donde se siguen diferentes tipos de procesos; por esta razón la Facultad de Ciencias Agropecuarias de la Universidad del Cauca, dentro de su proyecto de construcción de un laboratorio de Biotecnología, ha destinado una parte de la planta física existente en la sede de “Las Guacas” para la implementación de gran número de estas partes constitutivas. Este proyecto se centra en el área del laboratorio en donde se realiza el control de las condiciones ambientales conocida como el área de incubación, que aún no existe.

Para diseñar el sistema de control ambiental del laboratorio<sup>1</sup>, se debe partir del planteamiento de las especificaciones de diseño y construcción de la planta física, que optimicen el desempeño de dicho sistema. Al identificar y definir las características más relevantes de la estructura física y los aspectos arquitectónicos y civiles de la construcción del laboratorio, se podrán establecer las condiciones de diseño de los sistemas de control. En este capítulo se proponen pautas generales del diseño de la planta física, sin embargo, se advierte que el diseño estructural, la planta física, los servicios, etc. deben ser considerados por un grupo de trabajo de Ingeniería Civil y Arquitectura, y lo relacionado con aspectos de bioseguridad debe ser tratado por especialistas en el tema.

---

<sup>1</sup> En el presente trabajo cuando se hable de “laboratorio” se estará haciendo referencia al Área de Incubación.

Los requerimientos iniciales dados por parte de la Facultad de Ciencias Agropecuarias para el área de incubación son: Debe poderse simular al tiempo varios valores de temperatura, iluminación y humedad relativa. El área debe tener las mejores condiciones de asepsia. Debe evitarse el intercambio con el ambiente exterior, en una u otra dirección, a fin de que se produzca la menor contaminación posible; por lo tanto se prescinde de la construcción de ventanas y puertas al exterior. La estructura física deberá ser un bloque a construirse adyacente al bloque existente<sup>2</sup>, con dimensiones similares, es decir, 29 por 7 metros.

A continuación se describe la propuesta presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias, para ser tenida en cuenta en el diseño definitivo del área de incubación, de acuerdo a los requerimientos planteados y a la teoría sobre laboratorios de biotecnología y cultivos in Vitro, recogida en el anexo A.

### **1.1 DESCRIPCIÓN ARQUITECTÓNICA DEL EDIFICIO Y DE LOS LOCALES CONTROLADOS.**

Se propone que el Área de Incubación del laboratorio se divida en tres áreas iguales, físicamente independientes, y un corredor común, para el acceso a los tres cuartos. Al dividir un área grande de incubación en tres secciones, se podrá simular las condiciones ambientales de tres tipos de climas (frío, templado y cálido) de manera independiente. El objetivo de esta propuesta es brindar más posibilidades de trabajo en el área de incubación y favorecer el desempeño de los sistemas de control. Al aislar las áreas se pueden manejar condiciones específicas para cada una de ellas, en rangos menos amplios, con menos perturbaciones entre una y otra área, lo que ayuda considerablemente en los

---

<sup>2</sup> El bloque existente es destinado actualmente a las otras áreas del laboratorio de biotecnología.

esfuerzos de control, disminuyendo el tamaño y potencia de los actuadores. De esta manera se facilita la implementación de cada ambiente en fases no consecutivas, y además, se contribuye a la racionalización de los costos de funcionamiento del laboratorio, pues se pueden tener en funcionamiento los sistemas de control de cada sección de forma independiente.

Aislar las secciones controladas de las condiciones exteriores es una de las prioridades en la construcción del laboratorio. Debido a los procesos que allí se van a realizar, por condiciones de bioseguridad, no es conveniente el intercambio de material. Se propone la construcción de un corredor que permita la comunicación entre las tres secciones, funcionando como una “cámara de aire” que aísle la influencia de las condiciones ambientales externas (por ejemplo: por el uso de la puerta principal), y adicionalmente, que brinde la posibilidad de observar las secciones controladas sin necesidad de entrar en ellas, especialmente, a visitantes o personas ajenas al funcionamiento del laboratorio.

En consecuencia, se plantea la instalación de 3 puertas internas de acceso a cada una de las secciones con características mixtas de puerta y ventana, en donde, del piso a media altura sean dos placas de aluminio con aislante térmico en el medio y de media altura hacia arriba sean de doble vidrio separado para disminuir el intercambio de temperatura. Estas características permitirán la observación de cultivos y/o procedimientos desde el corredor.

Tanto las puertas de acceso a las secciones controladas como la puerta principal deben construirse con un mínimo de dobleces ó quiebres con el fin de evitar la concentración de polvo y otros elementos indeseables. Además deben disponer de un sistema de apertura de corredera a fin de disminuir los disturbios producidos

en el uso de las puertas clásicas, que, “abanican” el aire cuando se abren o cierran. Además de las puertas puede usarse cortinas de vinilo (calibre 8 o 10), tipo persiana vertical, con el fin de disminuir al máximo las perturbaciones que se originan por la entrada de personas. Las puertas deben permanecer normalmente cerradas, para favorecer el desempeño de los sistemas de control. Para efectos del posterior diseño de los sistemas de control, según la bibliografía<sup>3</sup>, las puertas se clasifican como de instalación correcta refiriéndose al ajuste respecto al marco, con una rendija aceptable de 3mm.

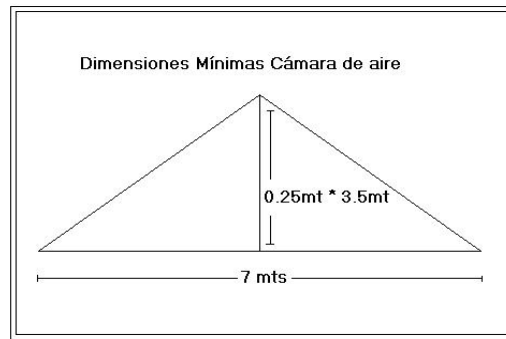
El diseño del bloque a construir debe prever el cielo raso en un material que puede ser panel yeso con aislante térmico, bajo una estructura resistente que soporte peso. En consecuencia, se deben diseñar cámaras de aire, que, además de bloquear gran porcentaje de las perturbaciones de las condiciones ambientales exteriores, permitan instalar sobre la estructura que soporta el cielo raso, de manera protegida, los ductos, tuberías y demás equipos que hacen parte de los servicios de planta.

Las normas sobre construcción de cámaras de aire inclinadas para techos establecen que la altura mínima de la cámara debe ser de 0,25m por cada metro de profundidad del cuarto en que se va a construir. La altura mínima pretende evitar la filtración del agua lluvia entre las tejas, sin embargo, se debe tener en cuenta que a menor altura hay mayor influencia térmica del exterior al interior. Es común encontrar cámaras a dos aguas, como se muestra en la figura 1.1, que aseguran el tratamiento adecuado de las aguas lluvias y facilitan la construcción, ya que, distribuyen la altura que debe tener la cámara en dos partes.

---

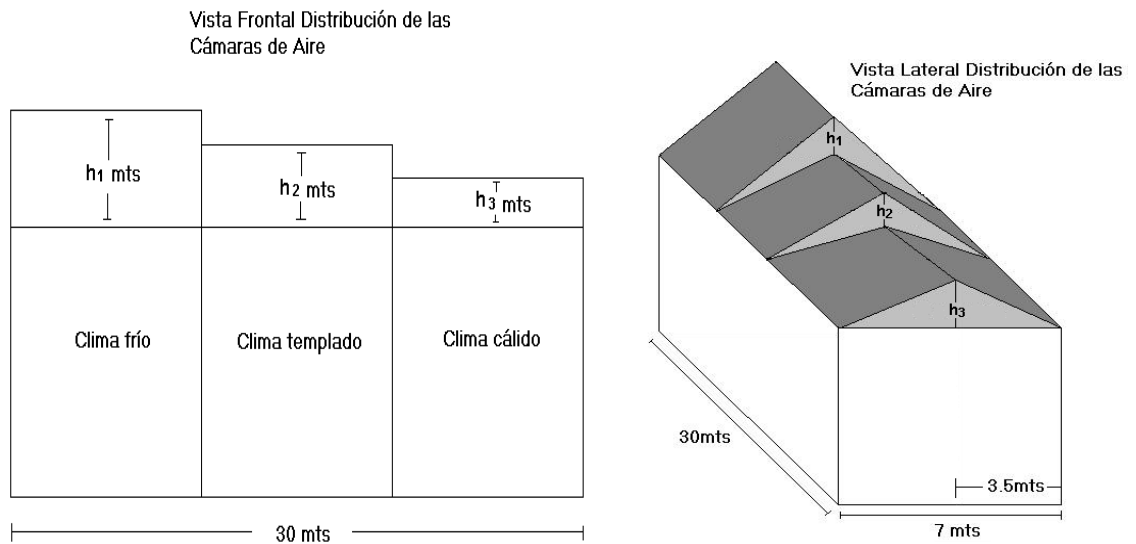
<sup>3</sup> Tratado de Refrigeración y Aire Acondicionado, Carrier Air Conditioning Company, pag. 90

**Figura 1.1 Dimensión mínima cámara de aire.**



En el ejemplo gráfico, la altura mínima de la cámara de aire es de 0,875 metros. Sin embargo, no se han considerado las longitudes de los corredores externos al bloque; esto aumenta un poco la base del triángulo formado entre la cubierta y el cielo raso, y en consecuencia la altura mínima. Dicho “alerón” favorece la menor influencia de las aguas lluvias en las paredes exteriores y la menor radiación solar en las mismas. Para beneficiar las condiciones climáticas en las secciones, se propone realizar tres cámaras de aire, como se muestra en la figura 1.2.

**Figura 1.2 Propuesta construcción de cámaras de aire.**



Como se observa, para la sección de clima frío la altura será mayor ( $h_1$ ), la altura intermedia ( $h_2$ ) para el templado y la menor ( $h_3$ ) para la sección de clima cálido. Los cálculos de la correspondiente altura de las cámaras de aire de cada sección deben hacerse por personas expertas en construcción considerando las dimensiones del bloque más los corredores y de acuerdo al tipo de material y tamaño de las tejas.

Debido a la necesidad de acceso entre el área de incubación (a diseñar y construir) y el bloque existente, se debe prever la construcción de un pasillo, que no solo permita la comunicación entre los dos bloques, sino que aisle el laboratorio de su entorno.

La tabla 1.1, indica las diferentes medidas de los componentes de la construcción.

**Tabla 1.1 Dimensiones del laboratorio**

|                         | <b>Frente(mt)</b> | <b>Fondo (mt)</b> | <b>Alto (mt)</b> | <b>Total</b>          |
|-------------------------|-------------------|-------------------|------------------|-----------------------|
| Área del laboratorio    | 29,0              | 7,00              |                  | 203,0 mt <sup>2</sup> |
| Volumen del laboratorio | 29,0              | 7,00              | 2,50             | 507,0 mt <sup>3</sup> |
| Área de cada Sección    | 9,48              | 5,55              |                  | 52,6 mt <sup>2</sup>  |
| Volumen de sección      | 9,48              | 5,55              | 2,50             | 131,5 mt <sup>3</sup> |
| Área corredor           | 28,7              | 1,00              |                  | 28,7 mt <sup>2</sup>  |
| Área puerta principal   | 2,00              |                   | 2,00             | 4,0 mt <sup>2</sup>   |
| Espesor muros           |                   |                   |                  | 0,15 mt               |

Para definir los materiales de construcción se contó con la asesoría de un Ingeniero Civil, quien principalmente recomendó no construir de forma tradicional, es decir en ladrillo y cemento, como se usa en la zona. Uno de los factores que más influye en una construcción en ladrillo es el intercambio constante de humedad con el medio, lo que hace difícil controlar dicha variable. Se propone construir en panel yeso, porque es un material liviano, con características térmicas que favorecen el diseño de los sistemas de control, especialmente el de temperatura. El uso de Aislante Térmico es necesario entre los paneles de yeso de cualquiera de las paredes, exteriores y entre secciones, del nuevo bloque a fin de evitar perturbaciones.

En el interior del laboratorio, por cuestiones de manejo, todas las paredes y el cielo raso deben tener un revestimiento con pintura epóxica de color blanco; por sus características especiales esta pintura facilita las condiciones de higiene y limpieza de las secciones. En el piso deben evitarse las ranuras o rendijas formadas en pisos o enchapes con baldosa común en las que se concentra suciedad y otros elementos no deseados. Por lo tanto, el piso debe ser un tendido uniforme revestido de un material con características similares a la pintura epóxica blanca y no debe llevar guarda escoba ya que en ellas también se puede concentrar suciedad. En los bordes del piso con la pared se debe redondear la unión, evitándose los quiebres bruscos.

Los materiales de estructuras soporte, marcos de ventanas, puertas, etc., no deben construirse en materiales tales como madera ya que pueden influir en las condiciones de asepsia del laboratorio; se recomienda el aluminio. La tabla 1.2 proporciona una definición de las características de los materiales propuestos para la construcción.



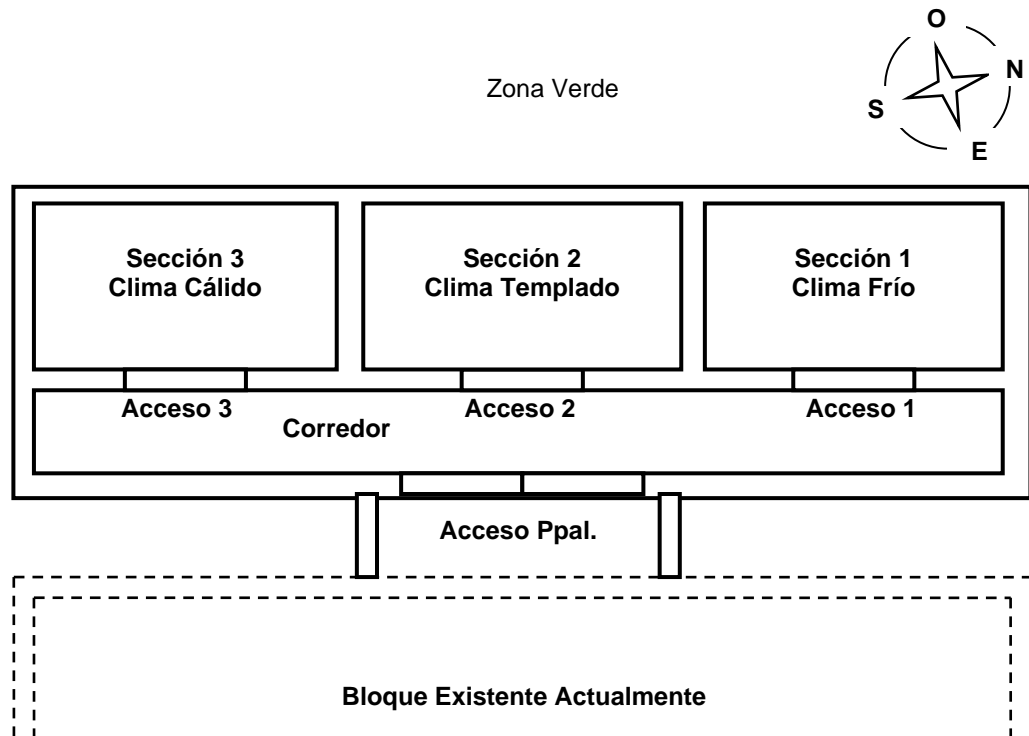
**Tabla 1.2 Materiales de construcción**

|                   | <b>Descripción</b>   | <b>Datos</b>   |
|-------------------|--|--|
| <b>Paredes</b>    | Paneles de yeso o concreto, revestimiento con pintura epóxica, con panel aislante.   | Espesor: 5 cm.<br>Peso: 10 kg/mt <sup>2</sup>                      |
| <b>Pisos</b>      | Losa primario en concreto simple. Tendido superior de baldosa en concreto (premolda).  | Espesor 10 cm losa   |
| <b>Cubierta</b>   | Lámina de fibrocemento con asbesto (ethernit), con estructura metálica   |  |
| <b>Cielo raso</b> | Paneles de yeso, con panel aislante. Revestimiento inferior con pintura epóxica.   | Espesor: 5 cm.<br>Peso: 10 kg/mt <sup>2</sup>                      |
| <b>Puertas</b>    | En aluminio, de corredera, con aislante térmico en el medio, doble acristalamiento con cámara utilizando aire como gas interior. | Espesor de puerta:<br>Espesor vidrio: 6mm.<br>Espesor cámara 6 mm. |

En el exterior del laboratorio se recomienda utilizar la influencia de los colores en la absorción del calor de forma que se beneficie el trabajo de los sistemas de control de temperatura. Se propone pintar de un color oscuro que absorba calor la sección de clima cálido, de un color medio la sección de clima templado y de un color claro que refleje más el calor en la sección de clima frío. La selección específica de colores deberá realizarse por parte de la facultad. Los colores en la cubierta también pueden trabajarse así, pero, los cálculos posteriores se realizan suponiendo un color medio para todas las cubiertas.

La figura 1.3 muestra una posible distribución de los espacios en el laboratorio con la correspondiente orientación geográfica, la identificación del entorno de la construcción. La designación de cada sección al clima indicado en la figura se debe a un análisis de la orientación de la construcción y la influencia del sol a diferentes horas. Así, se trata de evitar la influencia del sol en el cuarto de clima frío en las horas de la tarde donde la intensidad del calor aumenta y favorecer con este calor en las horas de la tarde el funcionamiento del cuarto de clima cálido.

**Figura 1.3 Distribución del laboratorio**



## 1.2 DEFINICIÓN DEL ENTORNO FÍSICO DEL EDIFICIO

**Latitud:** 2° 26' 39" latitud norte.

**Longitud:** 76° 37' 17" longitud oeste del meridiano de Greenwich.

**Altitud sobre el nivel del mar:** 1738 m.s.n.m.

**Oscilación máxima diaria de temperatura:** 12,22 °C

**Temperatura media de la localidad:** 19,8 °C

**Promedio de Humedad relativa:** 75,7%

**Descripción de localidades adjuntas:**

SE: Edificio de 29 metros frente \* 7 metros fondo \* 2,5 metros alto

SO - NO: Zona verde, sin barrera de árboles

NE: Estacionamiento y barrera de árboles

### 1.3 CONDICIONES INTERIORES DEL LABORATORIO

La tabla 1.3 muestra los rangos de trabajo de las variables: temperatura, humedad, iluminación y ventilación, que de conformidad con lo establecido, deben reunir las tres secciones del área de incubación del Laboratorio de Biotecnología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (FACA) de la Universidad del Cauca. Estos datos están basados en investigaciones realizadas sobre laboratorios de biotecnología y cultivos in Vitro<sup>4</sup> y reuniones con el grupo de trabajo de la FACA; a partir de ellos se diseñarán los sistemas de control en los próximos capítulos.

**Tabla 1.3. Condiciones de temperatura, humedad, iluminación y ventilación**

| CLIMA<br>VARIABLE               | CLIMA FRÍO        | CLIMA TEMPLADO    | CLIMA CALIENTE    |
|---------------------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 | Rango (min-max)   | Rango (min-max)   | Rango (min-max)   |
| Temperatura                     | 12°C – 19°C       | 19°C – 26°C       | 26°C – 33°C       |
| Humedad relativa                | 70 – 80%          | 70 – 80%          | 70 – 80%          |
| Iluminación                     | 2000 -7000 lux    | 2000 -7000 lux    | 2000 -7000 lux    |
| Fotoperíodos                    | 12 - 16 horas/día | 12 - 16 horas/día | 12 - 16 horas/día |
| Vel. aire interior <sup>5</sup> | 8 km/h            | 8 km/h            | 8 km/h            |
| Vel. aire exterior              | 24 km/h           | 24 km/h           | 24 km/h           |

<sup>4</sup> Ver Anexo A.

<sup>5</sup> Se toma el valor mínimo de velocidad del viento indicado en las tablas del Tratado de Refrigeración y Aire Acondicionado, Carrier Air Conditioning Company, pag. 90

**1.3.1 Sistema de almacenamiento de productos.** Dentro de cada una de las secciones se van a ubicar estantes para el almacenamiento de los recipientes que contienen los cultivos in Vitro. Las dimensiones definidas por la Facultad de Ciencias Agropecuarias para los estantes son:

| Alto  | Ancho | Profundida | Nº Peldaños | Distancia | Base <sup>6</sup> |
|-------|-------|------------|-------------|-----------|-------------------|
| 1,9 m | 1,6 m | 0,6 m      | 5 Unid      | 0,4 m     | 0,15 m            |

Ahora bien, estas dimensiones no favorecen el diseño del sistema de control de Iluminación. Se propone un rediseño de estos estantes con el fin de ajustar el ancho de los estantes a las dimensiones de la referencia de las lámparas elegidas. Por lámpara se entiende el conjunto de tubo y chasis sobre el cual se monta el o los tubos. Se proponen entonces, estantes con las siguientes dimensiones:

| Alto  | Ancho | Profundidad | Nº Peldaños | Distancia peldaños | Base  |
|-------|-------|-------------|-------------|--------------------|-------|
| 1,9 m | 1,3 m | 0,6 m       | 5 Unid      | 0,3 m              | 0,4 m |

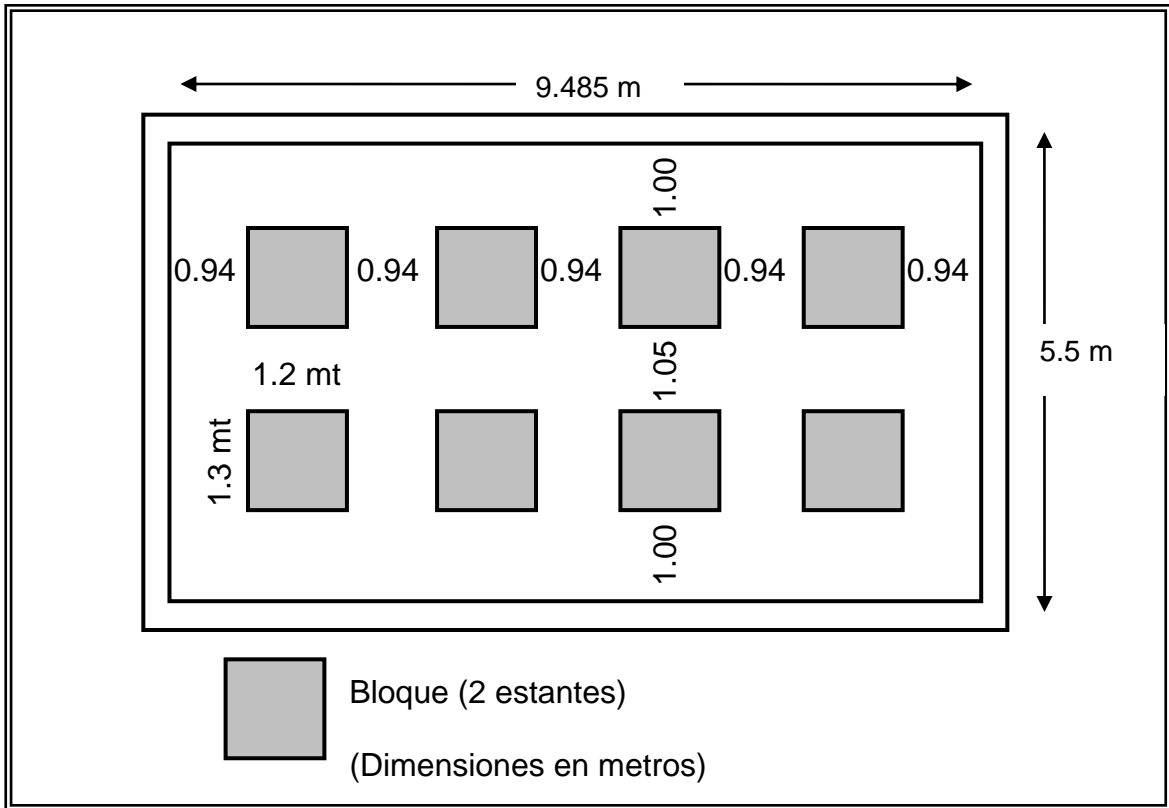
- **Distribución de estantes.** El área neta de una sección del laboratorio es:  $9,485 \text{ m} * 5,55 \text{ m} = 52,641 \text{ m}^2$ . Una posible distribución de estantes formando bloques, ubicando los estantes por pares uno contra otro sería:

Ubicar 16 estantes en 8 bloques con un espacio establecido para desplazamientos entre los bloques de aproximadamente 1,00 m a lo ancho y 0,93 m a lo largo. Ver figura 1.4

---

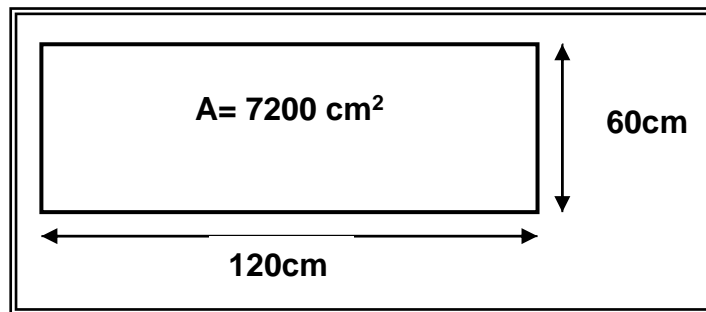
<sup>6</sup> Base: altura del piso al primer peldaño.

**Figura 1.4 Distribución de estantes y corredores**



- Capacidad del sistema de almacenamiento.** Para definir la capacidad de los estantes se tiene en cuenta que se van a albergar en ellos recipientes de un área aproximada de  $49 \text{ cm}^2$ , previendo un espaciado propicio entre recipientes. El cálculo de la capacidad de almacenamiento se realiza dividiendo el área útil de un peldaño entre el área de los recipientes. Aunque el ancho de los peldaños es de 1,30 m, se considera un ancho de 1,2 m para determinar un área útil que se entiende como el área donde se pueden ubicar recipientes, sin peligro de caerse, y además, que reciban la iluminación adecuada, esto se ve en detalle en el capítulo 3. En la figura 1.5 se indica el área útil sobre la que se calcula la capacidad de almacenamiento.

**Figura 1.5** Área útil de peldaño de estantes.



Así,  $7200 \text{ cm}^2 / 49 \text{ cm}^2 = 146$  recipientes por peldaño. Cada estante tiene 5 peldaños, por lo tanto la cantidad total de recipientes por estante es de:  $146 * 5 = 730$  recipientes / estante. Si cada estante tiene una capacidad de 730 recipientes, cada sección tiene una capacidad de  $730 * 16$  estantes = 11680 recipientes. Y el laboratorio tendrá una capacidad total de  $11680 * 3$  secciones = 45040 recipientes para un período de producción.

**1.3.2 Número de ocupantes.** Dentro de cada una de las secciones se establece permitir la presencia de 3 personas como valor normal y un máximo de 5 personas. En el corredor un valor normal de 10 visitantes y un máximo de 15 visitantes.

**1.3.3 Iluminación.** La iluminación de los laboratorios debe adaptarse a las características de la actividad que se realiza en ellos, teniendo en cuenta: los riesgos para la seguridad y salud de los trabajadores, dependientes de las condiciones de visibilidad, las exigencias visuales de las tareas desarrolladas, y las condiciones de iluminación requeridas para el desarrollo de las actividades investigativas. Los niveles de iluminación se van a controlar por bloques, los cuales están conformados por dos estantes.

La distribución de los niveles de iluminación debe ser uniforme, evitando variaciones bruscas dentro de la zona de trabajo, y, entre ésta y sus alrededores. Así mismo, hay que evitar los deslumbramientos. Se debe permitir además programar los períodos de iluminación, o fotoperíodos, de 12, 14, ó 16 horas por día. Por último, los sistemas de iluminación utilizados no deben originar riesgos eléctricos, de incendio o de explosión.

**1.3.4 Equipos.** No deben existir equipos eléctricos o a gas adicionales dentro del área de incubación del laboratorio. Se propone ubicar los sistemas de acondicionamiento de aire que resulten del diseño, tales como: calderas, refrigeradores, entre otros, en un área independiente fuera del área de incubación con el fin de evitar cargas a causa de estos equipos dentro del laboratorio. Esto implica diseñar un sistema de ductos que comunique los actuadores con las secciones controladas. Dentro del laboratorio solo se deberá instalar equipos de los sistemas de control de carácter electrónico, como displays, sensores, entre otros, o equipos que generen cargas térmicas despreciables. No se descarta que se requiera, ocasionalmente, la conexión de algún equipo electrónico adicional, por lo que se deben prever algunas acometidas eléctricas seguras (con tapa) en cada sección.

## **2. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA**

Para lograr un diseño eficiente de las secciones climáticas artificiales se debe tener en cuenta no sólo la naturaleza del ambiente donde se edificará el laboratorio, sino también la estimación sobre la eficiencia energética y los costos que esta implica. Estos factores son esenciales para establecer la relación entre el diseño arquitectónico, el ambiente y los sistemas y equipos de control a utilizar. Para optimizar el potencial de uso eficiente de la energía en las secciones climáticas es importante considerar el diseño y capacidad de los dispositivos de climatización artificial; esto implica lograr las condiciones climáticas con eficiencia y no simplemente consumir menos energía, por eso la mejor calefacción o la mejor refrigeración, es la que permita obtener las condiciones deseadas al menor costo posible.

En consecuencia, para lograr un buen nivel de eficacia en el sistema de climatización se debe considerar la adecuación del sistema a:

- Las exigencias climáticas requeridas.
- Las condiciones exteriores y su variación a lo largo del tiempo.
- El uso previsto (continuo, intermitente, horarios, forma de utilización).
- Los costos totales que incluyen la instalación, el funcionamiento y el mantenimiento.
- La energía disponible en el lugar.
- El tipo de construcción, orientación, inercia térmica, nivel de aislamiento y protecciones y eficiencia de la ventilación.
- El conjunto: local - instalación - sistema de control.



## 2.1 ANÁLISIS DE LOS REQUERIMIENTOS DE CADA UNA DE LAS SECCIONES CLIMÁTICAS RESPECTO A LAS CONDICIONES DE DISEÑO

La estructura física del laboratorio está dividida en tres secciones independientes, las cuales constituyen zonas térmicas diferentes, caracterizadas por sectores: diferentes orientaciones, inercias térmicas diferentes y diferentes requerimientos higrométricos o de ventilación. Con estos parámetros se debe evaluar la posibilidad de emplear un sistema central de acondicionamiento de temperatura para las tres secciones, o un sistema independiente para cada sección. Finalmente, la selección de los equipos deberá hacerse en virtud de: la instalación y capacidad de los mismos, la reducción del consumo de energía, y de los costos de funcionamiento y mantenimiento.

**2.1.1 Sección climática fría.** En esta sección el rango de temperatura a obtener es de 12 a 19 °C. En primera instancia, se supone que con respecto al promedio de la temperatura ambiental de Popayán (19 °C), se requiere refrigerar el aire interior la mayor parte del tiempo. Por otra parte, existen dos posibilidades bajo las cuales se requiere calentar el aire: la primera posibilidad es cuando la temperatura exterior es más baja que el límite inferior de la sección. En los registros de temperaturas de Popayán<sup>7</sup> no se repiten frecuentemente valores más bajos a 12°C, y, se considera que la carga térmica de las lámparas del sistema de iluminación, si se encuentra en su estado activo, beneficiaría en este momento la respuesta del sistema. Si no es así, se requiere de un sistema que permita calentar el aire interior, principalmente en las horas de la noche, donde se espera que el sistema de iluminación este desactivado.

---

<sup>7</sup> Comité de Cafeteros, Anuario meteorológico 2003, pag. 122. IDEAM, Información de Meteorología Aeronáutica, Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón – Santiago de Cali. Ver tabla B.2

La segunda posibilidad sucede en los casos donde se requiera una temperatura mayor a la actual, es decir que se presente un cambio en el *set point*. Por lo tanto, se considera que es necesario para esta sección, diseñar un sistema que permita calentar o enfriar el aire según sean las condiciones.

**2.1.2 Sección climática templada.** El rango de control en esta sección es de 19 a 26°C. Con respecto a la temperatura promedio en Popayán se deduce que este sistema requerirá no solo enfriar el aire sino calentarlos en determinados momentos, ya sea por cambios en el valor deseado de temperatura o por la influencia de la temperatura exterior. Por lo tanto, esta sección también requiere de ambos servicios: calefacción y refrigeración.

**2.1.3 Sección climática cálida.** 26°C a 33°C es el rango a controlar en esta sección. Con respecto a temperaturas ambientales promedio o más bajas, el sistema casi siempre deberá calentar el aire interior. Para temperaturas más altas el sistema debería enfriar, aunque, valores más altos de 30.2°C no se repitan con frecuencia en Popayán. Sin embargo, la carga térmica que producirá el sistema de iluminación en esta sección es alto y no se puede despreciar. Puede darse el caso en que a una temperatura exterior alta se sume la carga térmica de las lámparas, y muy seguramente, el valor de temperatura interior estará por encima del valor deseado; en ese momento no basta con desactivar el sistema de calefacción ya que la temperatura de la sección se estabilizará a la temperatura exterior más la carga por lámparas, y la única forma de obtener la temperatura deseada es bajando la temperatura mediante un sistema de refrigeración. Se concluye igualmente, la necesidad de un sistema que permita calentar y enfriar el aire de la tercera sección.

En la elección de los sistemas también debe tenerse en cuenta que el sistema de iluminación estará activado durante fotoperíodos de 12, 14 ó 16 horas; lo anterior indica que la carga térmica debida a las lámparas solo se presentará aproximadamente durante la mitad del tiempo de funcionamiento de los sistemas de control de temperatura; por lo tanto, es probable que en las horas del día solar especialmente en las secciones de clima frío y templado se requiera refrigerar, y en las noches es más probable que se requiera de un sistema de calefacción, en las secciones de clima templado y cálido.

Como se expuso, en cada una de las secciones climáticas del laboratorio se requiere hacer uso de los dos servicios de climatización: calefacción y refrigeración.

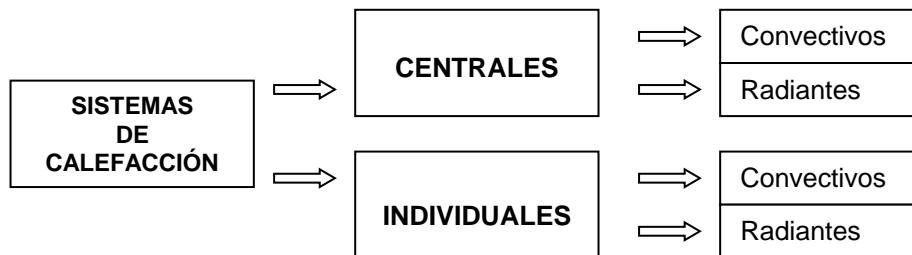
El diseño del sistema de control de temperatura, requiere determinar si los dos servicios se van a proveer por equipos independientes o, mediante un solo equipo que brinde la posibilidad de obtener los dos servicios. Además, aún falta determinar, si se elige un equipo central o individuales para cada sección. Para poder tomar la decisión final, se requiere primero analizar los diferentes equipos de climatización.

## **2.2 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN**

El acondicionamiento de aire es un proceso que controla el ambiente interior de un local, mediante la refrigeración o la calefacción. Cuando se cubren ambos servicios se habla de climatización.

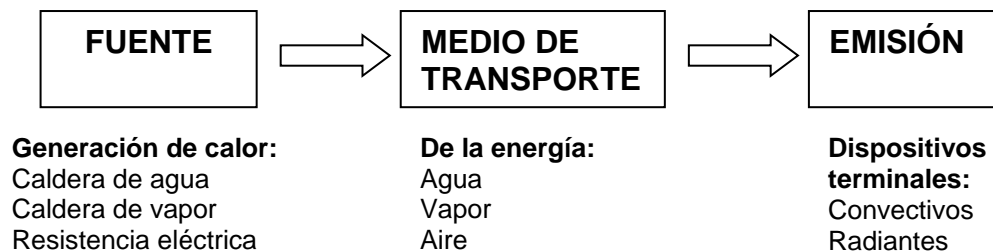
**2.2.1 Sistemas de calefacción.** Calefacción es el proceso térmico que controla solamente la temperatura de bulbo seco de un local durante el periodo frío. Por lo tanto los sistemas de calefacción generan únicamente calor. Los sistemas de calefacción se clasifican de manera general, como se muestra en la figura 2.1

**Figura 2.1 Clasificación general de los sistemas de calefacción**



- **Sistemas de calefacción centrales.** Son aquellos en que la fuente térmica está centralizada en un solo lugar. En la figura 2.2 se muestra un esquema de un sistema de calefacción central.

**Figura 2.2 Esquema de sistema de calefacción central**



- **Sistemas de calefacción individuales.** La fuente térmica está en el local a acondicionar, sin requerir para su funcionamiento instalaciones auxiliares. En estos sistemas la fuente de energía puede ser electricidad o gas por cañería.

**2.2.2 Sistemas de aire acondicionado.** Refrigeración, es el proceso de tratamiento de aire que controla la temperatura máxima de un local y eventualmente el contenido máximo de vapor de agua del aire. Se dividen en individuales y centrales.

- **Sistemas de aire acondicionado individuales.** Son equipos autónomos diseñados para acondicionar espacios individuales. Poseen su propio ciclo de refrigeración y no dependen de un equipo central. También existen equipos de mayor potencia para espacios comunes. Hay que considerar que en cada punto donde hay un equipo individual es necesario una alimentación de energía eléctrica, un drenaje y que una vez al mes se debe realizar una tarea de mantenimiento, además de las que sean necesarias para reparaciones eventuales. No prevén tomar aire del exterior, salvo excepciones, por lo cual la ventilación debe ser provista por otros medios. Se dividen en: Equipos compactos de ventana o pared, y, divididos o minisplit.

- **Sistemas de aire acondicionado centrales.** Son sistemas que centralizan la generación del fluido térmico encargándose de transportar la energía a los locales a acondicionar, distribuyéndose por ductos a los equipos terminales que actúan sobre las condiciones de los locales o zonas diferentes. Algunos de estos equipos brindan la opción de proporcionar los dos servicios (refrigeración y calefacción). Pueden ser: de **instalación centralizada colectiva** cuando la producción centralizada de frío o calor sirve a un conjunto de usuarios dentro de un mismo edificio, o, de **instalación centralizada individual** cuando la producción centralizada de frío o calor es independiente para cada usuario.

Los sistemas de aire acondicionado centrales se dividen en:

- **Todo aire.** Se basan en que el aire es enfriado directamente por el fluido refrigerante sin la intervención de un refrigerante indirecto. La

distribución de energía a los diversos locales se realiza mediante aire climatizado que se impulsa a través de conductos desde las unidades de tratamiento hasta los elementos terminales. Se subdividen en: compactos o autocontenidos, y, divididos (*split* centrales) o equipos múltiples (*multisplit*)

- **Aire - agua.** Se basan en la distribución de energía a los diversos locales a través de circuitos de agua enfriada y aire. Requieren de una central de generación de agua fría. Se componen de: unidades centrales de acondicionamiento de aire (manejadoras de aire) y unidades terminales de acondicionamiento de aire, funcionando estas últimas con agua helada.
- **Todo agua.** Se basan en la distribución de energía a los diversos locales exclusivamente mediante agua. El agua fría es utilizada por unidades llamadas *FanCoil* que se instalan en cada ambiente individual.

### **2.3 ELECCIÓN DEL SISTEMA MÁS CONVENIENTE FRENTE A LAS CONDICIONES DE DISEÑO.**

Se deben seleccionar los equipos que garanticen un clima interior artificial, considerando las funciones básicas de tratamiento del aire que debe satisfacer el laboratorio de biotecnología, tales como: el control y ajuste de las condiciones termo higrométricas, la necesaria renovación del aire existente, el debido tratamiento para evitar contaminación del ambiente, y la facilidad en el mantenimiento.

Debido a que en cada sección climática se requiere de un sistema de calefacción y otro de aire acondicionado, la posibilidad de tener equipos separados para cada servicio implica mayores costos tanto de adquisición como de instalación y

requiere diseñar un sistema que coordine automáticamente sus funcionamientos. El uso de un sistema de calefacción independiente requiere de una fuente generadora, se evaluó la posibilidad de utilizar el servicio de la caldera instalada en la Facultad de Ciencias Agropecuarias, pero el costo del funcionamiento de la caldera es muy alto, aproximadamente 60.000 pesos/hora, costo en el que la FACA no quiere incurrir.

Los sistemas de aire acondicionado individuales no se consideran convenientes, ya que estos no permiten renovación de aire, condición necesaria para esta aplicación; esto implica el diseño de un sistema independiente que permita la ventilación del local, que es un costo adicional considerablemente alto, entre otras cosas, porque el sistema debe poseer filtros potentes que garanticen el tratamiento del aire. Además, el mantenimiento de dichos equipos debe realizarse dentro del local, lo que no favorece las condiciones de asepsia en el laboratorio, y como última consideración, estos equipos solo brindan la opción de refrigerar.

Se considera conveniente, entonces, utilizar un sistema que brinde los dos servicios mediante un solo equipo. Dichos sistemas de refrigeración/calefacción, permiten realizar calefacción mediante dos opciones: utilizando resistencias eléctricas o mediante la inversión del ciclo. El uso de resistencias eléctricas para realizar la calefacción resulta más costoso debido a las tarifas de la conexión a la energía eléctrica necesaria para su funcionamiento, por lo que se descarta su uso.

Se opta por un sistema de aire acondicionado que permita realizar calefacción y refrigeración por inversión del ciclo, también conocido como bomba de calor. Se propone, entonces, un equipo central, todo aire, compacto, de instalación individual (para cada sección). Se requiere de un sistema central de instalación

individual, debido a que no es posible que el equipo brinde los dos servicios al mismo tiempo, y por consiguiente, es imposible atender a varios usuarios (las tres secciones) con requerimientos diferentes al mismo tiempo.

Se propone la adquisición, para cada una de las tres secciones, de un equipo bomba de calor compacto es decir que las dos partes constitutivas de un sistema de aire acondicionado general (manejadora y condensadora) estarán en una sola unidad y que la distribución del aire se haga a través de un sistema de conductos, primordialmente porque esto facilita la instalación de los equipos. Además este equipo compacto, que es de instalación externa, permite realizar su mantenimiento sin interferir con el área aséptica. Algunas de las ventajas de trabajar un equipo para cada sección, es que, existe la posibilidad de que no se necesiten las tres unidades operando simultáneamente. Esto disminuye los costos de funcionamiento, ó, ante un daño eventual o mantenimiento en alguno de los tres equipos no se tiene que dejar toda el área de incubación sin climatizar. Además, considerando una posible implementación del laboratorio por fases, esta propuesta permite, la adquisición gradual de los equipos.

Un equipo de Ciclo Reversible o Bomba de Calor toma 1 KW de la Red eléctrica y produce entre 2,6 y 3 KW de potencia calorífica. Como la energía ni se crea ni se destruye, solo experimenta transformaciones, los 2 kilovatios que faltan son tomados por el equipo de la energía calorífica que hay en el aire exterior. Esta particularidad hace especialmente atractiva la bomba de calor como elemento de calefacción, ya que a diferencia de cualquier otra máquina que trabaja con rendimiento inferior al 100%, la bomba de calor produce más energía de la que consume convirtiéndola en uno de los métodos más rápidos y económicos. Ya que no produce sino que traslada energía, puede alcanzar hasta un 66.5% del



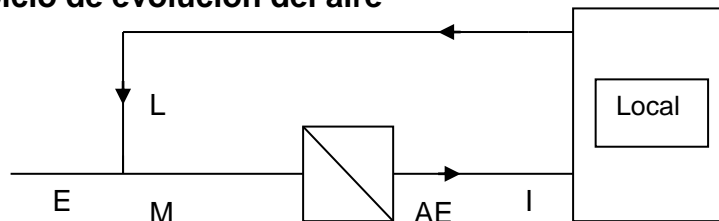
costo de energía con respecto a un sistema eléctrico. En el anexo F se describe su funcionamiento.

## 2.4 CALCULO DE LA POTENCIA DEL EQUIPO PARA CLIMATIZACIÓN

El cálculo de la potencia del equipo para efectos prácticos en climatización se determina considerando básicamente: renovación de aire, temperatura de impulsión, toneladas de refrigerante, caudales de impulsión y recirculación, entre otros.

**2.4.1 Elección del porcentaje de renovación del aire.** El ciclo de evolución del aire se indica en la figura 2.3

**Figura 2.3 Ciclo de evolución del aire**



Donde:

E: Aire externo de renovación → Caudal de renovación:  $V_{\text{renovación}}$

L: Aire de retorno (Aire del local) → Caudal de recirculación:  $V_{\text{recirculación}}$

M: Aire de mezcla

I: Aire de salida del equipo → Caudal de impulsión:  $V_{\text{impulsión}}$

AE: Condiciones del aire de impulsión

La elección del porcentaje de renovación se realiza de acuerdo a la aplicación de acondicionamiento. La cantidad de aire que se debe renovar para no viciar el aire en el interior del laboratorio, cumpliendo las exigencias que este demanda, se elige conforme a la tabla 2.1, (aunque no está especificada la aplicación para

laboratorios de Biotecnología se toman los valores establecidos para un hospital o laboratorio), y se multiplica por el número de personas normal en las secciones.

**Tabla 2.1 Aire por persona y renovaciones de aire recomendadas**

| <b>TIPO DE LOCALES</b>              | <b>AIRE POR PERSONA (m<sup>3</sup>/h)</b> | <b>AIRE POR PERSONA (CFM)</b> | <b>RENOVACIONES POR HORA</b> |
|-------------------------------------|---|-------------------------------|------------------------------|
| Clínicas, hospitales y laboratorios | 60 - 80                                   | 35 - 47                       | 6 - 10                       |
| Clínicas de cirugía y quirófanos    | 80 - 90                                   | 47 - 53                       | 10 - 20                      |
| Salas de enfermos infecciosos       | 160 - 180                                 | 94 - 106                      | 20 - 40                      |

Memorias Seminario Internacional de Proyectos de Aire Acondicionado – 1999. II Parte - pag. 18

De acuerdo con lo anterior se requiere en las secciones, donde regularmente van a permanecer 3 personas, de un equipo que maneje un caudal de renovación entre 180 y 240 m<sup>3</sup>/h ó entre 105 y 141 cfm, y que realice un mínimo de 6 a 10 renovaciones por hora.

**2.4.2 Cálculo de la temperatura de impulsión.** Experimentalmente se ha establecido una variación de 8 °C en los procesos de intercambio de temperatura, en los sistemas de climatización; así, para obtener una temperatura deseada en la sección, el aire que salga del equipo acondicionador o de suministro debe estar 8 grados por encima o por debajo de esta temperatura deseada; de igual manera en el intercambiador de calor el refrigerante debe estar 8 grados por debajo de la temperatura deseada de impulsión. Las tablas 2.2 y 2.3 indica las temperaturas en el equipo bomba de calor para cada uno de los ciclos.

**Tabla 2.2 Temperaturas en el sistema de refrigeración**

| <b>T° deseada</b> | <b>T° de impulsión</b> | <b>T° del refrigerante</b> |
|-------------------|------------------------|----------------------------|
| 12°C              | 4 °C                   | -4 °C                      |
| 19°C              | 11 °C                  | 3 °C                       |
| 26°C              | 18 °C                  | 10 °C                      |
| 33 °C             | 25 °C                  | 17 °C                      |

La temperatura del refrigerante indica la temperatura correspondiente a la presión de evaporación y es la presión a la que debe caer el refrigerante en la válvula de expansión cuando trabaja en servicio de aire acondicionado.

**Tabla 2.3 Temperaturas en el sistema de calefacción**

| <b>T° deseada</b> | <b>T° de impulsión</b> | <b>T° del refrigerante</b> |
|-------------------|------------------------|----------------------------|
| 12°C              | 20 °C                  | 28 °C                      |
| 19°C              | 27 °C                  | 35 °C                      |
| 26°C              | 34 °C                  | 42 °C                      |
| 33 °C             | 41 °C                  | 49 °C                      |

**2.4.3 Cálculo del aire de impulsión y volumen de recirculación.** El caudal de impulsión, se calcula con la siguiente expresión<sup>8</sup>:

$$V_{impulsión} = \frac{Q_s}{1.08(1 - BF)(T_L - T_{ADP})}$$

Donde:

$V_{impulsión}$  = Caudal de impulsión en CFM

$Q_s$  = Carga Sensible (se obtiene de los cálculos de carga térmica por sección) en BTU/h

$BF$  = Factor de Bypass (depende del número de filas del evaporador, se asume un valor de 4 filas, ya que la capacidad del equipo se considera pequeña).

$$BF = 0,56^{\#filas} - BF = 0.56^4 = 0,1$$

$T_L$  = Temperatura Interior deseada en °F

$T_{ADP}$  = Temperatura de rocío del aparato en °F

Para encontrar  $T_{ADP}$  es necesario primero calcular el valor del Factor de Calor Sensible (SHR), con:

$$SHR = \frac{Q_s}{Q_s + Q_L}$$

Donde:

$Q_s$  = Carga de calor sensible

$Q_L$  = Carga de calor latente

---

<sup>8</sup> Memorias Seminario Internacional de Proyectos de Aire Acondicionado – 1999.

Para realizar este cálculo se hace uso de los valores de carga de calor por sección, tomados del anexo B, tabla B.24, y carga latente, tomados del anexo D, tabla D.4. Como primera medida, se convierten estos valores de KCal/h a BTU/h, utilizando la equivalencia:  $\frac{1}{4} \text{ kcal} = 1 \text{ BTU}$ . Los resultados en BTU/h, y los valores por secciones de SHR, se presentan en la tabla 2.4.

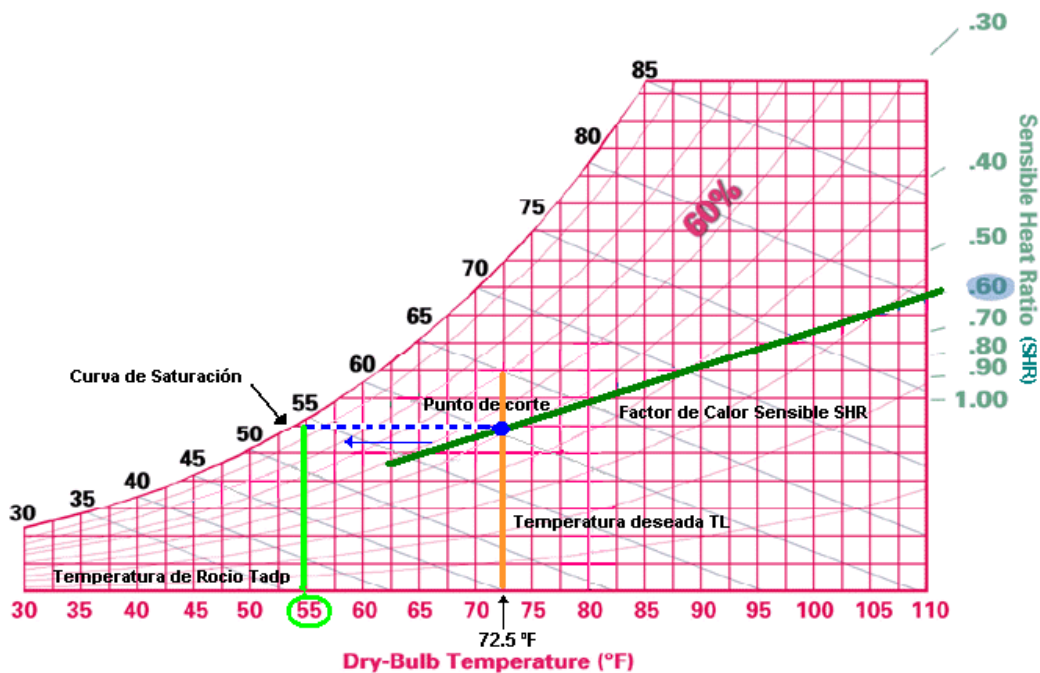
**Tabla 2.4 Cálculo de los valores de factor de calor sensible**

|                  | <b>Q<sub>s</sub> (BTU/h)</b> | <b>Q<sub>L</sub> (BTU/h)</b> | <b>SHR</b> |
|------------------|------------------------------|------------------------------|------------|
| <b>Sección 1</b> | 44544                        | 39648                        | 0,52       |
| <b>Sección 2</b> | 42072                        | 23944                        | 0,63       |
| <b>Sección 3</b> | 40452                        | 9148                         | 0,81       |

T<sub>L</sub> se toma como un valor promedio de los rangos de control de cada sección para simplificar los cálculos. Con los valores de T<sub>L</sub> y SHR se encuentra el valor de T<sub>ADP</sub> utilizando el gráfico psicrométrico<sup>9</sup>. En la figura 2.4 se muestra un ejemplo gráfico, para la sección 2, con temperatura deseada promedio 22,50 °C (72,5 °F), y un SHR de 0,6, este valor de SHR se encuentra indicado en los gráficos psicrométricos para ser trazado con diferentes orientaciones de acuerdo a su valor.

**Figura 2.4 Ejemplo de cálculo de temperatura de rocío**

<sup>9</sup> En el capítulo 4 se explica el gráfico psicrométrico en detalle.



El uso de dicho gráfico se explica a continuación: En el punto de corte entre la curva del valor SHR calculado y la temperatura deseada  $T_L$ , se traza una línea horizontal hasta llegar a la curva de saturación que nos indica la temperatura de rocío, que en este caso es de 55 °F. La tabla 2.5 muestra los resultados del cálculo del caudal de impulsión del equipo, usando los valores de factor de carga sensible  $Q_s$ , y temperatura de rocío calculados, aplicados en la fórmula:

$$V_{impulsión} = \frac{Q_s}{1.08(1 - BF)(T_L - T_{ADP})}$$

**Tabla 2.5 Cálculo del caudal de impulsión**

|           | $Q_s$ (Btu/h) | BF  | $T_L$ (°F) | $T_{ADP}$ °F) | V impulsión (cfm) |
|-----------|---------------|-----|------------|---------------|-------------------|
| Sección 1 | 44544         | 0,1 | 60         | 35            | 1833              |
| Sección 2 | 42072         | 0,1 | 73         | 55            | 2404              |
| Sección 3 | 40452         | 0,1 | 85         | 60            | 1663              |

El caudal de recirculación se obtiene al sustraerle al aire de impulsión, el aire de renovación, que se determinó en el ítem 2.4.1. Los resultados se muestran en la tabla 2.6.

$$V_{recirculación} = V_{impulsión} - V_{renovación}$$

**Tabla 2.6 Cálculo del caudal de recirculación**

|           | $V_{impulsión}$ (cfm) | $V_{renovación}$ (cfm) | $V_{recirculación}$ (cfm) |
|-----------|-----------------------|------------------------|---------------------------|
| Sección 1 | 1833                  | 141                    | 1974                      |
| Sección 2 | 2404                  | 141                    | 2545                      |
| Sección 3 | 1663                  | 141                    | 1804                      |

Considerando el valor del caudal de impulsión más alto (sección 2) como un valor crítico para el establecimiento de las especificaciones de los equipos, se asume para las bombas de calor de las tres secciones: un caudal de impulsión 2500 cfm, como caudal de renovación 150 cfm y un caudal de recirculación de 2350 cfm.

**2.4.4 Cálculo de los coeficientes de performance (COP) y energy efficiency ratio (EER).** Dentro de las especificaciones requeridas para la adquisición de equipos bomba de calor se encuentran dos coeficientes denominados, "Coeficiente de Funcionamiento Performance" (COP), y coeficiente "Energy Efficiency Ratio" (EER), que se utilizan para indicar el rendimiento en cada uno de los ciclos, calefacción y refrigeración, respectivamente.

Cuando la bomba de calor trabaja en ciclo de calefacción se utiliza:

$$COP = \frac{\text{Calor Cedido por el Condensador}}{\text{Calor Suministrado por el Compresor}}$$

Y cuando la bomba trabaja en ciclo de refrigeración, se utiliza:

$$ERR = \frac{\text{Calor Extraído por el Evaporador}}{\text{Calor Cedido por el Compresor}}$$

Ambos se encuentran determinados por la formula general:

$$Q_1 / (Q_1 + Q_2)$$

Q puede ser calculado como:

$$Q = V C (T_1 - T_2)$$

Donde:

Q = Cantidad de calor aportado al aire en kcal / h.

V = Caudal de aire tratado en m<sup>3</sup> / h.

C = Calor específico del aire, 0,307 kcal / m<sup>3</sup> °C.

T<sub>1</sub> = Temperatura del aire de entrada en °C.

T<sub>2</sub> = Temperatura del aire de salida en °C.

Se debe tener en cuenta que para el COP:

**Q<sub>1</sub>**= caudal de entrada al condensador o de recirculación en m<sup>3</sup>/h \* el calor específico del aire \* (la diferencia de temperaturas entre la temperatura de suministro y temperatura interior).

**Q<sub>2</sub>**= Caudal de entrada al evaporador, (se toma un valor de 4000 m<sup>3</sup>/h siguiendo la proporción presentada en un ejemplo descrito en la bibliografía seguida) \* el calor específico del aire \* (diferencia de temperaturas entre el aire que sale del evaporador y temperatura del aire que entra al evaporador).

Y para el EER:



$Q_1$ = caudal de entrada al evaporador o de recirculación en  $m^3/h$  \* el calor específico del aire \* (la diferencia de temperaturas entre la temperatura de suministro y temperatura interior).

$Q_2$ = Caudal de entrada al condensador \* el calor específico del aire \* (diferencia de temperaturas entre el aire que sale del condensador y temperatura del aire que entra al condensador).

Los valores de COP y EER varían de acuerdo a las temperaturas interior y exterior, por lo que, en las tablas 2.7 y 2.8 se presenta un cálculo de estos coeficientes para un valor promedio de temperatura deseada en cada sección.

**Tabla 2.7 Coeficientes de desempeño COP**

|              | $Q_1$                             | $Q_2$                              | COP  |
|--------------|-----------------------------------|------------------------------------|------|
| <b>Sec 1</b> | $3308 * 0,307 * (19 - 12) = 7109$ | $4000 * 0,307 * (11 - 15) = -4912$ | 3,23 |
| <b>Sec 2</b> | $4324 * 0,307 * (26 - 19) = 9292$ | $4000 * 0,307 * (11 - 15) = -4912$ | 2,12 |
| <b>Sec 3</b> | $1842 * 0,307 * (36 - 26) = 5655$ | $4000 * 0,307 * (11 - 15) = -4912$ | 7,61 |

**Tabla 2.8 Coeficientes de desempeño EER**

|              | $Q_1$                              | $Q_2$                             | EER  |
|--------------|------------------------------------|-----------------------------------|------|
| <b>Sec 1</b> | $3308 * 0,307 * (12 - 19) = -7109$ | $4000 * 0,307 * (22 - 19) = 3684$ | 2,07 |
| <b>Sec 2</b> | $4324 * 0,307 * (19 - 26) = -9292$ | $4000 * 0,307 * (22 - 19) = 3684$ | 1,65 |
| <b>Sec 3</b> | $1842 * 0,307 * (26 - 33) = -5655$ | $4000 * 0,307 * (22 - 19) = 3684$ | 2,87 |

Se asumen como valores críticos los rendimientos más altos encontrados, y se seleccionan para las especificaciones de las bombas de calor rendimientos: COP de 7,5 y EER de 3,0.

**2.4.5 Cálculo de la potencia del equipo.** Capacidad del equipo para tratar el aire de un local y compensar las pérdidas y cargas de calor. Se puede expresar en Btu/h o en Toneladas de Refrigerante. Una tonelada (TR) equivale a 12000 Btu/h. Matemáticamente y apoyándose en la sicrometría este cálculo puede realizarse mediante un procedimiento<sup>10</sup> que consiste en encontrar las entalpías<sup>11</sup> de entrada y de salida del serpentín o intercambiador de calor, para resolver la ecuación de descarga de refrigeración.

Todo el procedimiento requiere de conocimiento especializado en sicrometría y particularmente de un gráfico sicrométrico que represente con exactitud las variables de la localidad.

En la práctica este valor se determina considerando una aproximación establecida por expertos en sistemas de climatización de acuerdo al área del local que se desea acondicionar, para una altura promedio de 2,5 m, como es el caso del área de incubación del laboratorio. La relación establecida para determinar la capacidad del equipo en toneladas de refrigerante considerando el área del local es la siguiente: para un local de altura normal (2,5 m) y con área entre 20 a 25 m<sup>2</sup> se establece un valor de 1 tonelada de refrigerante, equivalente a 12000 BTU<sup>12</sup>. Considerando que cada sección climática tiene un área de 53m<sup>2</sup> y tomando un área base de 20m<sup>2</sup> se tiene:

$$53\text{m}^2 / 20\text{m}^2 = 2,65 \text{ TR (Toneladas de Refrigerante por sección).}$$

---

<sup>10</sup> Extraídos de las memorias del curso “climatización en cuartos limpios” Cali, junio de 2005 por el ingeniero Camilo Botero de Consultores Ltda.

<sup>11</sup> Entalpía describe la cantidad total de energía, tanto sensible como latente, en una libra de aire en su presente condición. Expresado en Btu por libra de aire seco (Btu/lb)

<sup>12</sup> Esta relación fue suministrada en asesorías por parte del SENA regional Valle y la empresa MATEC fabricante de equipos de climatización.

Debido al aislamiento intencional de las secciones controladas, las pérdidas se consideran casi despreciables. Las cargas térmicas que debe contrarrestar el equipo para el cálculo de las toneladas de refrigerante, se adicionan al valor de toneladas de refrigerante encontradas en el cálculo anterior. De esta forma se tiene en cuenta, primordialmente, la carga térmica producida por el sistema de iluminación. Los valores de carga se deben expresar igualmente en TR, siguiendo las relaciones de conversión:  $\frac{1}{4}$  Kcal = 1 BTU y 12000 BTU = 1 TR. En la tabla 2.9 se indica el total de toneladas de refrigerante necesarias para el equipo bomba de calor de cada sección.

**Tabla 2.9 Toneladas de refrigerante por sección**

|                  | <b>Toneladas por Área</b> | <b>Toneladas por Carga Térmica</b> | <b>Toneladas totales por Sección</b> |
|------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| <b>Sección 1</b> | 2,65                      | 0,232                              | 2,88                                 |
| <b>Sección 2</b> | 2,65                      | 0,219                              | 2,87                                 |
| <b>Sección 3</b> | 2,65                      | 0,210                              | 2,86                                 |

Teniendo en cuenta además las cargas por persona en el corredor y por infiltraciones por la puerta principal, se aproxima el valor de las toneladas de refrigerante a 3 TR.

## **2.5 CONSIDERACIONES SOBRE PARTES CONSTITUTIVAS, ACCESORIOS Y OTROS**

Cada bomba debe instalarse fuera del laboratorio, adyacentes a la pared posterior (NW), sobre una plataforma de concreto debidamente empotrada y una cubierta en lámina de aluminio que la proteja de la intemperie. Debe proveerse la acometida eléctrica que suministre la alimentación al equipo. Además debe proyectarse la conexión de la señal de referencia, que se marca en un display digital ubicado en la pared interna entre las secciones y el corredor de acceso, y el controlador ubicado en la bomba de calor. Para esto será necesario llevar las señales por cables resguardados en canaletas (por encima del cielorraso de cada sección).

- **Elección del refrigerante.** (Ver Anexo C). La selección del refrigerante se realiza de acuerdo con, la aplicación del refrigerante. La selección debe hacerse de acuerdo con las propiedades físicas ideales requeridas para obtener un buen

funcionamiento, tales como: poseer unas características físicas y térmicas que permitan la máxima capacidad de refrigeración con la mínima demanda de potencia. Ser químicamente inerte hasta el grado de no ser inflamable, ni tóxico, ni explosivo, tanto en estado puro como cuando esté mezclado con el aire en determinada proporción. No reaccionar desfavorablemente con la humedad. Su naturaleza será tal que no contamine los productos almacenados en caso de fuga y finalmente ha de ser de bajo precio y fácil disponibilidad.

El refrigerante mas utilizado actualmente en la aplicación de aire acondicionado es el R-22. El reglamento (CE) N° 2037/2000 del protocolo de Montreal regula la utilización del **R22**, en la cual se establece un calendario para el uso de este refrigerante y se prohíbe su uso para el año 2010. Los candidatos más importantes como sustitutos son: **R410A, R407C o R134A**. En el momento de la compra de los equipos se debe elegir uno de estos refrigerante, ya que aunque su costo sea un poco más alto, a largo plazo evitará molestias en adecuaciones y cambios de los equipos.

- **Elección de Filtros.** La operación de filtrado es siempre indispensable y se establece según el tipo y la cantidad de elementos que se deseen filtrar. Conforme a la característica de asepsia máxima del laboratorio se requiere de un alto porcentaje de filtración del aire a tratar. Existen dos opciones: trabajar con un filtro del 99,7% de filtración cuyo valor oscila alrededor de un millón de pesos, o, trabajar con dos filtros, uno del 35% que viene con el equipo acondicionador y adquirir otro filtro del 65%. Con el uso de estos dos filtros se garantiza un alto porcentaje de filtración a un menor costo; a demás la composición de estos filtros los hace lavables favoreciendo los costos de mantenimiento del equipo. Un filtro de 99,7% debe renovarse cada 6 meses, un filtro del 65% debe renovarse después de 3 mantenimientos cada tres meses. Otro factor a tener en cuenta en

la elección del filtro, es que el uso de un filtro del 99,7% de filtración demanda mayor capacidad en el equipo de acondicionamiento, aumentando los CFM's y por tanto las toneladas de refrigerante, debido a que en este se presenta mayor oposición al paso del aire a tratar.

- **Controlador.** Aunque se asume que el equipo bomba de calor trae incorporado el controlador, se realizan las siguientes consideraciones. Para el funcionamiento de la bomba de calor, primero se controla sobre la válvula de tres vías la dirección del refrigerante según se trabaje en ciclo de refrigeración o de calefacción. En el ciclo de calefacción se debe ejercer control adicional sobre la presión del compresor que determina la temperatura del refrigerante en el intercambiador de calor (que actúa como condensador). En el ciclo de refrigeración se controla la presión en la válvula de expansión para determinar la temperatura del refrigerante en el intercambiador (que actúa como evaporador).

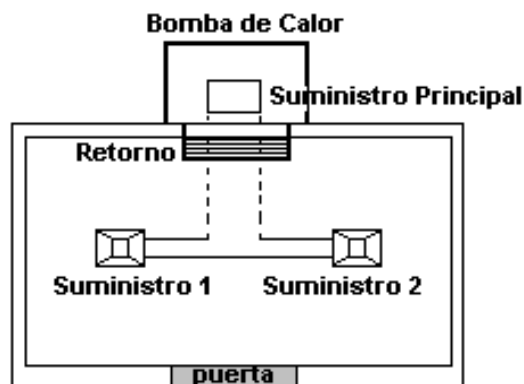
Para el control del ciclo a trabajar se requiere de una señal del controlador a la válvula. La señal de entrada al controlador será el resultado de la comparación del *set point* y la señal de temperatura del sensor. Para el control de la presión sobre el compresor y la válvula de expansión se requiere como primera medida de una acción proporcional (P). Con el objetivo de tener la posibilidad de hacer que el error entre la señal de referencia y la temperatura del local sea cero, se adiciona la necesidad de una acción integral (I). Otras características opcionales para el controlador, que garantizarían a futuro la integración de los equipos o la implementación de un sistema supervisorio, son: capacidad de comunicación con algún protocolo, acceso remoto por Internet o programación remota.

**Sensor.** Dado que el control de la temperatura solo requiere la señal de esta variable como realimentación del sistema, solo se hace uso de un sensor de temperatura, que dependerá del controlador que utilice de la Bomba de calor. El sensor debe ubicarse en el conducto, junto a la rejilla de retorno. Debido a que la condición del aire de retorno indica la temperatura del aire en las partes más alejadas de los suministros.

- **Rejillas.** Se llaman así a las bocas de suministro y retorno en los locales tratados climáticamente; son por tanto una especie de ventanas de transición y paso entre los conductos. En el presente diseño se realizan algunas recomendaciones basadas en la bibliografía “Climatización - Cálculo e instalaciones, José Fernández, 1980. Págs. 158 - 161”. Como primera medida se propone para el retorno el uso de una rejilla tipo pared perforada, ya que esta permite la extracción de un mayor volumen de aire por unidad de superficie del local que con otros tipos de rejillas y con menor riesgo de corrientes de aire. Su ubicación debe ser opuesta al suministro y cerca del equipo bomba de calor para que el conducto sea corto y la capacidad del extractor sea menor. Por lo tanto se propone que se ubique en la parte central inferior de la pared posterior del laboratorio. Para el suministro se recomiendan rejillas con deflectores, que pueden ubicarse en paredes, techos y suelos, siendo fácilmente adaptables a la arquitectura del local; también ofrecen la ventaja de ir fijas o ajustables y esto permite mayor libertad en cuanto a su ubicación. Ya que la función de los deflectores es distribuir el aire en diferentes direcciones, se recomienda 2 rejillas con mínimo 4 deflectores de 90°. Las rejillas deberán ubicarse en el cielorraso, equidistantes entre sí, cada una en el centro formado por 4 bloques de almacenamiento.

- **Conductos.** Por conductos, se entiende el conjunto de tubos y accesorios que permiten el transporte y distribución del aire tratado en la bomba de calor hasta la sección a climatizar. Los sistemas de distribución se clasifican como de alta o baja velocidad. Para este caso, se clasifica el sistema como de baja velocidad, ya que, no hay restricciones sobre el espacio disponible. Al ser un sistema de baja velocidad, no se tendrá necesidad de silenciadores. Para determinar tentativamente las dimensiones de los conductos se sigue el método de rozamiento constante, que puede esbozarse así: se efectúa el trazado de los conductos, adecuado a la conveniente distribución del aire tratado, adaptándose a la estructura del edificio y procurando la mayor sencillez, precisando la posición de las bocas de aire o rejillas. En la figura 2.5 se indica una posible distribución de conductos y ubicación de las rejillas de suministro y retorno.

**Figura 2.5 Vista superior del sistema de suministros y retorno**



Se fija la posición y el tamaño de los ramales que van a las bocas de aire con base en el volumen a suministrar y la velocidad de salida. Como ya se determinó un caudal de suministro de 2500 cfm, por cada ramal deberán suministrarse 1250 cfm. La velocidad de salida, se determina de acuerdo a velocidades ya establecidas para diferentes tipos de aplicaciones. Así, para un sistema de



baja velocidad, como un laboratorio, la velocidad de salida debe ser 9 m/s, igual en los ramales, y en el conducto principal debe ser mayor, aprox. 12 m/s.

Entonces, por el conducto principal pasan 70,79 m<sup>3</sup>/min, (2500 cfm) a una velocidad de 720 m/min (12 m/s). El sección del conducto principal, será, de 70,79:720 = 0,098 m<sup>2</sup>. Este valor indica las dimensiones de un conducto rectangular. Por los ramales pasan 35,39 m<sup>3</sup>/min (1250 cfm) a una velocidad de 540 m/min. Así para cada ramal, la sección del conducto debe ser de 35,39:540 = 0,065 m<sup>2</sup>. Con las dimensiones de los conductos, se calculan las pérdidas por rozamiento en cada uno de ellos. Para esto es necesario encontrar el diámetro equivalente del conducto rectangular. Suponiendo los conductos de forma cuadrada, las dimensiones del conducto principal serán de 0,31 por 0,31 m, para los ramales 0,25 por 0,25 m. La expresión que relaciona las dimensiones a y b del conducto rectangular con el diámetro equivalente D, es:

$$D = 1,265 \sqrt[5]{\frac{(ab)^3}{a+b}}$$

De este modo se tiene que, el diámetro del conducto principal es de 0,34 m, y el diámetro equivalente para los ramales es de 0,27 m.

Ahora se calculan las perdidas por rozamiento en el conducto principal, utilizando una herramienta gráfica (ver Anexo E) donde se relacionan el caudal a manejar en el conducto con el diámetro equivalente y se obtiene los valores de las perdidas de presión en mm de agua, por cada metro lineal de conducto. Con la herramienta gráfica, en el conducto principal, con un caudal de 1,18 m<sup>3</sup>/s (70,79 m<sup>3</sup>/min) y un diámetro de 0,31 m, se obtiene un factor de pérdida de carga unitaria de 0,6 mm de agua por cada metro lineal de conducto.

Considerando que la bomba de calor, tenga una altura de 0,5 m, y que el suministro este en la parte superior de esta, se estima que la longitud del conducto principal será la longitud desde la bomba de calor hasta el cielo raso (2 m) más la longitud de la pared posterior al centro de la sección (2,5 m), para un total de 4,5 m aproximadamente. Según lo anterior, el conducto principal tendrá una pérdida (H) de presión de:

$$H_{PPAL} = 0,6 \text{ mm/m} \times 4,5 \text{ m} = 2,7 \text{ mm de agua, en el conducto principal.}$$

El método de rozamiento constante establece que se puede considerar el mismo factor de pérdida de carga unitaria calculado para el conducto principal, para todos los ramales y accesorios tales como codos, variaciones en el área de la sección transversal del conducto y rejillas. Así, se tiene que, por cada ramal de 2,4 m de longitud, habrá una pérdida de:

$$H_{RA} = 0,6 \text{ mm/m} \times 2,4 \text{ m} \times (2 \text{ ramales}) = 2,88 \text{ mm de agua, en los ramales.}$$

Para el cálculo de pérdida en los codos, es necesario, encontrar la longitud equivalente del codo en longitud de conducto. Para esto se hace uso del coeficiente<sup>13</sup> "L" que relaciona la longitud equivalente ( $L_E$ ) con el diámetro (D) del conducto. Para un codo liso de 90° el coeficiente es:  $L = 9$ . La longitud equivalente del codo será:

$$L_E = L \times D$$
$$L_E = 9 \times 0,34 \text{ m} = 3,06 \text{ m}$$

Usando el mismo método, se calcula que la longitud equivalente para los codos en los ramales es de:

---

<sup>13</sup> Según la figura 8.14 "Pérdida de carga en codos de sección circular, expresada como longitud equivalente de conducto recto,  $L_e$ ". Texto: Climatización, Cálculo e instalaciones, 1980, Pág.151.

$$L_E = 9 \times 0,27 \text{ m} \times (2 \text{ codos de ramal}) = 4,86 \text{ m}$$

Por lo tanto, la longitud equivalente de todos los codos es de 7,92 m. La pérdida de presión en los codos relacionada por la longitud equivalente es de:

$$H_{CO} = 0,6 \text{ mm/m} \times 7,92 = 4,75 \text{ mm de agua en los codos}$$

Las pérdidas de presión debidas a los cambios de sección transversal de los conductos se calculan teniendo en cuenta la siguiente ecuación:

$$H = C \left( \frac{V_1 - V_2}{243} \right)^2$$

Donde:

H = pérdida de presión en mm de agua

V<sub>1</sub> = velocidad en m/min en el conducto principal

V<sub>2</sub> = velocidad en m/min en los ramales

C = coeficiente que depende del ángulo de divergencia del conducto. Para este caso se toma el mayor ángulo de divergencia<sup>14</sup> posible (60°), para el cual, el valor del coeficiente<sup>15</sup> C es de 1.

$$H = 1 \left( \frac{720 - 540}{243} \right)^2 = 0,55 \times (2 \text{ ramales}) =$$

$$H_{CA} = 1,1 \text{ mm de agua en los cambios de conducto ppal a ramales}$$

Finalmente, el cálculo de pérdidas de presión por las rejillas se estima según la siguiente fórmula y considerando un coeficiente de 1, predeterminado para rejillas:

---

<sup>14</sup> El ángulo de divergencia no debe ser mayor de 60°.

<sup>15</sup> Tomado de la tabla 23.3 del texto: "Instalaciones en los Edificios", Pág. 320

$$H = C \left( \frac{V}{243} \right)^2 \quad \text{con } H = 1 \left( \frac{540}{243} \right)^2 = 4.93 \times (2 \text{ rejillas}) =$$

**H<sub>RE</sub> 9,86 mm de agua en las rejillas**

- **Ventiladores.** Se establece la necesidad de un ventilador mural helicoidal para la extracción del aire a la bomba de calor, en el circuito de retorno; y un ventilador centrífugo para impulsar el aire a través de los conductos diseñados. Para el ventilador del circuito de suministro se especifica que debe manejar un caudal de aire de 70,79 m<sup>3</sup>/min (2500 cfm), venciendo la presión asociada a las pérdidas de carga totales por rozamiento en los conductos, con una velocidad en la salida de los conductos de suministro de 9 m/s. El total de pérdidas de carga por rozamiento en los conductos de suministro es igual a la suma de las pérdidas de carga por el conducto principal, por los ramales, por los codos, por los cambios de sección transversal y por las rejillas:

$$H_{\text{TOTAL}} = H_{\text{PPAL}} + H_{\text{RA}} + H_{\text{CO}} + H_{\text{CA}} + H_{\text{RE}}$$

$$H_{\text{TOTAL}} = 2,7 + 2,88 + 4,75 + 1,1 + 9,86 = 21,29 \text{ mm de agua}$$

Este dato se suministra al fabricante o proveedor para determinar la potencia y otras características de los ventiladores necesarios.

## 2.6 PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Las especificaciones mínimas que debe cumplir el sistema para la climatización de las secciones del área de incubación del laboratorio, son:

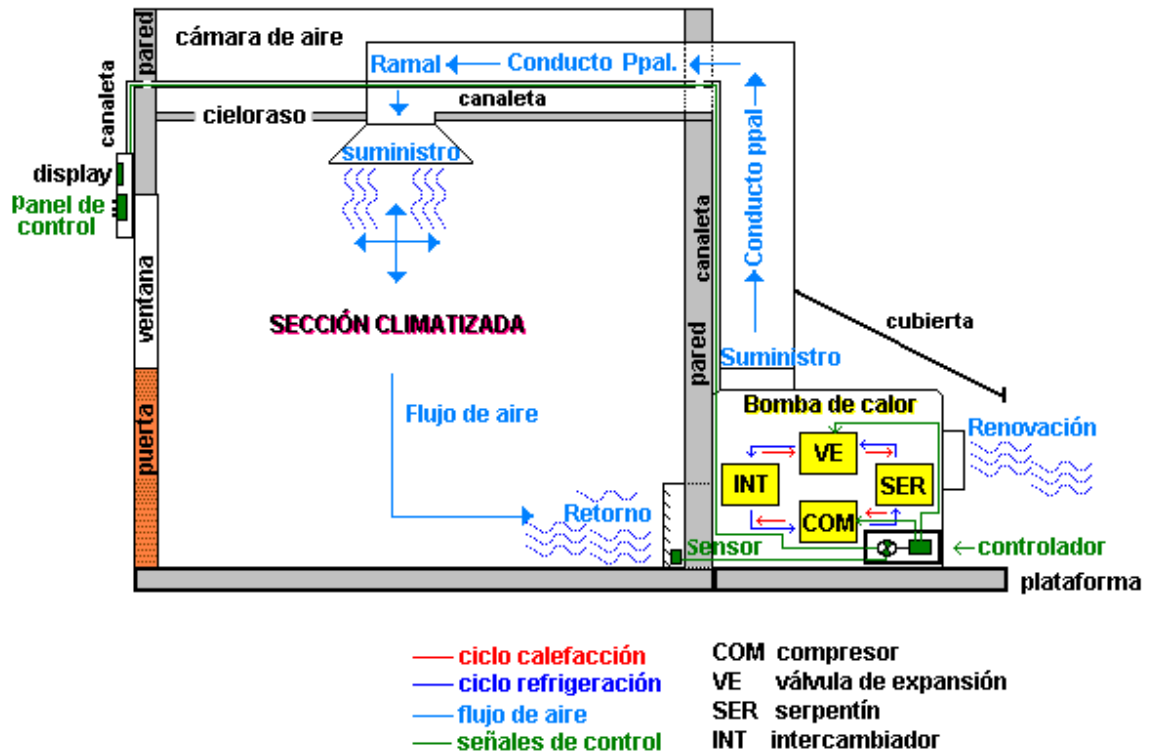
|                         |  |
|-------------------------|--|
| Equipo                  | Bomba de Calor, Central, Compacto, Todo aire   |
| Instalación             | Individual (para cada sección)<br>Exterior con protección a la intemperie<br>Ubicación: adyacente a las paredes ext. 3.2, 2.1 y 1.2  |
| Capacidad               | 3 Toneladas de Refrigerante  |
| Caudal de impulsión     | 2500 cfm   |
| Caudal de renovación    | 150 cfm  |
| Caudal de recirculación | 2350 cfm   |
| Renovaciones por hora   | entre 6 y 10   |
| Filtro:                 | doble filtrado 35% y 65%   |
| Refrigerante            | R410A, R407C o R134A   |
| T° del refrigerante     | entre -5 °C y +50 °C   |
| COP                     | 7,5  |
| EER                     | 3,0  |
| Suministro              | 2 rejillas con 4 deflectores de 90 grados c/u<br>Ubicación: cielorraso, centro de sección, equidistantes   |
| Retorno                 | 1 rejilla tipo pared perforada<br>Ubicación: parte inferior, paredes ext. 3.2, 2.1 y 1.2   |
| Conducto suministro     | Principal desde parte superior de la bomba de calor hasta altura justo por encima del cielo raso, con giro de 90° hasta el centro de la sección, donde con una "T" se derivan 2 ramales. |

|                        |  |
|------------------------|--|
| Conducto de retorno    | Desde rejilla de retorno a la toma de recirculación, directamente a través de la pared.            |
| Ventilador suministro: | Tipo: centrifugo, caudal: 2500 cfm, velocidad de salida: 9m/s, pérdidas de carga: 21,29 mm de agua |
| Ventilador retorno:    | Tipo: Mural helicoidal   |

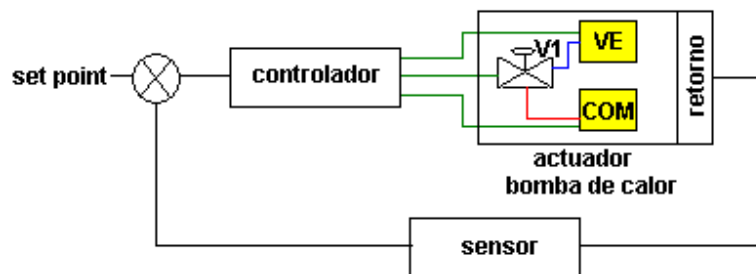
Una vista del sistema a instalar se muestra en la figura 2.6. En este esquema se tienen en cuenta algunas consideraciones hechas por personal especializado en equipos de climatización, en cuanto a la ubicación de rejillas y bomba de calor. Además en la figura, se indica el esquema del sistema de control, relacionando los diferentes elementos de control, con los equipos establecidos en el diseño del sistema de control de temperatura. Cabe decir que es una propuesta, y esta sujeta a las consideraciones que se hagan en el momento de la instalación por parte de la empresa o personas expertas en el montaje de estos equipos.

## 2.7 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE TEMPERATURA

Figura 2.6 Esquema del sistema de control de temperatura (vista lateral)



### ESQUEMA DE CONTROL



V1 válvula inversora de ciclo (calefacción o aire acondicionado)

### **3. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN**

El sistema de control de iluminación requiere que se pueda determinar la cantidad de luz dentro de un rango de 2000 a 7000 luxes, de acuerdo a la etapa de crecimiento en que se encuentren los cultivos dentro del laboratorio. El sistema además debe controlar fotoperíodos de 12 a 16 horas de iluminación simulando la condición ambiental día - noche.

#### **3.1 ELECCIÓN DEL TIPO DE LÁMPARAS A UTILIZAR**

Existen dos grandes tipos de luces utilizadas para este tipo de aplicación: de incandescencia y fluorescentes. Las características del proyecto y del funcionamiento de estos dos tipos de alumbrado, y los aparatos de iluminación, las lámparas y los accesorios son tan radicalmente distintos que la elección del sistema debe hacerse basándose en la información más completa.

Hay dos clases de lámpara de filamento o incandescencia: las de vacío y las de atmósfera gaseosa. Considerando que la mayor parte de la energía eléctrica se consume al mantener el filamento a una temperatura elevada, sólo una pequeña proporción se convierte en luz visible, por lo que el rendimiento oscila entre el 6 y el 9% para lámparas de vacío y entre el 7 y el 12 % para las grandes lámparas con atmósfera gaseosa. Esta luz es rica en radiaciones rojas y anaranjadas y su tono de color es un blanco crema. Las lámparas de incandescencia se fabrican de diferentes formas (**A**, estándar o normal; **G**, globo; **S**, recta; **T**, tubular; **PS**, pera), tamaños y potencias luminosas.



Por su parte, la lámpara fluorescente es un dispositivo de descarga eléctrica empleado para aplicaciones generales de iluminación. Se trata de una lámpara de vapor de mercurio de baja presión contenida en un tubo de vidrio, revestido en su interior con un material fluorescente conocido como fósforo. La radiación en el arco de la lámpara de vapor hace que el fósforo se torne fluorescente. La mayor parte de la radiación del arco es luz ultravioleta invisible, pero esta radiación se convierte en luz visible al excitar al fósforo. Las lámparas fluorescentes funcionan usualmente por pares, con un equipo auxiliar destinado a estabilizar el arco y reducir fluctuaciones de la luz. Mediante un condensador (de desfasaje) en el circuito de una de las lámparas, se elimina el excesivo efecto estroboscópico producido por los circuitos de una sola lámpara.

Las lámparas fluorescentes se clasifican según la forma, el diámetro del tubo, la longitud, y potencia. Además, en general, requieren de un dispositivo que les proporcione las condiciones eléctricas necesarias llamado balasto; este puede ser electrónico o electromagnético, y es acorde al número de tubos y potencia (o tamaño del o los tubos).

Una de las ventajas más importantes de las lámparas fluorescentes sobre las de incandescencia es la de que las primeras tienen una duración de 7500 horas contra 1000 horas de las incandescentes; y que la cantidad media de lúmenes por vatio consumido, incluyendo en este consumo el de las propias lámparas como el de los accesorios, es de el 200 al 400 mayor en las fluorescentes que en las incandescentes.

**Tabla 3.1 Comparación entre algunas características de las lámparas I y F**

| #  | Características de las lámparas                               | Notas | F | I |
|----|---|-------|---|---|
| 1  | Duración probable de la lámpara                               | A     | + | - |
| 2  | Costo de la lámpara sola                                      |       | - | + |
| 3  | Costo de todo el grupo de lámparas                            |       | - | + |
| 4  | Costo de lumen-hora / vatio de la lámpara con accesorios      | B     | + | - |
| 5  | Costo del aparato por lumen-hora                              | B     | + | ? |
| 6  | Costo del número necesario de aparatos                        |       | - | + |
| 7  | Costo del consumo por aparato por lumen-hora                  |       | + | - |
| 8  | Costo total de todos los aparatos                             | C     | - | + |
| 9  | Lúmenes por vatio iniciales de la lámpara (promedio) F=45;    | D     | + | - |
| 10 | Costo de la limpieza de los reflectores del aparato           |       | - | + |
| 11 | Rendimiento relativo del aparato                              | E     | - | + |
| 12 | Rendimiento de la lámpara a un voltaje superior al normal     | F     | - | + |
| 13 | Rendimiento de la lámpara a un voltaje inferior al normal     |       | + | - |
| 14 | Condiciones de encendido                                      | G     | - | + |
| 15 | Disminución de la duración por frecuentes encendidos          |       | - | + |
| 16 | Gastos por renovación de arrancadores, reactancias, contactos | H     | - | + |
| 17 | Pérdidas por superficies reflectoras sucias                   |       | - | + |
| 18 | Encendido instantáneo   | I     | - | + |
| 19 | Parpadeo, formación de arco, inseguridad en el encendido      | J     | - | + |
| 20 | Envejecimiento  | K     | - | + |
| 21 | Funcionamiento deficiente por cambio de temperatura           |       | - | + |
| 22 | Uso de dos o más lámparas en un aparato                       | L     | - | + |

**NOTAS:**

- A. Los dos factores destacados de mayor importancia son: la lámpara fluorescente produce aproximadamente el doble de lúmenes por vatio; y su duración media es de unas 8 a 10 veces la de una lámpara incandescente.
- B. Para la duración nominal de la lámpara.
- C. Coste de los aparatos completos, instalación y conexiones.
- D. Valores aproximados después de 100 horas de funcionamiento.
- E. La mayoría de aparatos fluorescentes, con los mismos coeficientes de distribución fotométrica de la luz que en aparatos de incandescencia, tienen menor rendimiento.
- F. Rendimiento en lúmenes por vatio (pero su duración disminuye)
- G. El encendido es influido por las temperaturas y el bajo voltaje.
- H. En las lámparas de incandescencia no hay accesorios.
- I. Las lámparas fluorescentes de pequeño diámetro se encienden instantáneamente.
- J. A causa de envejecimiento, defectos en el arrancador o la reactancia, bajo voltaje, variaciones de temperatura indebidas, etc.
- K. Favorable a los aparatos de incandescencia, ya que los aparatos de fluorescencia sufren cambios con mayor frecuencia.
- L. El rendimiento de un aparato disminuye cuando se le añaden lámparas; la disminución suele ser de un 2% por cada lámpara que se le añade, pasando de dos.

En la tabla 3.1 se proporcionan datos comparativos sobre las lámparas fluorescentes **de 2 a 40 vatios** e incandescentes **de 1 a 100 vatios**. Con el signo “+” se indica una condición favorable en una característica determinada; el caso menos favorable se indica con un signo “-”.

Un criterio importante en la selección son las horas de vida útil de lámparas y dispositivos asociados. Una de las ventajas más importantes de las lámparas fluorescentes es la mayor cantidad de horas de vida útil respecto a las lámparas de incandescencia, que es, aún mayor cuando se trabaja con lámparas fluorescentes electrónicas, lo que se traduce en menor costo de sustitución. La cantidad media de lúmenes por vatio consumido, es mayor en las fluorescentes que en las incandescentes.

Para esta elección se tiene en cuenta principalmente elegir luminarias que generen el menor calor posible a fin de disminuir la carga térmica por alumbrado al sistema de control de temperatura, y favorecer las condiciones químicas y físicas de los cultivos. Después de analizar las características de cada tipo de luz se propone trabajar con lámparas fluorescentes, también conocidas como “lámparas de luz fría”, que generan menos calor que las de incandescencia, y mejor desempeño.

Otros criterios a tener en cuenta en la selección de los dispositivos asociados al funcionamiento de las lámparas seleccionadas, son:

Ya que los accesorios y los tubos se van a ubicar en un ambiente con valores altos de humedad relativa (70%), si la concentración de agua logrará afectar el

normal funcionamiento o disminuir su vida útil, es preferible mantener la menor cantidad de dispositivos con características vulnerables. Deben ser preferiblemente lámparas de encendido instantáneo, evitando la necesidad de chispa de encendido (start).

Como gran parte del calor que generan las lámparas fluorescentes se debe a los balastos electromagnéticos se debe considerar la posibilidad de aislarlos por cableado, teniendo en cuenta las disposiciones acerca de distancias máximas a las que se pueden aislar sin afectar el correcto funcionamiento. Otra opción es buscar un dispositivo que no presente este inconveniente, por ejemplo, las lámparas fluorescentes de tecnología electrónica, brindan un menor consumo de energía eléctrica y el calor que disipan es menor. En este sentido es preferible usar balastos electrónicos.

**3.1.1 Opciones de control de cantidad de luz.** Teniendo en cuenta los criterios anteriormente expuestos se presentan dos opciones para realizar el control de la cantidad de luz.

- **Control a través de balastos atenuables.** Estos balastos permiten variar a través de un dimmer el voltaje de alimentación a las lámparas para, así, poder controlar la cantidad de luz. Esta opción brinda mayor uniformidad en la distribución de luz en todos los puntos del peldaño y con mayor facilidad se obtiene los puntos de control deseados en el rango de 2000 a 7000 luxes. El inconveniente del uso de estos balastos es su alto costo frente al costo de los balastos normales, especialmente si se tiene en cuenta que un balasto atenuable solo pueden manejar máximo 2 tubos.

- **Control a través de un arreglo de lámparas.** Con esta opción, se propone trabajar un arreglo de lámparas y diseñar un juego de encendido que permita variar en un número determinado de elecciones la cantidad de luz. En esta opción, la distribución de la luz se debilita y se limita la posibilidad de desplazarse sobre el rango de control en cierta cantidad de puntos. La ventaja es la disminución de los costos de implementación y mantenimiento, pues la propuesta se desarrolla con balastos convencionales.

Comercialmente, al momento de esta investigación, un balasto electromagnético tiene un valor de \$11.900, un electrónico \$49.000 y un atenuable tiene un precio de \$380.000; de donde se concluye que los dispositivos atenuables tienen un costo de entre 8 y 30 veces el valor de los balastos convencionales. Por los argumentos expuestos, se prefiere la utilización de balastos electrónicos en la opción de arreglos de lámparas, y se descarta la propuesta basada en balastos atenuables.

**3.1.2 Selección del tipo de luz.** En cuanto a lámparas fluorescentes, existen varios tipos de luz; dentro de las convenientes para esta aplicación se pueden distinguir:

- **Lámparas fluorescentes Cool White.** Son las que comúnmente se usan en hogares y el comercio.
- **Lámparas fluorescentes Grolux.** Especiales para estimular el crecimiento de las plantas en lugares con escasa luz día, proporcionando el correcto equilibrio entre las energías de la luz azul y roja, y combinando en una única fuente las necesidades energéticas. **Características:** Produce energía

radiante en longitudes de onda que estimulan el crecimiento de las plantas, Estimula el proceso de síntesis de la clorofila y fotosíntesis. **Aplicaciones:** iluminación completa o aditiva de las plantas; invernaderos, jardines botánicos, floristerías; plantas de acuario.

- **Lámparas Fluorescentes Activa o Day Light.** Fuente de luz de espectro completo y alta fidelidad cromática con tonalidad próxima a la luz día. La discreta adición UV es física y psicológicamente beneficiosa para el hombre. **Características:** fidelidad cromática natural, temperatura de color 6.500%; aplicación en todo lugar donde la luz tenga una influencia directa en el bienestar.

A continuación se presenta, en la tabla 3.2, la información sobre los diferentes tipos de lámparas de luz fría, suministrada por la empresa Sylvania de Colombia S.A.

**Tabla 3.2 Información técnica de diferentes tipos de lámparas Fluorescentes**

| Tipo de luz       | Diámetro Tubo (mm) | Potencia Tubo (Vatios) | Flujo Tubo (Lúmenes) | Largo Tubo Largo (Mt) | Horas de Vida | Tipo de Arranque |
|-------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-----------------------|---------------|------------------|
| <b>Grolux</b>     | T12                | 20                     | 540                  | 0,6                   | 9000          |                  |
|                   | T12                | 40                     | 1575                 | 1,2                   | 12000         |                  |
|                   | T12                | 48                     | 1400                 | 1,2                   | 9000          | Instantáneo      |
|                   | T12                | 96                     | 3300                 | 2,4                   | 12000         | Instantáneo      |
| <b>Cool White</b> | T8                 | 17                     | 1150                 | 0,6                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 30                     | 2100                 | 1,0                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 32                     | 2100                 | 1,2                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 36                     | 2100                 | 1,2                   | 20000         | Instantáneo      |
|                   | T12                | 15                     | 650                  | 0,5                   | 7500          |                  |
|                   | T12                | 20                     | 1020                 | 0,6                   | 9000          |                  |
|                   | T12                | 40                     | 2700                 | 1,2                   | 12000         |                  |
|                   | T12                | 48                     | 2600                 | 1,2                   | 9000          | Instantáneo      |
|                   | T12                | 96                     | 6100                 | 2,4                   | 12000         | Instantáneo      |
| <b>Day Light</b>  | T8                 | 14                     | 485                  | 0,4                   | 12000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 15                     | 610                  | 0,5                   | 12000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 17                     | 1000                 | 0,6                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 30                     | 1900                 | 1,0                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 32                     | 2100                 | 1,2                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T8                 | 36                     |                      | 1,2                   | 15000         | Instantáneo      |
|                   | T12                | 14                     | 510                  | 0,4                   | 7500          |                  |
|                   | T12                | 15                     | 590                  | 0,5                   | 7500          |                  |
|                   | T12                | 20                     | 890                  | 0,6                   | 9000          |                  |
|                   | T12                | 30                     | 1750                 | 1,0                   | 9000          |                  |
|                   | T12                | 40                     | 2300                 | 1,2                   | 12000         |                  |
|                   | T12                | 48                     | 2200                 | 1,2                   | 9000          | Instantáneo      |
|                   | T12                | 72                     | 3800                 | 1,8                   | 12000         | Instantáneo      |
|                   | T12                | 96                     | 5400                 | 2,4                   | 12000         | Instantáneo      |
| T12               | 96 HO              | 7700                   | 2,4                  | 12000                 | Instantáneo   |                  |

En cuanto a la selección del tipo de luz más conveniente para la aplicación, se descarta el uso de Luz Activa o Day Light ya que sus características van más encaminadas a obtener ventajas en cuanto a visibilidad o fidelidad cromática que no son relevantes en la presente aplicación. Aunque las lámparas Grolux estimulan el crecimiento de las plantas, lo que las convierte en una opción atractiva, hay que tener en cuenta que dichos tubos son más costosos (\$13.000=) que los corrientes o Cool White (\$4.000=); dicha diferencia económica se convierte en un argumento de peso en la selección del tipo de luz a utilizar.

La selección final del tipo de luz, entre Grolux y Cool white, se realizará después de analizar la intensidad, potencia y longitudes de tubos a utilizar. En primera instancia se descarta el uso de lámparas de 2,4 m, ya que, además de manejar altas potencias su flujo luminoso es también alto. En dicho caso el número de grandes tubos sería pequeño, lo que se traduce en deficiencias en la distribución de la luz sobre el área a iluminar.

A continuación se analizará el área iluminar con el fin de resolver la mayor cantidad de incertidumbre en la selección de los tubos y tipo de luz:

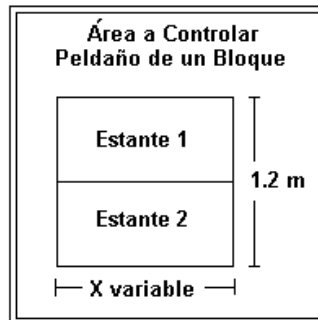
- **Determinación de las dimensiones del área a controlar.** Debido al tamaño comercial de las lámparas fluorescentes y con el fin de realizar un análisis de áreas, número de lámparas y distribución se propone realizar los cálculos para diferentes áreas. Esto puede implicar un rediseño del sistema de almacenamiento de los cultivos, es decir, las superficies a controlar deberán estar acordes a las dimensiones de las lámparas comerciales finalmente seleccionadas.



Si se asume la profundidad del peldaño de las especificaciones de la FACA, de 0,6 m, queda por elegir el ancho más apropiado para el estante; teniendo en cuenta que ajustando el ancho de los peldaños (X) al largo de los tubos, la distribución del número de lámparas solo se concentraría en el eje de profundidad de los peldaños.

El análisis se realizará de acuerdo a las dimensiones del largo del tubo, en metros, presentado en la tabla 3.2 y proyectando un control de iluminación por bloques (2 estantes), para los cuales se tendría una profundidad de 1,2 m. En la figura 3.1 se indica lo planteado en el párrafo anterior y una tabla con las posibles áreas útiles<sup>16</sup> a controlar.

**Figura 3.1 Área útil a controlar o peldaño de un bloque**



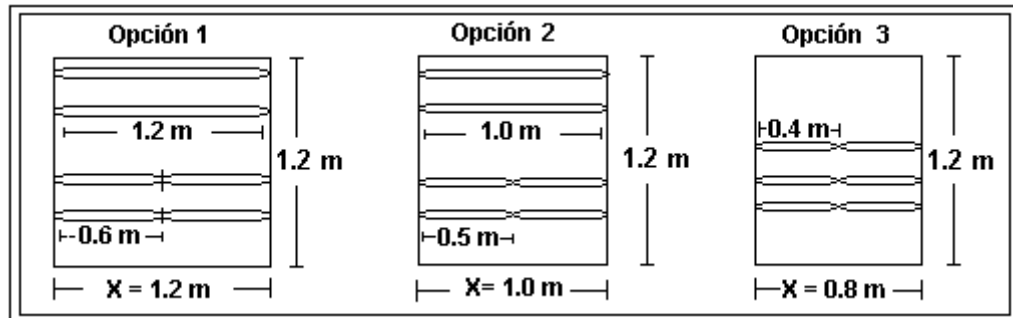
**Tabla 3.3 Posibles áreas útiles a analizar para el control de iluminación**

| Área   | Ancho X (m) | Profundidad (m) | Área (m <sup>2</sup> ) |
|--------|-------------|-----------------|------------------------|
| Área 1 | 1,20        | 1,20            | 1,44                   |
| Área 2 | 1,00        | 1,20            | 1,20                   |
| Área 3 | 0,80        | 1,20            | 0,96                   |

<sup>16</sup> Por área útil se entiende el área que relaciona: solo el largo del tubo como ancho del peldaño, por la profundidad del peldaño.

Como se muestra en la figura 3.2, las diferentes áreas posibles determinan el uso de tubos de 1,2 m o arreglos de dos tubos de 0.6 m para las áreas de 1,44 m<sup>2</sup>; tubos de 1.0 m o arreglos de dos tubos de 0,5 m para áreas de 1,2 m<sup>2</sup>; y arreglos de dos tubos de 0,4 m para áreas de 0,96 m<sup>2</sup>.

**Figura 3.2 Uso de tubos comerciales para diferentes opciones de áreas**



La cantidad de luz se va a controlar sobre cada peldaño en los estantes de almacenamiento, pero se mantiene igual la cantidad de luz en todos los peldaños de un bloque (2 estantes), es decir, un bloque tendrá en determinado momento la misma cantidad de luz en todos sus peldaños.

- **Cálculo del número de lámparas para un área útil determinada.** Se procede a determinar el número de lámparas necesarias para cubrir un rango de 2000 a 7000 luxes en el área especificada, mediante el método de los lúmenes, usando la ecuación:

$$N_L = \frac{E_{(LUX)} * A_{(m^2)}}{\Phi * \eta * f_m}$$

Donde:

$N_L$  = Número de lámparas.

$E$  = Cantidad de luz deseada, en luxes.

$A$  = Área a iluminar, en  $m^2$ .

$\Phi$  = Flujo luminoso de la lámpara, en lúmenes.

$\eta$  = Factor de utilización.

$f_m$  = Factor de mantenimiento.

El **flujo luminoso**  $\Phi$  depende de la lámpara elegida. En tabla 3.1 se indica el flujo luminoso de los diferentes tipos de lámparas.

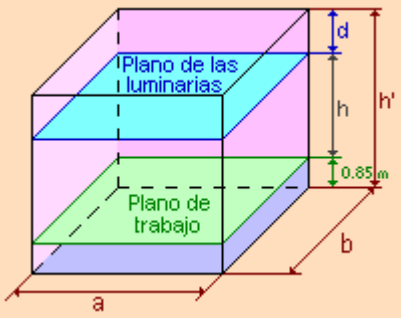
El **factor de utilización** ( $\eta$ ) se determina a partir del índice del local y los factores de reflexión. En la tabla 3.4 se encuentran para cada tipo de luminaria los factores de utilización en función de los coeficientes de reflexión y el índice del local. Si no se pueden obtener los factores por lectura directa será necesario interpolar.

**Tabla 3.4 Factores de utilización**

| Tipo de aparato de alumbrado | Índice del local k | Factor de utilización ( $\eta$ )   |     |     |     |     |     |     |     |     |
|------------------------------|--------------------|------------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|                              |                    | Factor de reflexión del techo      |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                              |                    | 0.7                                |     |     | 0.5 |     |     | 0.3 |     |     |
|                              |                    | Factor de reflexión de las paredes |     |     |     |     |     |     |     |     |
|                              |                    | 0.5                                | 0.3 | 0.1 | 0.5 | 0.3 | 0.1 | 0.5 | 0.3 | 0.1 |
|                              | 1                  | .28                                | .22 | .16 | .25 | .22 | .16 | .26 | .22 | .16 |
|                              | 1.2                | .31                                | .27 | .20 | .30 | .27 | .20 | .30 | .27 | .20 |
|                              | 1.5                | .39                                | .33 | .26 | .36 | .33 | .26 | .36 | .33 | .26 |
|                              | 2                  | .45                                | .40 | .35 | .44 | .40 | .35 | .44 | .40 | .35 |
|                              | 2.5                | .52                                | .46 | .41 | .49 | .46 | .41 | .49 | .46 | .41 |
|                              | 3                  | .54                                | .50 | .45 | .53 | .50 | .45 | .53 | .50 | .45 |
|                              | 4                  | .61                                | .56 | .52 | .60 | .56 | .52 | .60 | .56 | .52 |
|                              | 5                  | .63                                | .60 | .56 | .63 | .60 | .56 | .62 | .60 | .56 |
|                              | 6                  | .68                                | .63 | .60 | .66 | .63 | .60 | .65 | .63 | .60 |
|                              | 8                  | .71                                | .67 | .64 | .69 | .67 | .64 | .68 | .67 | .64 |
|                              | 10                 | .72                                | .70 | .67 | .71 | .70 | .67 | .71 | .70 | .67 |

El **índice del local (k)** se calcula a partir de la geometría de este. En el caso del método europeo se calcula como se indica en la figura 3.3.

**Figura 3.3 Cálculo del índice del local k\***

|  <p>El diagrama muestra un espacio rectangular con anchura 'a' y profundidad 'b'. La altura total es 'h'. Un plano de trabajo está situado a una altura de '0.85m' desde el suelo. La altura desde el plano de trabajo hasta el plano de las luminarias es 'h''. La distancia entre el plano de las luminarias y el techo es 'd'.</p> | Sistema de iluminación  | Índice del local                        |
|--|---|---|
|  | Iluminación directa, semi-directa, directa-indirecta y general difusa | $k = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)}$ |
| Iluminación indirecta y semi-indirecta   | $k = \frac{3 \cdot a \cdot b}{2 \cdot (h + 0.85) \cdot (a + b)}$      |   |

\* Donde k es un número comprendido entre 1 y 10. A pesar de que se pueden obtener valores mayores de 10 con la fórmula, no se consideran pues la diferencia entre usar diez o un número mayor en los cálculos es despreciable.

Los **coeficientes de reflexión de techo, paredes y suelo** se encuentran normalmente tabulados (tabla 3.5) para los diferentes tipos de materiales, superficies y acabados.

**Tabla 3.5 Coeficientes de reflexión de techo paredes y suelo**

|                | Color              | Factor de reflexión |
|----------------|--------------------|---------------------|
| <b>Techo</b>   | Blanco o muy claro | 0,7                 |
|                | Claro              | 0,5                 |
|                | Medio              | 0,3                 |
| <b>Paredes</b> | Claro              | 0,5                 |
|                | Medio              | 0,3                 |
|                | Oscuro             | 0,1                 |
| <b>Suelo</b>   | Claro              | 0,3                 |
|                | Oscuro             | 0,1                 |

El **factor de mantenimiento**. Este coeficiente dependerá del grado de suciedad ambiental y de la frecuencia de la limpieza del local. Para una limpieza periódica anual podemos tomar los siguientes valores:

**Tabla 3.6 Factor de mantenimiento**

| Ambiente | Factor de mantenimiento (f <sub>m</sub> ) |
|----------|---|
| Limpio   | 0,8                                       |
| Sucio    | 0,6                                       |

Es importante aclarar que cuando se habla de local, en este caso, se refiere al volumen existente entre dos peldaños y que las paredes, techo y suelo deben corresponder a este volumen. Así, se determina según la figura 3.3 que:

a = ancho del peldaño, b = profundidad del bloque, y h = altura entre peldaños.

Entonces los cálculos del índice del local con un tipo de Iluminación directa para las diferentes áreas, se muestran en la tabla 3.6, bajo la fórmula:

$$k = \frac{a * b}{h(a + b)}$$

**Tabla 3.7 Índices del local para diferentes áreas**

| Cálculo del índice del local |       |       |       |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| a (m)                        | b (m) | h (m) | k     |
| 1,20                         | 1,20  | 0,30  | 11,52 |
| 1,00                         | 1,20  | 0,30  | 8,80  |
| 0,80                         | 1,20  | 0,30  | 6,40  |

De acuerdo a la tabla 3.5 las paredes, techo y suelo se definen como blancos y claros, por tanto los coeficientes de reflexión son: para las paredes 0,5, el techo 0,7 y suelo 0,3. Utilizando la tabla 3.4 y con los valores de índice de local y coeficientes de reflexión se eligen los factores de utilización para cada área.

**Tabla 3.8 Factores de utilización para diferentes áreas**

| Área   | Índice de local | Coef de Reflexión |         | Factor de utilización |
|--------|-----------------|-------------------|---------|-----------------------|
|        |                 | Techo             | Paredes |                       |
| Área 1 | 10,0            | 0,7               | 0,5     | 0,72                  |
| Área 2 | 8,8             | 0,7               | 0,5     | 0,71                  |
| Área 3 | 6,4             | 0,7               | 0,5     | 0,68                  |

Los valores calculados para las diferentes áreas, mostrados en la tabla 3.8, suponen una altura de 2,5 m. El factor de utilización puede considerarse un poco mayor para espacios más pequeños. Debido a que en este caso la altura es de tan solo 30 centímetros, para los cálculos se asumirá un valor constante del factor de utilización de 0,8, sugerido por un ingeniero especialista en el área de iluminación. Asumiendo que el laboratorio es un área de máxima asepsia el factor de mantenimiento se toma como 0,8.

En la tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos del cálculo del número de lámparas necesarias para seis valores de referencias de cantidad de luz, entre 2000 y 7000 con pasos de 1000 luxes. Se utiliza el método de los lúmenes, según la ecuación:

$$N_L = \frac{E_{(LUX)} * A_{(m^2)}}{\Phi * \eta * f_m}$$

**Tabla 3.9 Cálculo del número de lámparas para diferentes áreas y tipos de luz**

| <b>Lámpara Grolux T12 de 20 vatios</b>     |                      |               | <b>Lámpara Grolux T12 de 40 vatios</b>     |                      |               | <b>Lámparas Grolux T12 de 48 vatios</b>      |                      |               |
|--|----------------------|---------------|--|----------------------|---------------|--|----------------------|---------------|
| Área:1,44                                  | Flujo luminoso: 540  |               | Área:1,44                                  | Flujo luminoso: 1400 |               | Área:1,44                                    | Flujo luminoso:1575  |               |
| Luxes                                      | Nº calculado         | Nº aproximado | Luxes                                      | Nº calculado         | Nº Aproximado | Luxes  | Nº calculado         | Nº aproximado |
| 7000                                       | 29,17                | 30            | 7000                                       | 11,25                | 11            | 7000   | 10,00                | 10            |
| 6000                                       | 25,00                | 25            | 6000                                       | 9,64                 | 10            | 6000   | 8,57                 | 9             |
| 5000                                       | 20,83                | 20            | 5000                                       | 8,04                 | 8             | 5000   | 7,14                 | 7             |
| 4000                                       | 16,67                | 16            | 4000                                       | 6,43                 | 6             | 4000   | 5,71                 | 6             |
| 3000                                       | 12,50                | 12            | 3000                                       | 4,82                 | 5             | 3000   | 4,29                 | 4             |
| 2000                                       | 8,33                 | 8             | 2000                                       | 3,21                 | 3             | 2000   | 2,86                 | 3             |
| <b>Lámpara Cool White T8 de 17 vatios</b>  |                      |               | <b>Lámpara Cool White T8 de 30 vatios</b>  |                      |               | <b>Lámpara Cool White T8 de 32-36 vatios</b> |                      |               |
| Área:1,44                                  | Flujo luminoso: 1150 |               | Área:1,20                                  | Flujo luminoso: 2100 |               | Área:1,44                                    | Flujo luminoso: 2100 |               |
| Luxes                                      | Nº calculado         | Nº aproximado | Luxes                                      | Nº calculado         | Nº Aproximado | Luxes  | Nº calculado         | Nº aproximado |
| 7000                                       | 13,70                | 14,00         | 7000                                       | 6,25                 | 6             | 7000   | 7,50                 | 8             |
| 6000                                       | 11,74                | 12,00         | 6000                                       | 5,36                 | 5             | 6000   | 6,43                 | 6             |
| 5000                                       | 9,78                 | 10,00         | 5000                                       | 4,46                 | 4             | 5000   | 5,36                 | 5             |
| 4000                                       | 7,83                 | 8,00          | 4000                                       | 3,57                 | 4             | 4000   | 4,29                 | 4             |
| 3000                                       | 5,87                 | 6,00          | 3000                                       | 2,68                 | 3             | 3000   | 3,21                 | 3             |
| 2000                                       | 3,91                 | 4,00          | 2000                                       | 1,79                 | 2             | 2000   | 2,14                 | 2             |
| <b>Lámpara Cool White T12de 15 vatios</b>  |                      |               | <b>Lámpara Cool White T12 de 20 vatios</b> |                      |               | <b>Lámpara Cool White T12 de 40 vatios</b>   |                      |               |
| Área: 1,20                                 | Flujo Luminoso: 650  |               | Área: 1,44                                 | Flujo luminoso: 1020 |               | Área: 1,44                                   | Flujo luminoso: 2700 |               |
| Luxes                                      | Nº calculado         | Nº aproximado | Luxes                                      | Nº calculado         | Nº Aproximado | Luxes  | Nº calculado         | Nº aproximado |
| 7000                                       | 20,19                | 20            | 7000                                       | 15,44                | 16            | 7000   | 5,83                 | 6             |
| 6000                                       | 17,31                | 17            | 6000                                       | 13,24                | 13            | 6000   | 5,00                 | 5             |
| 5000                                       | 14,42                | 14            | 5000                                       | 11,03                | 11            | 5000   | 4,17                 | 4             |
| 4000                                       | 11,54                | 12            | 4000                                       | 8,82                 | 9             | 4000   | 3,33                 | 3             |
| 3000                                       | 8,65                 | 9             | 3000                                       | 6,62                 | 7             | 3000   | 2,50                 | 3             |
| 2000                                       | 5,77                 | 6             | 2000                                       | 4,41                 | 5             | 2000   | 1,67                 | 2             |
| <b>Lámpara Cool White T12 de 48 vatios</b> |                      |               |  |                      |               |  |                      |               |
| Área: 1,44                                 | Flujo luminoso: 2600 |               | Luxes                                      | Nº calculado         | Nº Aproximado | Luxes  | Nº calculado         | Nº aproximado |
| Luxes                                      | Nº calculado         | Nº aproximado | 5000                                       | 4,33                 | 4             | 3000   | 2,60                 | 3             |
| 7000                                       | 6,06                 | 6             | 4000                                       | 3,46                 | 3             | 2000   | 1,73                 | 2             |
| 6000                                       | 5,19                 | 5             |  |                      |               |  |                      |               |

La casilla “No. Aproximado”, en la tabla 3.9, indica el número de lámparas que deben estar encendidas para lograr cierta cantidad de luxes, para los diferentes puntos de control previstos.

Finalmente, se eligen las lámparas tipo Cool White T8 de 17 vatios, justificando esta selección bajo los siguientes criterios:

- Las lámparas Cool White son más económicas que las lámparas tipo Gro-lux.
- La potencia consumida es relativamente baja.
- Las horas vida son comparativamente altas.
- El número de lámparas requerido para cubrir el rango no es tan alto, beneficiando los costos de instalación, operación y mantenimiento.
- Debido a que sus dimensiones son de 0,6 m, se favorece la distribución de la luz en los peldaños, y los posibles puntos de control.
- Con este tipo de luz, se obtuvo números enteros pares para las lámparas a utilizar para cada punto de control de cantidad de luz.

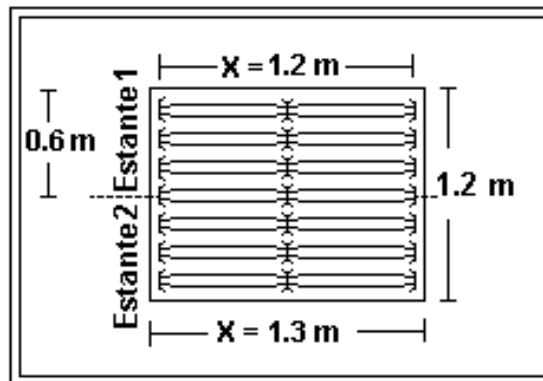
## **3.2 PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN**

**3.2.1 Rediseño del sistema de almacenamiento.** Debido a la selección de tubos Cool White T8 de 17 vatios, con 60 cm de longitud, se propone que los estantes para el sistema de almacenamiento tengan dimensiones de: 0,6 de profundidad, por 1,3 m de ancho, por 1,9 m de alto, con separación de 0,3 m entre peldaños, y distancia del piso al primer peldaño de 0,4 metros. El ancho de 1,3 contempla el tamaño mayor del chasis y los bornes que reciben los tubos.



**3.2.2 Emplazamiento o distribución de las lámparas.** Una vez se ha calculado el número y tipo de lámparas se procede a distribuirlas sobre el área del peldaño. En los locales de planta rectangular las luminarias se reparten de forma uniforme en filas paralelas a los ejes de simetría del local. Se propone ubicar las lámparas de forma paralela, en dos columnas sobre el eje que indica el ancho del peldaño, y realizando la distribución a lo largo del eje de profundidad con separaciones de 17cm aproximadamente. En la figura 3.4 se indican la distribución de las lámparas en el área calculada.

**Figura 3.4 Emplazamiento o distribución de las lámparas**



**3.2.3 Diseño del sistema de control de cantidad de luz.** Se elige desarrollar un sistema de control de cantidad de luz mediante arreglos de encendido y apagado de lámparas, ya que resulta menos costoso que por balastos atenuables. Para el control de la cantidad de luz por arreglos de encendido y apagado de lámparas se propone diseñar sistemas de control individuales e independientes para el manejo de la iluminación para cada bloque<sup>17</sup>; en la implementación se puede seguir el mismo diseño para todos los bloques.

<sup>17</sup> Cada bloque (de dos estantes) tiene 5 peldaños; a razón de 14 tubos por peldaño se tienen 70 lámparas por bloque en el circuito de control de cantidad de luz.

En cuanto al diseño de control de iluminación los principales argumentos para no realizar un circuito centralizado son: la gran cantidad de pares de cables que deberían llegar a través de las acometidas, la obra física y técnica especializada que esto implica, y la dificultad de mantenimiento correctivo. Otra desventaja surge al requerir implementación gradual después de haber entrado en funcionamiento, debido a que se podrían requerir obras físicas y técnicas adicionales para instalar más estanterías, interviniendo el ambiente aséptico de la sección climática.

Entre las ventajas de la propuesta de hacer sistemas de control individuales e independientes están: la disminución en la complejidad de instalación y cableado, la posibilidad de implementación por etapas según las posibilidades económicas de la FACA, y la posibilidad de tener en funcionamiento los bloques necesarios de acuerdo al trabajo en el laboratorio, esto es funcionamiento modular. Otra ventaja debida al uso de un procesador dedicado a un bloque es la programación simple. En caso de falla se detiene el funcionamiento de un bloque, y no todo el sistema de iluminación de una sección climática; con la sola revisión del bloque en cuestión, se puede encontrar, aislar y superar el fallo más rápidamente. Además en con esta opción se da la posibilidad de trabajar diferentes fotoperíodos en cada uno de los bloques.

Los requerimientos para instalación de dispositivos para todo el conjunto de una sección climática deben preverse apropiadamente desde el momento del diseño de la obra física a fin de disminuir la necesidad de obra especializada extemporánea. La alimentación eléctrica de los dispositivos implica el diseño de acometidas a través del piso o techo. Al respecto, se sugiere que se proyecten las acometidas de potencia desde el cielorraso; ya que en el piso se debe evitar: quiebres o hendidias que propicien la acumulación de suciedad, y obstáculos que

generen inconvenientes para la movilización del personal o dificulten el aseo de la sección climática. Otra desventaja de las acometidas desde el piso es la disminución de la flexibilidad para otras posibles acomodaciones de los estantes.

En el diseño del sistema de iluminación para un bloque, se plantea trabajar un sistema de control digital en lazo abierto, con el fin de disminuir los costos en la adquisición de sensores de cantidad de luz y realimentación del sistema. Siguiendo el concepto de modularidad, aunque podría trabajarse con un microcontrolador, se prescinde de una solución con un dispositivo desarrollado en laboratorio conformado por componentes independientes montados sobre una placa de circuito impreso, dado que implica un alto riesgo de fallos. Se prefiere un Controlador Lógico Programable (PLC) ya que es un producto construido y comprobado en fábrica. Se proyecta que la programación de encendido y apagado de las lámparas se realice a través de un PLC con un mínimo de: 6 salidas digitales y 6 entradas.

Las 6 entradas se prevén para la programación de las referencias de cantidad de luz y fotoperíodos requeridos. Para la fijación de estos Set Points se deben ubicar en el tablero de control de cada bloque los dispositivos que permitan programar la referencia. Entre las opciones económicas se proponen para esta aplicación: el uso de un teclado y *display*, o, el uso de switches de contacto que se activan o desactivan según las combinaciones apropiadas. En el primer caso es necesario crear un circuito digital que cambie las referencias numéricas digitadas por el usuario a palabras digitales de tres bits; esto significa desarrollar y montar en un circuito impreso los dispositivos digitales del caso. Se opta por la segunda opción aunque sea menos amigable al operario, por no incluir la dificultad y riesgo de fallos propios de un montaje, además de ser una alternativa práctica y muy económica.

La tabla 3.10 muestra la configuración de las 3 entradas que se requieren para fijar las referencias de cantidad de luz, con las que el PLC determinará las señales de salida necesarias para activar los relés y en consecuencia los balastos y lámparas apropiados.

**Tabla 3.10 Señales de entrada del PLC para las diferentes referencias de cantidad de luz de un bloque**

|                   | <b>Entrada 3</b> | <b>Entrada 2</b> | <b>Entrada 1</b> |
|-------------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>Apagado</b>    | 0                | 0                | 0                |
| <b>2000 luxes</b> | 0                | 0                | 1                |
| <b>3000 luxes</b> | 0                | 1                | 0                |
| <b>4000 luxes</b> | 0                | 1                | 1                |
| <b>5000 luxes</b> | 1                | 0                | 0                |
| <b>6000 luxes</b> | 1                | 0                | 1                |
| <b>7000 luxes</b> | 1                | 1                | 0                |
| <b>Libre</b>      | 1                | 1                | 1                |

Las 6 salidas del PLC representan una orden de mando por cada punto de control (2000 a 7000 en pasos de 1000 luxes). Estas señales de mando deben opto acoplarse a través de relés de estado sólido que permitan la alimentación a los balastos de las lámparas.

Si se requieren 2000 luxes, en cada peldaño deben encenderse 4 tubos, por tanto para esta configuración se activará un circuito denominado “Circuito A” con 5 balastos, uno por cada peldaño, de 32 W con capacidad de alimentar 4 tubos. Por lo tanto para tener en un bloque 2000 luxes aproximadamente se encienden 20 tubos, 4 por cada peldaño.

Si se requiere otra referencia de iluminación se activarán por cada 1000 luxes adicionales un circuito, (B, C, D, E, F, según sea el caso), con 5 balastos de 32 W con capacidad para encender 2 tubos extras por peldaño, es decir grupos de 10 tubos por bloque, hasta un máximo de 70 tubos (para 7000 luxes aproximadamente). La tabla 3.11 muestra las salidas del PLC correspondientes a cada circuito.

**Tabla 3.11 Señales de salida del PLC para la activación de los relés**

| <b>Salidas PLC</b> | <b>6</b> | <b>5</b> | <b>4</b> | <b>3</b> | <b>2</b> | <b>1</b> |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Circuito A</b>  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        |
| <b>Circuito B</b>  | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        |
| <b>Circuito C</b>  | 0        | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        |
| <b>Circuito D</b>  | 0        | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        |
| <b>Circuito E</b>  | 0        | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| <b>Circuito F</b>  | 1        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |

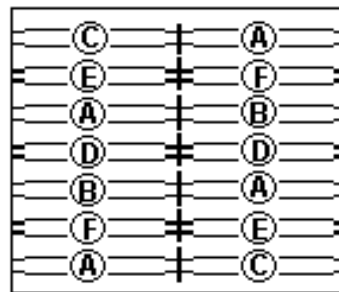
Así, para obtener los diferentes puntos de control se requieren palabras digitales, como se muestra en la tabla 3.12.

**Tabla 3.12 Combinaciones de señales de salida para obtener los puntos de control de cantidad de luz**

| <b>Salidas PLC</b> | <b>6</b> | <b>5</b> | <b>4</b> | <b>3</b> | <b>2</b> | <b>1</b> |
|--------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| <b>Apagado</b>     | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| <b>2000 luxes</b>  | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        |
| <b>3000 luxes</b>  | 0        | 0        | 0        | 0        | 1        | 1        |
| <b>4000 luxes</b>  | 0        | 0        | 0        | 1        | 1        | 1        |
| <b>5000 luxes</b>  | 0        | 0        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| <b>6000 luxes</b>  | 0        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |
| <b>7000 luxes</b>  | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        | 1        |

**3.2.4 Configuración para mejorar la distribución de la luz.** De lo anteriormente explicado y de la figura 3.4, se puede concluir que el encendido por peldaño deberá hacerse así: cuatro (4) tubos para 2000 luxes, un par más para 3000 luxes, y así sucesivamente por parejas hasta llegar a los 14 tubos para 7000 luxes aproximadamente. Una posible configuración, para obtener la mejor distribución de luz, se muestra en la figura 3.5. En este caso, se encenderán los 4 tubos del “circuito A”, para obtener 2000 luxes aproximadamente. Para 3000 luxes se añadiría al “circuito A” los dos tubos del “circuito B” y así sucesivamente activando los circuitos según la secuencia alfabética. Se recomienda además pintar los peldaños de color blanco brillante para mejorar la reflexión de la luz.

**Figura 3.5 Posible configuración de encendido de lámparas**



**3.2.5 Diseño del sistema de control de fotoperíodos.** Debido a que en el diseño del sistema de control de cantidad de luz se hace uso de PLC's se determina realizar el control de los fotoperíodos a través del uso de los contadores y temporizadores del PLC. Se aclara que los fotoperíodos que pretenden simular las condiciones ambientales “día y noche”, son totalmente independientes de las condiciones reales en el exterior; se podría, por ejemplo, tener “días” en las secciones controladas mientras afuera es en realidad de noche. En la implementación, se programan los temporizadores y contadores del PLC de acuerdo al *set point* indicado por el usuario. En la programación se deben activar las salidas (luces encendidas simulando un día) mientras se cumple el tiempo del

fotoperíodo. Una vez terminado el fotoperíodo, se desactivan las salidas (luces apagadas simulando una “noche”) durante un tiempo igual a: 24 horas menos el valor de las horas marcadas en la referencia de fotoperíodo (tiempo del “día”). Este proceso se repite mientras no haya cambio en la referencia del tiempo de fotoperíodo. Es importante aclarar que debido a que en cada etapa de crecimiento de las plantas se requieren diferente cantidad de luz y fotoperíodos, los tiempos de activación y desactivación del sistema de iluminación no serán los mismos para todos los bloques, razón por la cual es conveniente utilizar “cortinas” que aislen las perturbaciones de luz de un bloque a otro.

La especificación de tiempo es de: 12, 14 y 16 horas. Se propone trabajar tres entradas para fijar la referencia de fotoperíodo. De esta forma se podrán tener valores de períodos desde 0 hasta 16 en pasos de 2 horas.

La tabla 3.13 muestra la configuración de las otras tres entradas o 3 bits de programación de la referencia horaria del PLC para lograr lo expresado en el párrafo anterior.

**Tabla 3.13 Señales de entrada del PLC para las diferentes referencias de fotoperíodos de un bloque**

|                 | <b>Entrada 6</b> | <b>Entrada 5</b> | <b>Entrada 4</b> |
|-----------------|------------------|------------------|------------------|
| <b>2 horas</b>  | 0                | 0                | 0                |
| <b>4 horas</b>  | 0                | 0                | 1                |
| <b>6 horas</b>  | 0                | 1                | 0                |
| <b>8 horas</b>  | 0                | 1                | 1                |
| <b>10 horas</b> | 1                | 0                | 0                |
| <b>12 horas</b> | 1                | 0                | 1                |
| <b>14 horas</b> | 1                | 1                | 0                |
| <b>16 horas</b> | 1                | 1                | 1                |

Cumplido el fotoperíodo se deben desactivar todas las salidas. Se reserva la palabra XXX000, en las entradas del PLC, para fijar el apagado del sistema de iluminación. Se puede usar la palabra digital XXX111, en las entradas del PLC, para indicar el inicio del modo “programación” de las referencias del sistema.

**3.2.6 Selección de equipos y dispositivos.** Para el mejor desempeño del sistema de control de iluminación se recomienda:

- **Elección del relé.** Dentro de los diversos tipos, se escoge un relé de estado sólido, optoacoplado, por sus ventajas en cuanto a aplicaciones de alta conmutación y larga vida útil ya que no presentan el desgaste mecánico de los electromagnéticos; con las siguientes características: conexión en el paso de tensión por cero, desconexión en el paso de intensidad por cero, ausencia de ruido mecánico de conmutación, escasa potencia de mando, compatible con TTL y MOS, insensibilidad a las sacudidas y a los golpes.

Para la selección del relé de estado sólido, se calcula que cada uno debe conducir una corriente de salida de acuerdo a los requerimientos de las lámparas y, específicamente, de los balastos.

Los balastos de 32 W para 4 tubos requieren de una corriente de 0,5 A; esta corriente multiplicada por 5 balastos es equivalente a 2,5 A. Los balastos de 32 W para 2 tubos requieren  $0,29A * 5 = 1,4 A$ . Por cada bloque se requiere un relé de 2,5 A y 5 relés de 1,5 Amperios. Se eligen relés de 3A, ya que es un valor comercial con el que se incluye además un factor de seguridad, sobre la corriente calculada.



Se propone un relé de estado sólido con tensión de entrada compatible con TTL (0 – 5 V), corriente de entrada 10mA; entrada optoacoplada con la salida, de corriente alterna 110 V, de baja potencia, intensidad máxima 3A. Estabilizador de corriente e indicación luminosa mediante diodo LED, temperatura máxima de trabajo 60 °C.

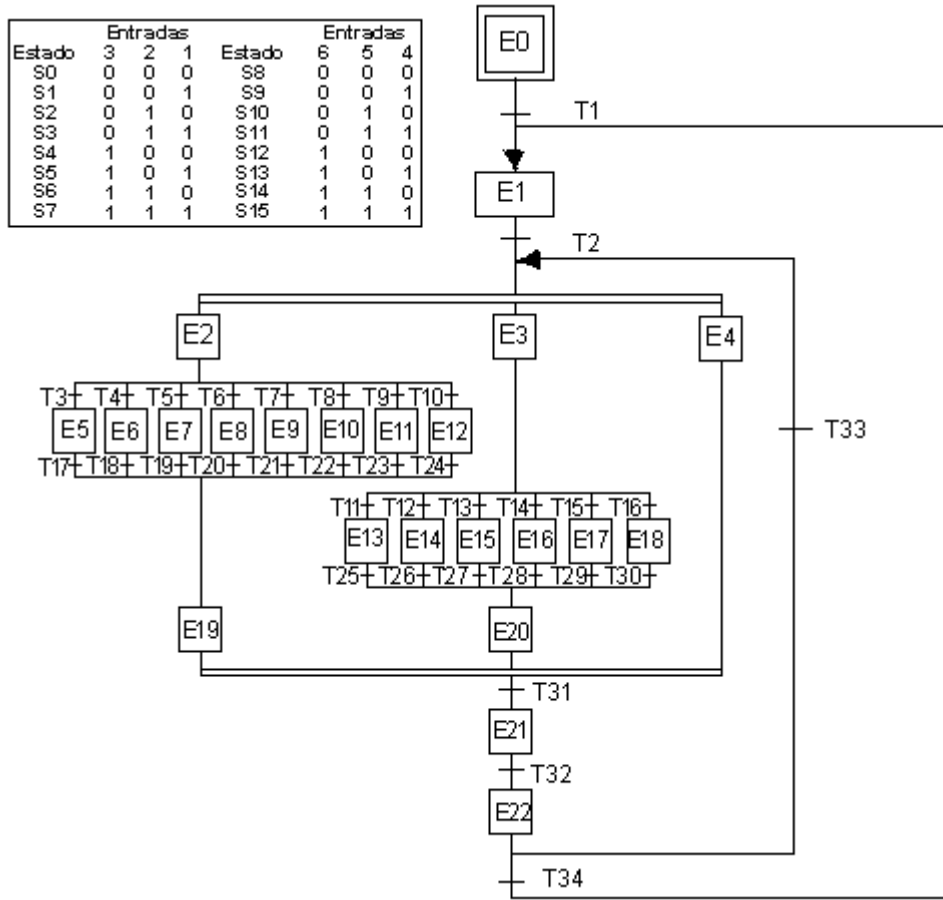
- **Elección del PLC.** Se requiere de un PLC pequeño, sencillo y económico por cada bloque. En cuanto a procesador, no se requiere algo complejo. Debe tener la posibilidad de programarse de forma sencilla, preferiblemente programación en escalera (LADDER), para configurar el encendido y apagado de lámparas, sin realimentación. Los temporizadores y/o contadores del procesador deben permitir configurar un reloj de 24 horas. En el mercado se encuentran PLC's de bajo costo, ideales para la presente aplicación con una amplia gama de opciones; se prefiere alguno con un mínimo de 6 entradas digitales y que tenga incorporado como 6 salidas de relés de estado sólido. La otra opción es con base en un PLC de salidas digitales (0-5 voltios), que implica el uso de relés de estado sólido independientes. Se debe tener en cuenta que en la primera opción se evitan problemas de conexión, pero se aumenta el riesgo de cambiar toda una tarjeta de salidas al tener fallos en alguno de los relés (riesgo que disminuye al estar optoacoplados). La elección deberá basarse además en el aspecto económico.

Para la fijación de los *set points* se requiere hacer uso de las entradas de PLC's mediante combinaciones digitales proporcionadas por un circuito digital que convierta las referencias fijadas en el teclado a las palabras digitales indicadas en las tablas 3.10 y 3.13, para cantidad de luz y fotoperíodos respectivamente. La programación de los PLC se basa en algoritmia secuencial, una forma de abstraer sencillas aplicaciones es mediante GRAFCET.

- **Gráfico funcional de control de etapas y transiciones.** También conocido como GRAFCET, es un gráfico apoyado por métodos de álgebra lógica que representa el funcionamiento de sistemas lógicos independientemente de la materialización tecnológica de los mismos. En la actualidad diversos autómatas incorporan algunas instrucciones de programación que permiten introducir directamente el grafo de GRAFCET. En otros casos se dispone de software capaz de compilar un grafo al lenguaje de máquina que por lo general es el LADDER. No debe confundirse el GRAFCET con un lenguaje de programación. Una representación GRAFCET del sistema de control de iluminación se muestra en la figura 3.6.

Para el GRAFCET definen inicialmente las señales de entrada como estados, para los pasos a diferentes etapas. Se inicia con la etapa 1 donde se resetean todas las salidas, señales de proceso, bits internos y contadores, requiriéndose como señal de transición S, la cual indica que señales de entrada (3,2,1) se encuentran en 000. Para salir de la etapa 1, es necesario que se dé el estado S7, correspondiente a 111 en las entradas (1,2 y 3) indicando que el sistema se encuentran en estado de programación; en las etapas 2,3 y 4 se fija el valor del foto período deseado y se pone un bit interno "B" en 1, se activa el encendido de las luces requeridas y un bit interno "A" en 1, y se resetean los contadores. Una vez se indica mediante bit internos "X", "Y" y "Z" en las etapas 19, 20 y 4 que hay programado un fotoperíodo, se han encendido las luces, y el contador esta en 0, se inicia el conteo del tiempo de fotoperíodo activo. Una vez el tiempo del contador se haga igual al fotoperíodo se apagan las luces; el contador sigue contando hasta llegar a un tiempo de 24 horas, cuando el tiempo del contador se hace igual a un tiempo de 24 horas, el proceso regresa a la etapa 1, a leer las referencias de programación y resetear el contador. Este ciclo, sigue hasta que haya una señal de 000 en las entradas 123, después de la cual el proceso va a la etapa 1 nuevamente.

Figura 3.6 GRAFCET para el sistema de control de iluminación



|     |       |
|-----|-------|
| T1  | = S0  |
| T2  | = S7  |
| T3  | = S8  |
| T4  | = S9  |
| T5  | = S10 |
| T6  | = S11 |
| T7  | = S12 |
| T8  | = S13 |
| T9  | = S14 |
| T10 | = S15 |
| T11 | = S1  |
| T12 | = S2  |
| T13 | = S3  |
| T14 | = S4  |
| T15 | = S5  |
| T16 | = S6  |
| T17 | = B   |

|     |         |
|-----|---------|
| T18 | = B     |
| T19 | = B     |
| T20 | = B     |
| T21 | = B     |
| T22 | = B     |
| T23 | = B     |
| T24 | = A     |
| T25 | = A     |
| T26 | = A     |
| T27 | = A     |
| T28 | = A     |
| T29 | = A     |
| T30 | = A     |
| T31 | = Z     |
| T32 | C1 ≥ FT |
| T33 | C1 = 24 |
| T34 | = S0    |

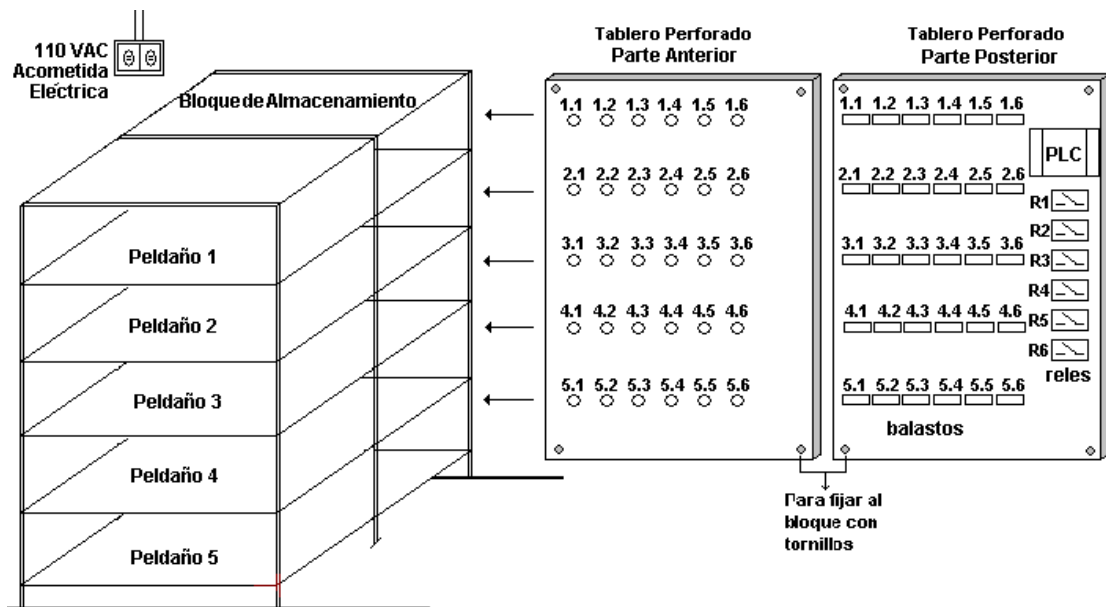
|     |                            |
|-----|----------------------------|
| E0  | Etapa Inicial              |
| E1  | Condiciones iniciales      |
| E2  | Leer fotoperíodo           |
| E3  | Leer Cantidad luxes        |
| E4  | Reset Contador             |
| E5  | Fijar FT = 2 horas; B = 1  |
| E6  | Fijar FT = 4 horas; B = 1  |
| E7  | Fijar FT = 6 horas; B = 1  |
| E8  | Fijar FT = 8 horas; B = 1  |
| E9  | Fijar FT = 10 horas; B = 1 |
| E10 | Fijar FT = 12 horas; B = 1 |
| E11 | Fijar FT = 14 horas; B = 1 |
| E12 | Fijar FT = 16 hora; B = 1  |

|     |                           |
|-----|---------------------------|
| E13 | Activar 2000 luxes; A = 1 |
| E14 | Activar 3000 luxes; A = 1 |
| E15 | Activar 4000 luxes; A = 1 |
| E16 | Activar 5000 luxes; A = 1 |
| E17 | Activar 6000 luxes; A = 1 |
| E18 | Activar 7000 luxes; A = 1 |
| E19 | Fotoperíodo activo; X = 1 |
| E20 | Luxes Activos; Y = 1      |
| E21 | Iniciar Conteo; C1        |
| E22 | Apagar luces              |

### 3.3 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN POR BLOQUE

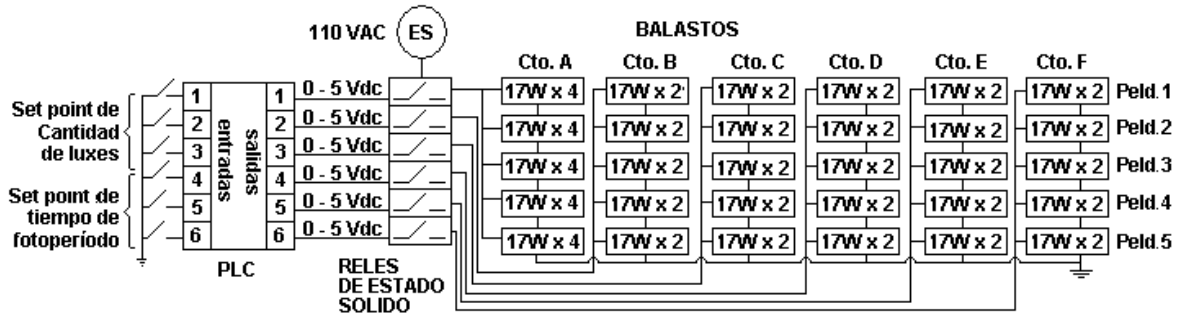
Se propone montar estos dispositivos en un tablero ubicado en la parte posterior de cada bloque. El tablero deberá estar perforado para permitir conectar los cables que salen de los balastos a los tubos a través de dichas perforaciones. De este modo se facilita la instalación y mantenimiento, y se aísla el poco calor de los balastos electrónicos. Preferiblemente, el tablero y dispositivos deberán ser protegidos con una carcasa, para aislar ruido, temperatura y humedad, evitando que queden expuestos a la manipulación del personal del laboratorio. La figura 3.7 indica el esquema de ubicación de los balastos, los relés y el PLC de cada bloque.

**Figura 3.7** Esquema de ubicación del tablero perforado y dispositivos en un bloque



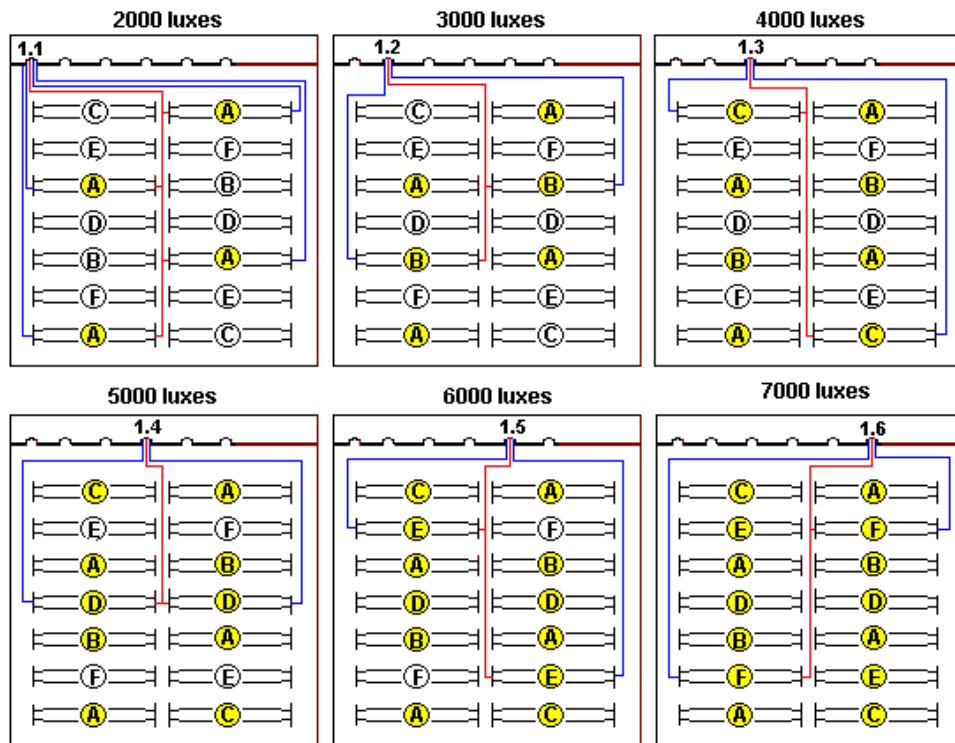
El diagrama de conexiones para un bloque se muestra en la figura 3.8.

**Figura 3.8 Esquema de conexión del PLC, relés y balastos para el sistema de control de iluminación de un bloque**



En la figura 3.9 se muestra además un ejemplo de la conexión específica de los cables de salida de los balastos a los bornes de los tubos para un peldaño. Ya que todos los peldaños deben tener la misma cantidad de luz en determinado momento, el esquema de conexión es el mismo para todos los peldaños de un bloque.

**Figura 3.9 Esquema de conexión de un peldaño**



### 3.4 PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE ILUMINACIÓN

Las especificaciones mínimas que debe cumplir el sistema para la iluminación de cada bloque en las secciones del área de incubación del laboratorio, son:

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Sist. Almacenamiento  | Bloques de 2 estantes<br>Dimensión del bloque: 1,9 m. de Alto<br>1,3 m. de ancho 1,2 m. de profundidad<br>5 peldaños y 1 tapa superior separados: 0,30 m.<br>Altura piso - 1 <sup>er</sup> peldaño: 0,40 m.                        |
| Lámparas              | 70 tubos fluorescentes Cool White T8 17 W<br>Flujo luminoso: 1150 lúmenes<br>Balastos electrónicos: 5 unidades de 17 W x 4 tubos<br>25 unidades de 17 W x 2 tubos<br>Encendido instantáneo<br>Chasis para tubos de 60 cm. y bornes |
| Equipos               | PLC 6 entradas de contacto, 6 salidas digitales.<br>6 relés de estado sólido, optoacoplado, compatible con TTL, de 3 Amperios.<br><i>Switches</i> para marcación de <i>set points</i>  |
| Instalación           | Individual (para cada bloque).<br>14 tubos por cada peldaño con separación de 17 cm.<br>PLC, Relés, y balastos en tablero perforado ubicado en la parte posterior de cada bloque. Con carcasa de protección.                       |
| Acometidas eléctricas | Alimentación PLC 120 VAC<br>Alimentación lámparas 120 VAC, 10 A.<br>Instalación desde el cielorraso.   |

**Importante:** El diseño anterior corresponde a la iluminación de cada bloque según las características de los cultivos.

Se hace necesario un sistema de iluminación general para facilitar el trabajo de los operarios, especialmente en las horas de noche artificial. Tomar datos de los cultivos, hacer pruebas, poner o retirar material biológico, introducir o cambiar *set points* de iluminación, son algunas de las actividades que requieren unas condiciones mínimas de iluminación. Por esto se propone un sistema de iluminación general para cada sección, que se prenda o se apague desde la parte exterior de las secciones.

Aunque en el cielorraso sería la mejor ubicación para las lámparas de este sistema de iluminación, se considera inconveniente por la cantidad y ubicación de los equipos de los sistemas de control de temperatura y humedad. Se propone ubicar 4 Lámparas de 2 tubos cada una, en la parte superior de las paredes de cada sección climática. Los dispositivos propuestos son: 4 chasis dobles, 8 pares de bornes, 4 balastos electrónicos, 8 tubos fluorescentes Cool White T8 de 17 W.

#### **4. DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD**

En el laboratorio de biotecnología de la Facultad de Ciencias Agropecuarias se desea controlar el porcentaje de humedad relativa (%HR) en las tres secciones del área de incubación, manteniendo este valor en un 70% independientemente de los valores y cambios de temperatura que en cada cuarto se manejen.

El control de la variable humedad es importante ya que, al controlar la temperatura, suceden cambios en el porcentaje de humedad relativa, lo que podría ocasionar efectos nocivos sobre el crecimiento y desarrollo de los cultivos In Vitro. Estos cultivos demandan un alto porcentaje de humedad relativa y pueden deteriorarse al tratar de mantener el equilibrio con el ambiente interior (sección), ya que, los vegetales son elementos higroscópicos (tiene la capacidad de absorber o entregar vapor de agua).

Se conoce que dentro de los recipientes de cultivo se debe tener un porcentaje de humedad relativa del 70%, por lo tanto se debe garantizar que en el exterior de los recipientes haya el mismo porcentaje de HR, para que las plantas no se sequen o se pudran por poca o demasiada humedad. Para entender el comportamiento de la variable humedad y posteriormente determinar el sistema de control, se presentan algunas definiciones importantes.



#### 4.1 CONCEPTOS RELACIONADOS CON EL DISEÑO DEL SISTEMA DE HUMEDAD

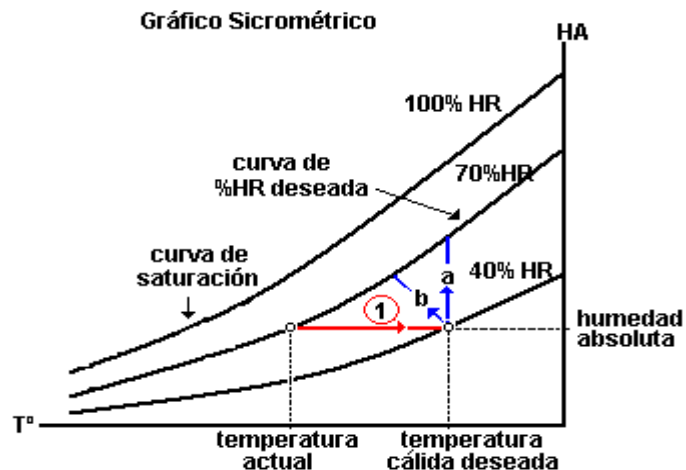
- **Humedad.** Es la condición del aire con respecto a la cantidad de vapor de agua que contiene. Es simplemente el vapor de agua contenido en el aire.
  
- **Humedad absoluta.** Es el peso del vapor de agua por unidad de peso del aire seco, expresada en gramos por kilogramo de aire seco. El aire atmosférico contiene cierta cantidad de humedad pero su capacidad no es ilimitada. Cuando contiene el máximo posible se dice que está saturado y constituye la humedad absoluta de saturación.
  
- **Humedad relativa.** Razón entre la masa de vapor de agua en un volumen dado de aire y la masa de vapor que contendría esa misma cantidad de aire, si estuviera saturado a la misma temperatura y presión barométrica. Si la temperatura atmosférica aumenta y no se producen cambios en el contenido de vapor, la humedad absoluta no varía mientras que la relativa disminuye. Una caída de la temperatura incrementa la humedad relativa produciendo rocío por condensación del vapor de agua sobre las superficies sólidas.
  
- **Gráfico sicrométrico.** Diagrama que relaciona las características del aire: temperatura (eje X), humedad absoluta (eje Y) y relativa (curvas exponenciales).

## 4.2 ANALISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LA VARIABLE HUMEDAD

Para determinar el equipo necesario que controle el porcentaje de humedad relativa, se realiza el análisis del comportamiento de la humedad relativa y las propiedades físicas del aire ante cambios de temperatura en las secciones a controlar apoyándose en el gráfico sicrométrico; en este gráfico se representan los valores de humedad absoluta en el eje Y, los valores de temperatura en el eje X, y el porcentaje de humedad relativa mediante curvas exponenciales desde 0 hasta 100%. Un cambio en la temperatura conlleva un desplazamiento en el eje X del gráfico: hacia la izquierda en un proceso de enfriamiento, y hacia la derecha en un proceso de calentamiento; a su vez, un cambio en la humedad absoluta se indica mediante un desplazamiento en el eje Y: hacia arriba un aumento o humidificación y hacia abajo un decremento o deshumidificación.

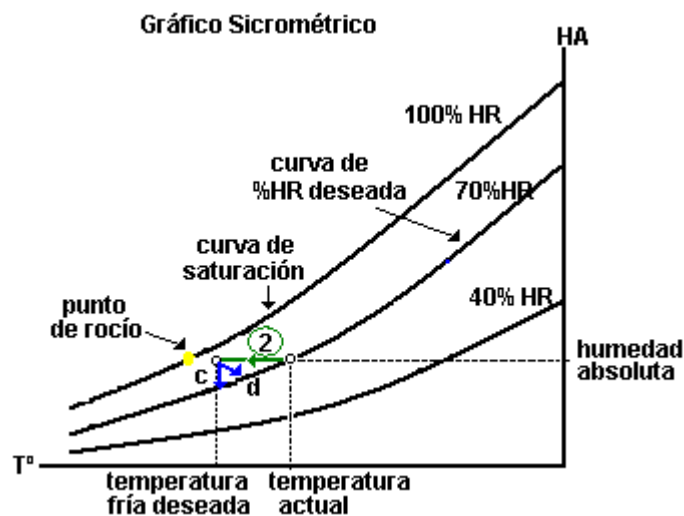
En la figura 4.1 se muestra el comportamiento del porcentaje de humedad relativa ante un aumento de temperatura, manteniendo constante la humedad absoluta.

**Figura 4.1 Calefacción Vs. %HR en el gráfico sicrométrico**



En la figura 4.1 se puede observar que un proceso de calentamiento del aire (indicado en el gráfico como “1”) a partir de la “temperatura actual” manteniendo constante la humedad absoluta, conlleva a una disminución en el porcentaje de humedad relativa (cambio a otra curva exponencial). Para mantener el %HR deseado es necesario modificar el valor de humedad absoluta a través de un proceso de humidificación. Los procesos de humidificación pueden ser adiabáticos o isotérmicos. La humidificación adiabática (“b” en el gráfico) implica necesariamente un enfriamiento del aire, mientras que la humidificación isotérmica (“a” en el gráfico), varía la variable humedad absoluta manteniendo el valor de temperatura deseado.

**Figura 4.2 Refrigeración Vs. %HR, antes del punto de saturación**

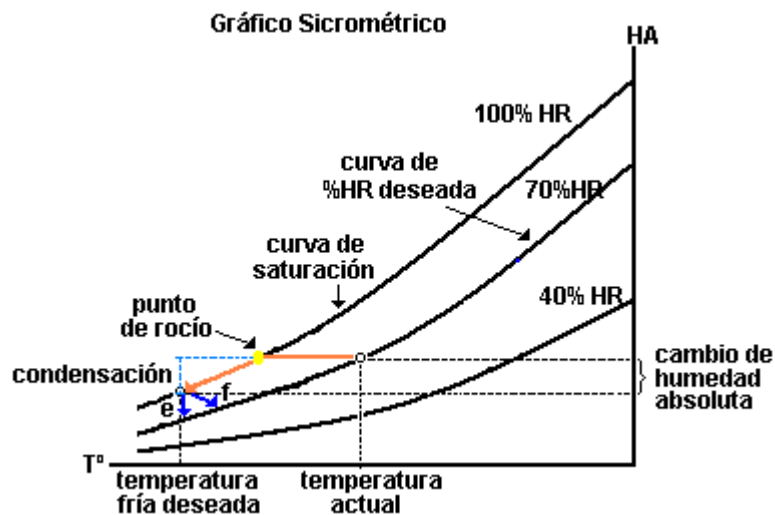


Como se muestra en la figura 4.2, cuando ocurre un proceso de enfriamiento (“2”), desde la “temperatura actual” manteniendo constante el valor de humedad absoluta, se aumenta el porcentaje de humedad relativa (cambio a otra curva exponencial). En este caso, para volver al %HR deseado es necesario realizar un proceso de deshumidificación que puede ser adiabático (d) o isotérmico (c). La

deshumidificación adiabática implica un aumento de temperatura, la isotérmica varía la humedad absoluta, sin cambios en la temperatura.

Si con la disminución de temperatura se llega a la curva 100% de humedad relativa (curva de saturación), se genera condensación, como se muestra en la figura 4.3. A partir del punto de rocío cualquier disminución de temperatura adicional, genera un cambio en la humedad absoluta, manteniéndose el porcentaje de HR en 100%. Para alcanzar el porcentaje de humedad relativa deseado, se tienen de nuevo dos opciones, deshumidificación isotérmica (e) o adiabática (f).

**Figura 4.3 Refrigeración Vs. %HR, después del punto de saturación**



Para realizar el control de la variable humedad relativa, será necesario entonces controlar la variable humedad absoluta, que puede manipularse mediante procesos de humidificación o deshumidificación. Se procede a determinar la

necesidad específica de suministrar o quitar humedad al ambiente en las tres secciones climáticas del área de incubación del laboratorio.

Debido a que en las tres secciones se desea controlar la temperatura mediante calefacción o refrigeración del aire originándose cambios en los porcentajes de humedad relativa, se concluye que son necesarios los procesos de humidificación y deshumidificación en cada una de las secciones. Los valores de pérdidas y cargas de calor latente (vapor de agua) se tendrán en cuenta como especificaciones de los equipos necesarios para humidificar y deshumidificar las secciones controladas, según sea el caso; los cálculos se registran en el Anexo D.

### **4.3 DESCRIPCION DE LOS SISTEMAS DE HUMIDIFICACION**

Existen dos procedimientos que se pueden utilizar para aumentar el nivel de humedad del aire: humidificación isotérmica y humidificación adiabática. Se explican sus principios de funcionamiento.

**4.3.1 Sistemas de humidificación adiabáticos.** Estos equipos producen transformación a calor constante, durante el proceso de la humidificación, así que a medida que la humedad relativa aumenta, la temperatura disminuye. En la humidificación adiabática, se entrega al ambiente agua atomizada y aunque se encuentre extremadamente atomizada, aún, su estado es líquido. La energía requerida para pasar al estado gaseoso es suministrada por el aire con la consecuente disminución en la temperatura. Con este sistema se destaca el siguiente humidificador el humidificador por rociado; en el cual el agua a presión, proveniente de la red o de un depósito, es rociada directamente a la corriente de

aire; el exceso de agua es recogido en el depósito para reiniciar el ciclo. Un separador de gotas retira del aire las de mayor tamaño.

**4.3.2 Sistemas de humidificación isotérmicos.** Aquellos que en el proceso de humidificación, a medida que la humedad aumenta, la temperatura se mantiene constante. En el proceso de humidificación isotérmica, se dispersa en la corriente de aire o en el ambiente que se debe humidificar, vapor de agua después de haber sido generado por ebullición de agua y, por tanto, se mezcla con el aire fácilmente, sin afectar la temperatura. Este procedimiento requiere una fuente externa, que pueden ser resistencias eléctricas, electrodos sumergidos, u otra fuente externa como una caldera, que suministre la energía necesaria para el cambio de estado del agua. Debido al proceso de ebullición del agua, el vapor de agua utilizado para humidificar es de carácter estéril. Existe otro método de humidificación isotérmica que es humidificación por vapor frío. Este método es eficiente debido a que no utiliza elemento calefactor, pero en consecuencia el vapor que produce no es estéril.

El vapor sólo puede ceder calor al aire cuando se llega al 100% de la humedad relativa (saturación). Llegado a este punto, para que el aire pueda absorber más vapor de agua debe incrementar su temperatura. En la práctica, cuando se está utilizando vapor de agua para incrementar la humedad relativa, la temperatura del aire tiende a aumentar ligeramente. Esto es debido a la transferencia de calor por los distribuidores y tuberías de conducción de vapor y que están en contacto con el aire tratado, nunca por el hecho de suministrar vapor al aire. De todas formas, este ligero aumento es totalmente despreciable en la mayoría de los casos.

A continuación se explica el funcionamiento de algunos sistemas humidificadores isotérmicos:

- **Humidificadores a electrodos sumergidos.** Como su nombre lo indica, los electrodos son los que generan la evaporación del agua con concentración salina. Generalmente poseen controladores electrónicos que manejan el funcionamiento del humidificador y su sistema de alarmas, asegurando la esterilidad del vapor y el tiempo de vida de los cilindros. Pueden ser utilizados en instalaciones con distribuidores lineales de acero inoxidable o directamente al ambiente utilizando distribuidores ventilados que se caracterizan por la ausencia total de ruido y un cómodo diseño. El mantenimiento es muy sencillo, ya que posee un drenaje que opera automáticamente en función de la concentración salina del agua. Estos humidificadores no pueden ser utilizados en lugares donde el agua sea extremadamente dura, ni tampoco en aplicaciones con aguas mineralizadas.
  
- **Humidificadores por resistencia.** Produce vapor estéril y utiliza todo tipo de aguas: blandas, desmineralizadas y sin sales. Esta característica permite su uso en todo tipo de aplicaciones: conductos o ambientes, para confort personal o para mantener el nivel de humedad en procesos industriales y almacenamiento de productos.
  
- **Humidificadores de aire frío.** Funcionan de dos maneras: los humidificadores de impulso producen el vapor mediante un disco que rota a gran velocidad para propulsar el agua a través de una rejilla y los humidificadores evaporativos, en los que el agua contenida en el depósito se evapora al ser calentada y el flujo de aire que pasa sobre ella arrastra el vapor de agua generado. Usan un ventilador para impulsar el aire a través de un filtro, o mecha, saturado con agua. A medida que el agua del filtro se evapora, el aire se impregna de una invisible bruma húmeda. El filtro, además, retiene los minerales y las impurezas del agua. A diferencia de los vaporizadores y los nebulizadores, no tienen elemento calefactor, pero el vapor producido no es estéril.

#### 4.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS DE DESHUMIDIFICACION

El proceso de eliminación del vapor de agua presente en el aire se conoce como deshumidificación. La tecnología de la deshumidificación surgió a partir de la necesidad de conservar y evitar el deterioro de determinados productos y materiales. Con ello apareció una amplia gama de aplicaciones para los equipos deshumidificadores, como en las industrias de producción y conservación de alimentos, farmacéutica, electrónica y almacenamiento de productos higroscópicos. Actualmente la tecnología de la deshumidificación es reconocida como un componente esencial para asegurar el ahorro de energía y la productividad.

**4.4.1 Sistema de deshumidificación por desecante.** Se realiza mediante sustancias desecantes, que tienen una gran afinidad por el agua, propiedad que les permite atrapar la humedad del aire circundante. Existen desecantes sólidos y líquidos, lo que los diferencia desde el punto de vista funcional. Comercialmente los más utilizados son la zeolita, la silica gel y el cloruro de litio. Existen básicamente cuatro tipos de deshumidificadores desecantes: líquido absorbente, torre empacada adsorbente, cama rotatoria adsorbente y rueda desecante. La técnica más utilizada para aplicaciones de climatización es por rueda desecante.

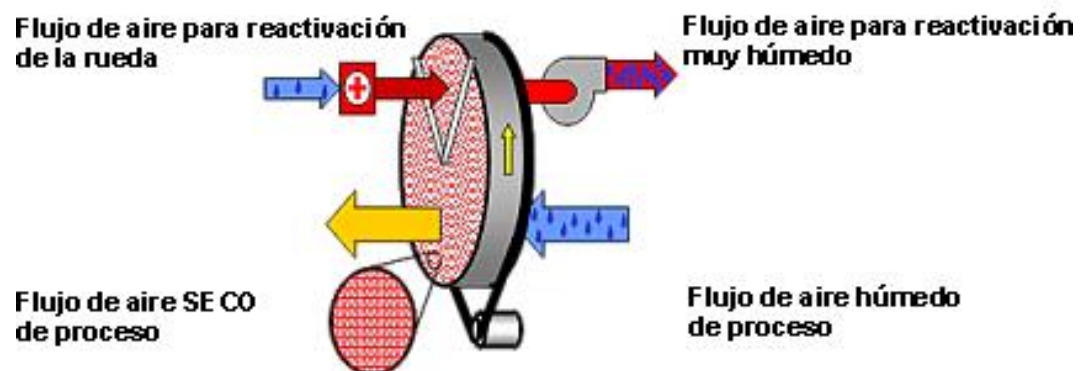
- **Rueda desecante.** La mayoría de las ruedas desecantes son hechas de silicagel o zeolita (tamiz molecular), unido a un substrato de fibras de vidrio, papel o algunas veces aluminio. Cuando se mira desde el aire la rueda asume la apariencia de un fino y enredado material con muchos canales pequeños; esta estructura se caracteriza por ser ligera, durable y garantiza gran superficie de contacto entre el desecante y el aire.



El desecante produce una atracción de las moléculas del aire a través de micro porosidades, basada esencialmente en el tamaño de los poros. Ver figura 4.4.

En la primera etapa, el “aire de proceso” inicialmente húmedo pasa a través de la rueda que gira lentamente. Al fluir entre los canales formados en la estructura y el desecante el silica gel y el tamiz molecular atraen mecánicamente el agua, absorbiendo la humedad del aire como una esponja, secando el “aire de proceso” hasta que se satura el agente desecante. En la etapa de reactivación, mientras la rueda sigue girando, el desecante es calentado por un flujo de “aire de reactivación”, eliminando la humedad en este. Una vez terminada la etapa de reactivación, el desecante caliente vuelve a la zona de proceso, donde se enfría al ponerse en contacto con una pequeña porción de aire de proceso; así queda listo para volver a adsorber humedad.

**Figura 4.4 Principio de operación de la rueda desecante**



## **4.5 PLANTEAMIENTO DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD**

Inicialmente se descarta el uso de los sistemas adiabáticos, porque implica conjuntamente un proceso de enfriamiento del aire. Para no interferir en el desempeño del sistema de control de temperatura es conveniente controlar de forma independiente el porcentaje de humedad relativa mediante procesos isotérmicos de humidificación y deshumidificación.

**4.5.1 Selección del equipo humidificador.** Dentro de los sistemas isotérmicos, se descarta el uso de un sistema de vapor frío principalmente porque el vapor que produce no es estéril, favoreciendo la proliferación de bacterias, lo que afecta las condiciones de asepsia del laboratorio e implica un mantenimiento periódico más frecuente y riguroso del equipo.

La selección entre un sistema a electrodos sumergidos y resistencias se basa en el tratamiento del agua y el consumo de potencia. Debido a que el consumo (kilovatios-hora gastados por cada kg/h de vapor de agua) de los humidificadores por resistencias eléctricas es similar al de electrodos sumergidos (aproximadamente 750 W por kg./h), se selecciona un sistema de resistencias básicamente porque puede utilizar cualquier tipo de agua, favoreciendo comparativamente los costos de funcionamiento.

**4.5.2 Selección del equipo deshumidificador.** La utilización de ruedas deshumidificadoras en el acondicionamiento de aire es una buena alternativa para

lograr un proceso limpio, que permita ahorrar energía, y llegar fácilmente a las condiciones deseadas.

La otra opción para deshumidificar el aire es a través del sistema de aire acondicionado. Existe un equipo de precisión para el control de temperatura y humedad, que cumple las funciones de calentar, enfriar, humidificar y deshumidificar, y posee los siguientes elementos:

- Un sistema de refrigeración: Compresor, Condensador, Válvula de expansión y Evaporador.
- Un sistema de calefacción a través de resistencias eléctricas.
- Un sistema de producción de vapor de agua para humidificar.

El funcionamiento de este equipo, a diferencia del equipo bomba de calor en el cual la calefacción puede realizarse invirtiendo la dirección del fluido refrigerante con un alto rendimiento debido al uso de la energía del aire exterior, implica el uso de resistencias eléctricas para calefacción, con el consecuente alto consumo de energía eléctrica, bajo rendimiento y alto costo de funcionamiento.

Además la deshumidificación se realiza mediante la condensación de agua del aire tratado mediante un intercambio térmico en el evaporador. Para realizar deshumidificación siempre deberá hacerse uso del sistema de refrigeración, con su correspondiente costo, ya que en el ciclo de refrigeración el aire lógicamente se enfriará y posteriormente deberá pasarse a través de las resistencias eléctricas para adecuar la temperatura y la humedad relativa, todo esto en un proceso adiabático. Con esta opción, la remoción de humedad puede llegar a ser más

costosa, hasta en una proporción de 6 a 1, con respecto a los sistemas de deshumidificación con ruedas desecantes.

A continuación se presenta una comparación entre sistemas que deshumidifican de manera convencional con equipo acondicionador, y sistemas con ruedas deshumidificadores, por Rengarajan y Nimmo (1993) y Niu et al (2002),

**Tabla 4.1 Comparación de un sistema de aire acondicionado y un sistema con desecantes**

| <b>Sistema:</b>           | <b>Aire Acondicionado</b>   | <b>Desecantes</b>   |
|---------------------------|---|---|
| <b>Equipos</b>            | Condensadores serpentines, válvulas, compresor, sistemas de seguridad.    | Rueda deshumidificadora.  |
| <b>Sustancias</b>         | Fluido refrigerante (CFC ó HCFC)  | Desecantes (no nocivos)   |
| <b>Mantenimiento</b>      | Por razones de seguridad debe ser riguroso y periódico.                   | Al tener menos equipos y poco complejos, es menor y más sencillo, lo que se disminuye el costo. |
| <b>Fuente Energética</b>  | Electricidad como única fuente  | Energía solar, eléctrica, gas o cualquier otro combustible.                                     |
| <b>Operación</b>          | Por lo general en ciclo cerrado, pues no recircular aire resulta costoso. | No resulta costoso trabajar en ciclo abierto. El aire se puede renovar en su totalidad.         |
| <b>Control de Humedad</b> | Por compresión o enfriamiento. Difícil control y costoso.                 | Con la rueda deshumidificadora. Fácil y poco costoso.   |

Por las notables ventajas que presenta en cuanto a desempeño, costos de funcionamiento, mantenimiento y por basarse en un proceso isotérmico, se elige un equipo de deshumidificación por ruedas desecantes para realizar los procesos de deshumidificación en las secciones climáticas del área de incubación del laboratorio.

**4.5.3 Consideraciones sobre los equipos seleccionados.** Para la selección del equipo humidificador por resistencias y del equipo deshumidificador por ruedas desecantes deben considerarse los siguientes aspectos generales:

- **Rango de trabajo.** Los equipos de control de humedad deben tener un rango de trabajo desde 0% hasta 100% de humedad relativa. Además, deben estar diseñados para manejar un factor higroscópico alto, ya que la planta a controlar es un cuarto de cultivo, donde por sección, se van a tener aproximadamente 11680 recipientes de cultivos vegetales.
- **Rango de temperatura de trabajo.** Ya que los equipos de control de temperatura se propusieron de características iguales para las tres secciones, se establece un rango de temperatura de trabajo para el humidificador y el deshumidificador, entre 0 °C y 50 °C; estos valores se establecen incluyendo un margen de error respecto al rango de control de temperatura propuesto (12°C – 33°C).
- **Puesta en régimen.** El tiempo deseado para la puesta en régimen es flexible ya que los cambios de estado, por cambios en la referencias de temperatura y % de humedad relativa, se prevén en el orden de “días”. En cuanto a perturbaciones, ya que se consideran comparativamente pequeñas debido a la impermeabilización propuesta, la exigencia no es alta en el tiempo de estabilización.
- **Capacidad de tratamiento.** La capacidad se mide en galones por día de funcionamiento. Un método para calcular la capacidad de tratamiento se basa en

determinar dicha capacidad según los pies cuadrados del área que se desea tratar.

Cada sección climática tiene un área de 53 m<sup>2</sup>, este valor equivale a 570,487 ft<sup>2</sup>. Usando la tabla 4.2 se puede establecer que la capacidad de tratamiento de los equipos, que debe ser de 2,2 a 2,5 galones por día.

**Tabla 4.2 Cálculo de la capacidad de los equipos de control de humedad**

| <b>Área</b>                 | <b>Volumen de salida (galones/día)</b> |
|-----------------------------|--|
| 500 ft <sup>2</sup> o menos | 1,5 – 2,0                              |
| 530 - 600 ft <sup>2</sup>   | 2,2 – 2,5                              |
| 700 – 800 ft <sup>2</sup>   | 3,0 – 3,5                              |
| 900 – 100 ft <sup>2</sup>   | 4,0 – 5,0                              |
| 1000 – 2000 ft <sup>2</sup> | 7,0 – 9,0                              |
| Más de 2000 ft <sup>2</sup> | 10,0 o más alto                        |

“Tratado de Refrigeración y Aire Acondicionado”, Carrier Air Conditioning Company.

En cuanto al humidificador:

- **Características.** Con el fin de simplificar la instalación del equipo humidificador se elige un equipo de resistencias eléctricas, compacto, de carácter portátil, utilizando distribuidores ventilados, directamente al ambiente, evitándose los costos de la construcción de ductos en acero inoxidable. La ubicación debe ser en la parte superior sujetado del cielo raso, en el centro del área, equidistante a los suministros del sistema bomba de calor, permitiendo una buena distribución del vapor.

- **Capacidad de producción de vapor.** Este valor se determina para elegir el tamaño del equipo humidificador, en cuanto a producción horaria de vapor. Con este fin se hace uso de la siguiente ecuación que permite calcular el caudal de vapor necesario en cada una de las secciones.

$$Q = V \times 1,2 \times (x_f - x_i) / 1000$$

Donde:

Q= caudal de vapor necesario en el ambiente, en kg/h, asumiendo el peso específico a 4 °C igual a 1kg/m<sup>3</sup>

V = volumen de aire, en m<sup>3</sup>

Xi = humedad absoluta del aire a humidificar en g./kg.

Xf = humedad absoluta deseada en g./kg.

Ya que en el laboratorio se requiere renovación del aire y se proyecta el uso de un humidificador sin conductos, el volumen a tratar "V" se establece como el volumen del local por el número de renovaciones horarias.

Para el cálculo de renovaciones por hora, se considera que el volumen de las secciones es: 9,48 m x 5,55 m x 2,5 m = 131,5 m<sup>3</sup>, y que el caudal de renovación esta establecido de 141 cfm equivalentes a 3,99 m<sup>3</sup>, por lo tanto para renovar un volumen de 131,5 m<sup>3</sup> con un caudal de renovación de 3,99 m<sup>3</sup>/min, serán necesarios:

$$131,5 \text{ m}^3 / 3,99 \text{ m}^3/\text{min} = 32,95 \text{ min}$$

Por lo tanto en una hora se llevarán a cabo aproximadamente 2 renovaciones del aire de las secciones. El volumen a considerar para el cálculo del caudal de vapor necesario es de:

$$131,5 \text{ m}^3 \times 2 = 263 \text{ m}^3$$

Ahora se procede a encontrar con ayuda del gráfico sicrométrico, el valor máximo de humedad absoluta requerida para alcanzar la humedad relativa deseada, después de un proceso de calefacción. Se considerarán los cambios de temperatura desde el límite inferior hasta el límite superior de cada uno de los rangos de control de cada sección.

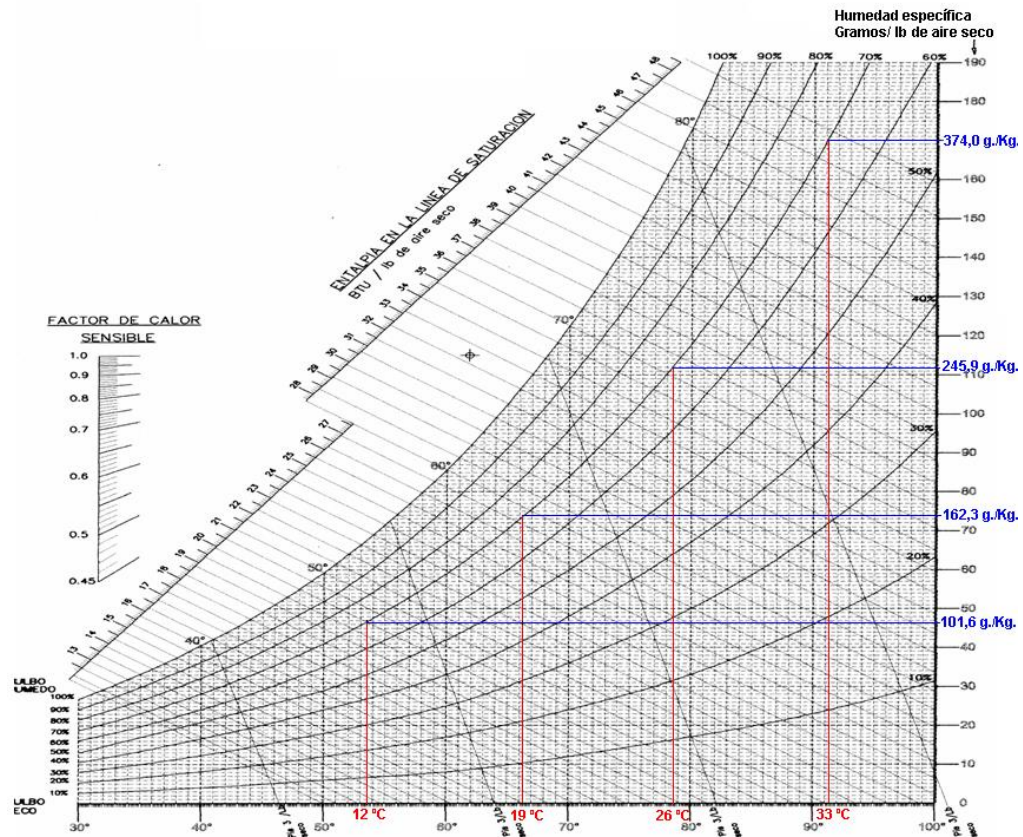
En la figura 4.5 se muestra que si en la sección 1 ocurre un cambio de temperatura de 12°C a 70%HR a 19°C, sucede un cambio de humedad relativa a la curva de 44%. De aquí se deriva que para volver al valor de humedad relativa del 70%, es necesario variar el valor de humedad absoluta de 101,6 a 162,3 g./kg..

En la sección 2, un cambio de 19 °C a 70%HR a 26 °C genera un cambio del valor de humedad relativa al 46%. El cambio de humedad absoluta requerido para volver a la curva del 70% es de 162,3 a 245,9.

En la sección 3, un aumento de temperatura desde 26 °C encontrándose en la curva del 70% de humedad relativa hasta 33 °C, genera un cambio de humedad relativa a la curva del 44%. Este cambio hace que se requiera cambiar la humedad absoluta de 245,9 a 374,0 g./kg. para mantener el 70% HR.



**Figura 4.5 Variación de humedad absoluta para mantener el %HR ante procesos de calefacción**



Con los valores de volumen y humedades absolutas se procede a calcular el caudal de vapor necesario para cada una de las secciones, con la formula:

$$Q = V \times 1,2 \times (x_f - x_i) / 1000$$

Para la sección 1, con un volumen de 263 m<sup>3</sup> y una diferencia de humedades necesaria para mantener constante la HR en 70% ante un calentamiento de 12 °C a 19 °C de (101.6 a 162,3 g./kg.) se tiene que será necesario un caudal de:

$$Q1 = 263 \times 1,2 \times (162,3 - 101,6) / 1000$$

$$Q = 19,16 \text{ Kg/h}$$

Para la sección 2, con un volumen de 263 m<sup>3</sup> y una diferencia de humedades, necesaria para mantener constante el % de HR en 70% ante un calentamiento de 19°C a 26°C, de (162,3 – 245,9 g./kg.) se tiene que será necesario un caudal de:

$$Q2 = 263 \times 1,2 \times (245,9 - 162,3) / 1000$$

$$Q = 26,38 \text{ Kg/h}$$

Para la sección 3, con un volumen de 263 m<sup>3</sup> y una diferencia de humedades, necesaria para mantener constante el % de HR en 70% ante un calentamiento de 19°C a 26°C, de (245,9 – 374,0 g./kg.) se tiene que será necesario un caudal de:

$$Q3 = 263 \times 1,2 \times (374,0 - 245,9) / 1000$$

$$Q = 40,42 \text{ Kg/h}$$

Por lo tanto, se concluye que los equipos humidificadores de cada sección deben estar en capacidad de producir un caudal de vapor de acuerdo al volumen de las secciones y a los cambios de temperatura que puedan presentarse, y que además se debe considerar un factor de seguridad para el debido tratamiento de las pérdidas de vapor de agua a través de las estructuras de la construcción. Se considera un factor de seguridad pequeño (“de 1kg/h para una pérdida de 5 kcal/h”) ya que conservando las especificaciones de los materiales para la construcción del laboratorio con la respectiva adición de las capas de impermeabilizantes propuestas, se pueden considerar valores bajos de pérdidas y cargas.

Por lo tanto se proponen las siguientes capacidades de producción horaria para los equipos humidificadores de cada sección climática:

**Sección 1:**

$$Q = 19,16 \text{ Kg/h} + \text{factor de seguridad (pérdida de vapor de } - 4,313\text{kcal/h)} = 20 \text{ kg/h}$$

**Sección 2:**

$$Q = 26,38 \text{ Kg/h} + \text{factor de seguridad (pérdida de vapor de } - 6,651\text{kcal/h)} = 28 \text{ kg/h}$$

**Sección 2:**

$$Q = 40.42 \text{ Kg/h} + \text{factor de seguridad (pérdida de vapor de } -15,327\text{kcal/h)} = 44 \text{ kg/h}$$

En cuanto al deshumidificador:

- **Características.** Se propone una rueda deshumidificadora modelo Honey Combe, a base de Silica Gel (desecante no nocivo) y tamiz molecular, con una velocidad entre 0,5 y 6 revoluciones por hora (RPH), compacto, para ser ubicado dentro de cada sección. Para un alcance eficiente se propone ubicarlo en una parte central contiguo al equipo deshumidificador, para permitir la concurrencia homogénea del aire a deshumidificar.
- **Capacidad de deshumidificación.** Ante disminuciones de temperatura desde el límite superior hasta el límite inferior de los rangos de control de cada sección climática, y con base en los resultados obtenidos en la figura 4.5 se analiza que los equipos deshumidificadores deberán estar en capacidad de permitir variaciones en el valor de humedad absoluta de hasta 129 g./kg., correspondientes a el cambio en la sección 3 que es donde más debe deshumidificarse ante un proceso de refrigeración.

En cuanto a las cargas de calor latente (vapor de agua) que el deshumidificador debe contrarrestar se considera lo siguiente: al ser las secciones de acceso restringido, la carga introducida por el número de personas es mínima. Los eventuales ingresos de aire exterior por infiltraciones también se desprecian considerando que: la frecuencia de apertura de puertas es baja, las puertas estarán ubicadas después de un corredor que funciona como cámara de aire, y además, por el uso de cortinas de vinilo tipo persiana vertical propuesto. Y las cargas por transmisión de vapor a través de las estructuras son muy pequeñas (ver Anexo D), gracias a la impermeabilidad de la construcción.

Es importante mencionar que los humidificadores y deshumidificadores, deben contar con su respectiva unidad de control y válvulas de control acordes al rango de humedad relativa que manejan. Así el equipo humidificador debe tener un sistema hidráulico con una válvula de control que le permita la alimentación de agua de manera automática, igualmente el deshumidificador debe contar con un depósito y una válvula con un sistema de desagüe para eliminar hacia el exterior de las secciones el agua retirada del aire tratado.

Ambos equipos deben estar dotados de sensores de humedad, sensores de temperatura, y de nivel de flujo. Se deben prever también la construcción de las acometidas para la alimentación eléctricas de los equipos.

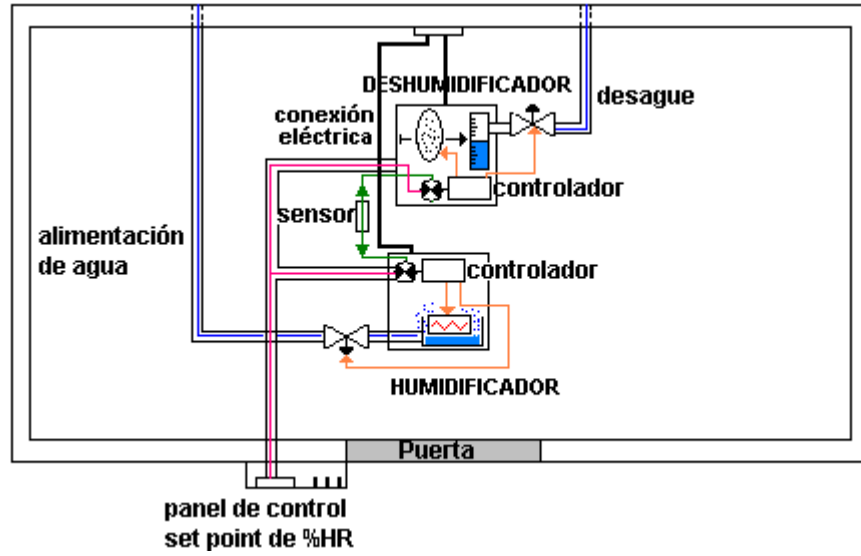
Las especificaciones mínimas que debe cumplir el sistema para el control de la humedad en las secciones del área de incubación del laboratorio, son:

|   |   |  |
|---|---|--|
| Equipo 1                                  | Humidificador por resistencias eléctricas, compacto.  |  |
| Capacidad                                 | 2,5 Galones por día   |  |
| Producción horaria                        | entre 20 a 45 kg de vapor por hora  |  |
| Equipo 2                                  | Deshumidificador por rueda desecante, compacto, de Silica Gel y tamiz molecular, modelo: Honey Combe, |  |
| Velocidad                                 | Estándar de 0,5 a 6 Revoluciones por hora   |  |
| Instalación                               | Individual (para cada sección)  |  |
|   | Interior, directamente al ambiente con distribuidores ventilados                                      |  |
|   | Ubicación: central, empotrado en el cielorraso  |  |
| Rango de control                          | 0 – 100% HR   |  |
| Temperaturas                              | 0 a 50 °C   |  |
| Factor higroscópico                       | Alto  |  |
| Máx. Carga de calor latente a compensar   | 15 Kcal/h   |  |
| Máx. Pérdida de calor latente a compensar | 10 Kcal/h   |  |

En la figura 4.6 se muestra una posible configuración del sistema de control de humedad. En la vista superior de una sección climática, se muestra la ubicación de los equipos: humidificador por resistencias eléctricas y deshumidificador por rueda desecante, con sus respectivas conexiones eléctricas e hidráulicas. Para programar los controladores se debe prever una acometida para los pares de cables necesarios, desde el panel de control en la parte exterior de la sección, hasta cada equipo.

#### 4.6 ESQUEMA DEL SISTEMA DE CONTROL DE HUMEDAD

Figura 4.6 Esquema del Sistema de Control de Humedad. Vista superior



## 5. CONCLUSIONES

En este proyecto se diseñan los sistemas de control para las variables iluminación, temperatura y humedad, a fin de obtener, ambiente controlado en el área de incubación de un laboratorio de biotecnología. Mediante la ingeniería se ha logrado a partir de especificaciones mínimas, investigación y visitas técnicas, plantear la verdadera dimensión del problema, que es: proyectar las especificaciones del laboratorio de biotecnología, acordes a: la teoría de técnicas de cultivos in Vitro, el estudio de las variables a controlar, la tecnología e instrumentación disponible, las estrategias de control, para diseñar los sistemas que ofrecieran las mejores respuestas.

El proyecto ofrece una solución tecnológica viable al problema de obtener un ambiente controlado para el cultivo in Vitro de especies vegetales que se desarrollan en diferentes climas, mediante el acondicionamiento de las variables mencionadas. Está basada en: el estudio de diversas tecnologías comerciales para el control de las variables, el dimensionamiento de los equipos y la determinación de sus especificaciones mínimas, y, se tuvo en cuenta los costos de adquisición, implementación, funcionamiento y mantenimiento.

En el desarrollo, se tuvo presente la interacción que existe entre temperatura, humedad e iluminación, y otras variables fundamentales como: condiciones de asepsia, ventilación, para la proyección de la planta física y los sistemas de control.

Las soluciones presentadas son el resultado de un análisis académico, que ha sido soportado en la experiencia de personas o empresas especializadas en diferentes temáticas. La facultad de Ciencias Agropecuarias, al construir su laboratorio e implementar esta propuesta, podría convertirse en pionero colombiano en biotecnología, dado que, el proyecto está basado en modernos conceptos teóricos y fue enriquecido por diversos profesionales; el conjunto cubre un rango amplio de investigaciones y aplicaciones en esta área.

El propósito común ha sido producir una solución viable y factible, para los científicos y técnicos que actualmente investigan el cultivo de tejidos vegetales y lo aplican al mejoramiento de las plantas, y útil además para estudiantes universitarios, profesores, técnicos, y profesionales de diversas áreas que deseen familiarizarse con los laboratorios de ambiente controlado.



## BIBLIOGRAFIA

BOTERO. Camilo. Memorias del curso “climatización en cuartos limpios”. Cali, 2005.

CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY. Tratado de Refrigeración y Aire Acondicionado. Marcombo, Boixare Editores, Barcelona – México.

COMITÉ DE CAFETEROS. Anuario Meteorológico. Estación Manuel Mejía – Tambo Cauca, 2003.

FERNANDEZ AMIGÓ. José. Climatización, cálculo e instalaciones. Barcelona: CEAC, 1980.

GAY. Charles Merrick. Instalaciones en los edificios. Barcelona: Gustavo Gili, 1982.

INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. Información de Meteorología Aeronáutica. Aeropuerto Alfonso Bonilla Aragón – Santiago de Cali, 2004

LASCARRO. Jairo Francisco. Memorias Seminario Internacional de Proyectos de Aire Acondicionado. Énfasis en calidad del aire, Pereira, 1999

ROSÓN. María Verónica. Distintos tipos de humidificadores, dimensionamiento. Elección del tipo más adecuado para cada aplicación. PDF.