

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
VENTILACIÓN NATURAL FORZADA A PARTIR DE TUBOS ENTERRADOS
PARA ESPACIOS INTERIORES EN EL EDIFICIO ELÉCTRICA II**

**MAGDA JOHANNA ORDUZ LAMUS
CESAR AUGUSTO ARIAS DURÁN
LUIS FERNANDO PRIETO JIMÉNEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA - 2011**

**DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE
VENTILACIÓN NATURAL FORZADA A PARTIR DE TUBOS ENTERRADOS
PARA ESPACIOS INTERIORES EN EL EDIFICIO ELÉCTRICA II**

MAGDA JOHANNA ORDUZ LAMUS
Para optar por el título de Ingeniera electrónica
CESAR AUGUSTO ARIAS DURÁN
LUIS FERNANDO PRIETO JIMÉNEZ
Para optar por el título de Ingeniero electrónico

Director de Proyecto
ING. GERMÁN ALFONSO OSMA PINTO

Codirector de Proyecto
MSC.ALFREDO RAFAEL ACEVEDO PICON

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA - 2011

Dedicatoria

A Dios, Por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud para lograr mis objetivos, además de su infinita bondad y amor. A mis padres, A mi madre Margarita Lamus Rodriguez, Por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor, A mi padre Rafael Orduz, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor. A mi padre adoptivo Bernardo Ojeda por su apoyo durante todos estos años y por su amor. A mis familiares en especial a mi tia Lina Maria por el apoyo en todo momento. A mis maestros por su gran apoyo y motivación para la culminación de nuestros estudios profesionales y para la elaboración de esta tesis. A mis amigos que nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional y personal. A mi novio por su gran apoyo y paciencia durante la elaboración de la tesis y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de esta tesis. ¡Gracias a ustedes!

Magda Johanna Orduz Lamus

A mis creencias en Dios como ser supremo que permite y me da cada espacio de vida, a mi papá, mi mamá, mi hermano, una persona especial para mí y mis amigos de verdad que brindaron la fortaleza para luchar día a día y dar un ejemplo de realización personal.

Cesar Augusto Arias Durán

A mi familia, que han sido mi apoyo y mi motivación durante todo este tiempo. A mi mama, mi papa, Natalia y Diana. A Diana Rugeles por ser una persona incondicional, a Oliva y a todos mis amigos que me apoyaron de una u otra forma en este proceso.

Luis Fernando Prieto Jiménez

Agradecimientos

Agradecemos a cada una de las personas que contribuyeron de forma directa en el desarrollo de este proyecto, al Ingeniero Germán Osma, Msc. Alfredo Rafael Acevedo Picon, y especialmente al Ingeniero Jorge Reyes. De manera especial a los compañeros que con sus aportes, sugerencias y acompañamiento participaron en la elaboración de este trabajo.

Contenido

INTRODUCCIÓN	20
1 ASPECTOS TÉCNICOS DE DISEÑO	22
1.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO	22
1.1.1 APROVECHAMIENTO DE LA INERCIA TÉRMICA	22
1.2 GENERALIDADES	23
1.3 TIPO DE SUELO	24
1.4 DIMENSIONADO DEL SISTEMA	25
1.4.1 PROFUNDIDAD	26
1.4.2 TEMPERATURA	27
1.4.3 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR CALOR AIRE-TIERRA	28
1.4.4 SELECCIÓN DEL VENTILADOR	36
1.5 CARGA TÉRMICA	38
1.5.1 CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DEL EDIFICIO.	39
2 SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	45
2.1 ANÁLISIS DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN	45
2.2 CLASIFICACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	46
2.3 PLATAFORMAS DE INTEGRACIÓN Y PROGRAMACIÓN	49
2.4 COMPARACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN	50
2.5 EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PROTOCOLOS MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP	50
3 COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA INMÓTICO PARA EL SIS- TEMA DE VENTILACIÓN NATURAL FORZADO	54
3.1 SENSORES	55
3.1.1 SENSORES DE TEMPERATURA	55
3.1.2 SENSOR DEL CAUDAL DE AIRE	59
3.2 ACTUADORES	64
3.2.1 CLASIFICACIÓN	65
3.3 UNIDAD DE CONTROL	67
3.4 ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES	68
4 IHM-INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA	70
4.1 INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW	73
4.2 ENVÍO DE DATOS TCP	76

5	RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	79
5.1	RESULTADOS Y CONCLUSIONES	79
5.1.1	Dimensionamiento del ducto (Capítulo 1)	79
5.1.2	Evaluación y análisis de los protocolos mediante la metodología AHP (Capítulo 2)	80
5.1.3	Componentes básicos del sistema inmótico del sistema de ventilación natural forzada (capítulo 3)	81
5.1.4	Algoritmo de Control (Capítulo 4)	81
5.1.5	IHM-INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (Capítulo 4)	81
5.1.6	Carga térmica (Capítulo 1)	82
5.2	RECOMENDACIONES	82
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84
	ANEXOS	87

Índice de tablas

1	Objetivos y alcances del libro	20
1.1	Relación del % de renovación con la longitud de los tubos para dos temperaturas objetivo.	36
1.2	Comparación de ventilador axial de distintos fabricantes.	38
1.3	Posibles dimensiones de los cuartos del edificio.	40
1.4	Temperatura registrada en la estación meteorológica del IDEAM ubicada en la UIS.	40
1.5	Temperatura tomada en la estación meteorológica adquirida por la escuela. .	41
1.6	Calor transferido a través del suelo.	41
2.1	Características para la interconexión entre dispositivos[1].	47
2.2	Ventajas y desventajas de diferentes tipos de redes de datos LAN[1].	48
2.3	Estándares de control para un sistema de gestión de edificios[2].	48
2.4	Plataformas de integración y programación.	49
2.5	Descripción de las características para los protocolos.	50
2.6	Resultados obtenidos de la metodología AHP.	51
3.1	Componentes básicos de un sistema inmótico[3].	55
3.2	Características de las RTD más comunes.	57
3.3	Elección de la RTD a utilizar.	58
3.4	Selección del transmisor de temperatura.	59
3.6	Características de algunos rotámetros comunes.	59
3.5	Ventajas y desventajas de caudalímetros.	60
3.7	Sensores de humedad relativa.	61
3.8	Sensores de CO ₂	62
3.9	Sensores de presencia.	64
3.10	Actuadores tipo corredera para las ventanas.	66
3.11	Aire acondicionado de 24 kBTU para el Edificio Eléctrica II.	67
4.1	Convenciones para el diagrama grafcet del sistema.	71
4.2	Comportamiento en el tiempo de los elementos inmóticos del sistema de ventilación natural forzada.	73
4.3	Convenciones de la Tabla 4.2.	73
C.1	Mediciones de temperatura del suelo tomadas a 3m de profundidad	98

E.1	Parámetros para la solución del método de Fanger	108
E.2	Escala de sensación térmica PMV y PPD	108
E.3	a) Metabolismo basal de las personas en función de la edad y sexo, b) Metabolismo para la postura corporal. Valores excluyendo el metabolismo basal	110
E.4	a) Metabolismo basal de las personas en función de la edad y sexo, b) Metabolismo para la postura corporal. Valores excluyendo el metabolismo basal	110
E.5	Metabolismo para distintos tipos de actividades. Valores excluyendo el metabolismo basal	111
E.6	Metabolismo del desplazamiento en función de la velocidad del mismo. Valores excluyendo el metabolismo basal	112
E.7	Métodos para la estimación de la tasa metabólica	114
E.8	Consumo metabólico según el tipo de actividad	114
E.9	Consumo metabólico según la profesión	115
F.1	Características de diferentes tubos plásticos.	119
G.1	Características Térmicas de diferentes tipos de suelo	122
H.1	Factor de equivalencia de tiempo de exposición a ruido	125
H.2	tiempo de exposición a ruido según la resolución 1792 de mayo 3 de 1990	125
H.3	Valores Límites permisibles para Ruido de Impacto.	125
I.1:	Concentraciones de ciertos Contaminantes Gaseosos del Aire	126
I.2:	Normas Locales de Calidad de Aire utilizadas en el Cálculo del IBUCA	127
I.3:	Concentración y Tiempo de Exposición de los Contaminantes	127
I.4:	Niveles de Clasificación Epidemiológica del IBUCA	128
I.5:	TASAS DE VENTILACIÓN DEL ESTÁNDAR 62-2001	128
J.1	Tabla de Scatty para el protocolo de comunicación	133
J.2	Matriz de asignación	133
J.3	Matriz Normalizada	134
J.4	134
J.5	Cociente de consistencia	134
J.6	Comparación entre los protocolos más comúnmente utilizados en domotica e inmotica	135
J.7	Matriz de prioridad global	135
J.8	Valores de aleatoriedad	136
J.9	Valores de aleatoriedad	137
J.10	Valores de aleatoriedad	138

Índice de figuras

1.1	Sistema de ventilación natural forzada utilizando tubos enterrados. (fuente: Los autores del libro.)	23
1.2	Columna litológica de Bucaramanga fuente: Garcia N.J.[4].	24
1.3	Perfil geotécnico del suelo de Bucaramanga[5].	25
1.4	Gráfica de temperatura respecto a la profundidad.	26
1.5	Caracterización de los termistores de diferente material.	29
1.6	Mediciones de temperatura realizadas con termistores NTC, en el mes de Octubre.	30
1.7	Comparación en la medición de temperatura entre un termistor NTC y una RTD PT100.	31
1.8	a) (izquierda) Mediciones realizadas con los huecos abiertos a 1m, 2m, 3m. b) (derecha) Mediciones realizadas con los huecos llenos de tierra parcialmente.	32
1.9	Mediciones realizadas con los sensores enterrados a diferentes distancias.	32
1.10	Datos medidos de la temperatura del suelo a 3m de profundidad.	33
1.11	Renovaciones/h vs Cantidad de tubería.	36
1.12	Estimación de la carga térmica de cada cuarto.	42
1.13	Estimación de la carga térmica de cada recinto.	43
1.14	Estimación de la carga térmica de cada cuarto.	44
2.1	Esquema de tipo de protocolos según su licencia[6].	46
2.2	Esquema de tipo de protocolos según su aplicación[6].	47
2.3	Resultados de la metodología AHP.	52
2.4	Trama genérica del mensaje según el código empleado.	53
3.1	Esquema general de un sistema inmótico.	54
3.2	Clasificación de los sensores[7].	56
3.3	Sensores de temperatura.	56
3.4	RTD según la tolerancia.	57
3.5	RTD PR-12-2-100-1/4-6-E-RP.	58
3.6	Transmisor pyromation TM01-440.	59
3.7	Rotámetro PCE-EE-65.	60
3.8	Sensores de humedad relativa[8].	61
3.9	Sensor de humedad PCE-EE22.	62
3.10	Sensor de CO ₂ MOL-CO ₂ -3-10V.	63
3.11	Tipos de sensor de presencia.	63
3.12	Sensor de presencia ODC0S-11W.	64

3.13	Diagrama de bloques de un sistema inmótico convencional.	64
3.14	Clasificación de los actuadores.	65
3.15	Estimación de carga térmica para el aire acondicionado.	66
3.16	Aire acondicionado LG-SJ242CD.	67
3.17	Distribución de los dispositivos en el Edificio de Eléctrica II.	68
3.18	M-DAQ.	69
4.1	Diagrama graceft del sistema de control del sistema.	71
4.2	Comportamiento en el tiempo de algunos elementos inmóticos.	72
4.3	Pestaña de animaciones del sistema de ventilación natural forzada.	74
4.4	Pestaña buscador de archivos.	75
4.5	Pestaña bosquejo del sistema.	75
4.6	Estructura de control.	76
4.7	Envío de datos TCP.	77
4.8	Algoritmo de control del sistema de automatización para el confort térmico.	78
D.1	Representación gráfica de la tabla Psicrométrica No.1 ASHRAE[9]	100
D.2	Escala de temperatura bulbo seco	101
D.3	Escala de temperatura bulbo húmedo	102
D.4	Escala de humedad especifica	102
D.5	Escala humedad relativa	103
D.6	Escala temperatura de rocío	104
D.7	Escala de entalpía	104
D.8	Escala de volumen especifico	105
E.1	Disipación de calor del cuerpo humano.	113
E.2	Porcentaje estimado de insatisfechos y voto medio[10]	113
G.1	Conductividad de diferentes tipos de suelo	122
J.1	Esquema Versatilidad y Adaptabilidad	130
J.2	Esquema de Facilidad y Accesibilidad	131
J.3	Esquema de costo	131
J.4	Esquema de Características Técnicas	132
J.5	Esquema de Parámetros del Modelo	132

Índice de Anexos

A. MODELO DE BENKERT, HEDIDT Y SCHÖLER.	88
B. ALGORITMOS UTILIZADOS EN EL SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL FORZADA.	93
C. MEDICIONES DE LA TEMPERATURA DEL SUELO A 3m DE PROFUNDIDAD	97
D. HUMEDAD RELATIVA	99
E. EL MÉTODO DE FANGER. NORMA UNE-EN ISO 7730	106
F. TIPO DE MATERIAL DE LOS DUCTOS	118
G. PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO	121
H. RUIDO	124
I. CALIDAD DE AIRE	126
J. METODOLOGÍA AHP	130

RESUMEN

TÍTULO: DISEÑO DE LA AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL DE UN SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL FORZADA A PARTIR DE TUBOS ENTERRADOS PARA ESPACIOS INTERIORES EN EL EDIFICIO ELÉCTRICA II¹

AUTORES: Orduz L. Magda J., Arias D. Cesar A., Prieto J. Luis F.²

PALABRAS CLAVE: edificios bioclimáticos, tubos enterrados, pozo canadiense, carga térmica, intercambiador tierra-aire, Edificio Eléctrica II, ventilación natural forzada.

Los pozos canadienses se basan en el uso de la energía térmica del subsuelo para adecuar la temperatura del aire, con el fin de ventilar edificaciones, para reducir así el consumo de energía eléctrica por el uso de equipos de climatización.

El pozo canadiense es una estrategia financieramente atractiva por su menor inversión en comparación con un sistema de climatización convencional. Debe destacarse que el sistema es especialmente duradero y ecológico

El propósito del diseño planteado en este trabajo, es realizar un análisis de las especificaciones técnicas necesarias para implementar un sistema de ventilación natural forzada en el edificio de Eléctrica II, con el fin de establecer los parámetros mínimos para su funcionamiento, adaptándolos al comportamiento climático de la ciudad de Bucaramanga.

En primera instancia, se establecen las características técnicas del sistema, a partir de la aplicación de trabajos desarrollados en otros países. Luego se presenta la selección del protocolo de comunicaciones con base en la aplicación de la metodología AHP.

Dentro del trabajo se enumeran también, los componentes necesarios para la automatización y control del sistema, considerando como criterios de selección el consumo de energía y el precio.

Por ultimo se expone una interfaz hombre máquina desarrollada con el fin de automatizar y controlar el comportamiento de los elementos inmóticos, del sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados.

¹Trabajo de grado en modalidad seminario de investigación.

²Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingenierías Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones, Ingeniería Electrónica, Director: Ing. Germán Alfonso Osma Pinto, Codirector: Msc.Alfredo Rafael Acevedo Picon.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AUTOMATION AND CONTROL OF A NATURAL FORCED VENTILATION SYSTEM BY BURIED PIPE FOR INDOOR ELÉCTRICA II BUILDING³

AUTHORS: Orduz L. Magda J., Arias D. Cesar A., Prieto J. Luis F.⁴

KEY WORDS: bioclimatic buildings, buried pipes, Canadian well, heat load, ground-air heat exchanger, Building Electrical II, forced natural ventilation.

Canadian wells are based on the use of thermal energy from the subsoil to adjust the air temperature in order to ventilate buildings, thereby reducing power consumption by the use of air conditioning equipment.

The Canadian well, is a financially attractive strategy due to its low cost compared to conventional air conditioning system. It should be noted that system is highly durable and environmentally friendly.

The purpose of design in this paper is to analyze the technical specifications necessary to implement a natural ventilation forced system in the building Eléctrica II, to establish minimum standards for operation, it adapting to climatic behavior of Bucaramanga city.

Firstly, establishing the technical characteristics of the system, based on similar works developed in other countries. Then comes the choice of communications protocol using the AHP methodology.

Within the work are also listed, the components needed for automation and control system, considering as criteria energy consumption and price.

finally is exposed a human-machine interface developed to automate and control the behavior inmotoc elements, of natural ventilation forced system by buried pipes.

³Grade work, seminar research.

⁴Physics and Mechanics Engineering Faculty, Electrical Electronic and Telecommunications Engineering School, Electronic Engineering, Director:Ing. Germán Alfonso Osma Pinto, Co-Director:Msc.Alfredo Rafael Acevedo Picon.

INTRODUCCIÓN

El propósito del diseño de la automatización y control de un sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados, es realizar un análisis de las especificaciones técnicas necesarias para implementar un sistema de este tipo en el edificio de Eléctrica II, con el fin de establecer los parámetros mínimos para su funcionamiento adaptándolos al comportamiento climático de la ciudad de Bucaramanga.

A causa de que los edificios consumen entre 30 % y 40 % de la energía a nivel mundial, y adicional a esto emiten cifras considerables de CO₂ y desechos sólidos, es necesario contribuir al desarrollo de estrategias de eficiencia energética, basadas en sistemas de automatización y control para producir mejores condiciones de confort térmico en edificaciones, y dar paso a la arquitectura bioclimática que busca aprovechar el clima y las condiciones del entorno[11].

El presente trabajo denominado "Diseño de la automatización y control de un sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados para espacios interiores en el Edificio Eléctrica II", avalado por el grupo GISEL de la E3T, es el primer esfuerzo para el establecimiento de un sistema de ventilación natural forzada a la medida del edificio. La Tabla 1, describe los objetivos y alcances del proyecto planteado.

Tabla 1: Objetivos y alcances del libro

OBJETIVO GENERAL	
Diseñar una estrategia de automatización y control para el sistema de ventilación natural forzada de espacios interiores cerrados del Edificio Eléctrica II a partir del uso de tubos enterrados con el fin de facilitar la satisfacción de confort térmico y reducir el consumo de energía eléctrica de sistemas de aire acondicionado.	
OBEJTIVOS ESPECÍFICOS	ALCANCES
Establecer las características técnicas del sistema de ventilación natural forzada para el Edificio Eléctrica II	Se precisará las especificaciones y características técnicas del sistema de ventilación natural forzado, indicando los requerimientos mínimos que se deben cumplir para que la calidad del aire que ingresa al edificio y el confort térmico sean adecuados para la operación del sistema de ventilación natural forzada
Seleccionar el protocolo de comunicaciones adecuado y la instrumentación necesaria para controlar el sistema de ventilación natural forzada para el Edificio Eléctrica II	Se escogerá el protocolo de comunicación que utilizará el sistema de ventilación natural forzado, con análisis en conjunto de los sistemas de iluminación y seguridad del edificio. Además se seleccionarán los instrumentos a ser utilizados para la automatización teniendo como parámetros de selección el consumo y el precio
Realizar una propuesta de la estrategia de automatización y control para el sistema de ventilación natural forzada establecido	Después de precisarse las características técnicas del sistema, se procederá a establecer la estrategia de automatización y control del sistema de ventilación natural forzado
Diseñar una interfaz hombre-máquina que permita el monitoreo de las variables del sistema de ventilación, utilizando LabView como software de diseño.	La interfaz se basará en el protocolo de comunicaciones a utilizar. Permitirá el monitoreo de variables tales como: velocidad del aire, temperatura exterior, temperatura del recinto, temperatura del suelo en la pared de los tubos, caudal de aire, humedad relativa. Adicionalmente, se podrá visualizar en tiempo real el comportamiento de los dispositivos y una animación gráfica para un mejor entendimiento del sistema de automatización y control

Se presenta una solución concreta y factible, aplicando la eficiencia energética, al problema del consumo excesivo de energía eléctrica en el confort térmico de espacios interiores, con la apropiación tecnológica de los tubos enterrados y un diseño que contempla la automatización y control de un sistema de ventilación natural forzada que permitirá monitorizar los parámetros que componen el sistema.

Este libro expone el trabajo de investigación realizado para la automatización de un sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados, sistema denominado pozos canadienses. Se presentan aspectos para el diseño de la estrategia de automatización y control que pueda facilitar la satisfacción de confort térmico y la reducción del consumo de energía eléctrica debido a sistemas de aire acondicionado.

El sistema de pozos canadienses es utilizado para el acondicionamiento directo de la temperatura del aire que fluye al interior de las construcciones al actuar como intercambiador de calor tierra-aire. Los ductos enterrados funcionan en bucle abierto con el espacio a climatizar. Un impulsor fuerza la circulación de aire para alcanzar una determinada temperatura a medida que avanza en el tendido tubular.

En el capítulo 1 se establecen las características técnicas del sistema, a partir de la aplicación de trabajos desarrollados en otros países, previo análisis para la adaptación de modelos allí presentados, según condiciones climáticas y geográficas de Bucaramanga.

En el capítulo 2 se presenta la selección del protocolo de comunicaciones con base en la aplicación de la metodología AHP. Se consideró de manera particular el enfoque práctico hacia su soporte en sistemas de automatización y control sobre el proceso de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados.

El capítulo 3 enumera los componentes necesarios para la automatización y control del sistema, al considerar como principales criterios de selección el consumo de energía y el precio, con el fin de diseñar un sistema de automatización que pueda contribuir con el uso racional de la energía.

En el capítulo 4 se expone una interfaz hombre máquina desarrollada con el fin de automatizar y controlar el comportamiento de los elementos inmóticos necesarios para el funcionamiento del sistema de ventilación natural forzada. Así mismo, se muestran resultados de simulación de esta interfaz mediante el envío de datos por medio TCP/IP para corroborar el correcto funcionamiento del algoritmo de control propuesto.

Finalmente se presentan los resultados y conclusiones del diseño de automatización y control realizado para el sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados.

1

ASPECTOS TÉCNICOS DE DISEÑO

En este capítulo se describe el principio de funcionamiento del sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados, y se realiza una adaptación primaria de parámetros, condiciones climáticas y geográficas de la región, más específicamente de la Universidad Industrial de Santander en Bucaramanga.

1.1. PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Los pozos canadienses se basan en el uso de la energía térmica del subsuelo para adecuar la temperatura del aire, con el fin de ventilar edificaciones, para reducir así el consumo de energía eléctrica por el uso de equipos de climatización[12].

En un sistema de este tipo, el aire ingresa al pozo por una toma debidamente protegida, gracias a un impulsor es repartido a las estancias del edificio a climatizar, con lo cual se asegura un aporte de aire nuevo al lugar[12], en la Figura 1.1, se observa un diagrama ilustrativo de la instalación del sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados.

El pozo canadiense es una estrategia financieramente atractiva por su menor inversión en comparación con un sistema de climatización convencional. Debe destacarse que el sistema es especialmente duradero y ecológico[12].

1.1.1. APROVECHAMIENTO DE LA INERCIA TÉRMICA

La inercia térmica es la capacidad que tiene la masa de conservar la energía térmica recibida e ir liberándola progresivamente[13].

Es un concepto clave en las técnicas bioclimáticas ya que la capacidad de acumulación térmica de las soluciones que conforman un elemento arquitectónico es básica para conseguir el adecuado nivel de confort y la continuidad en las instalaciones de climatización[13].

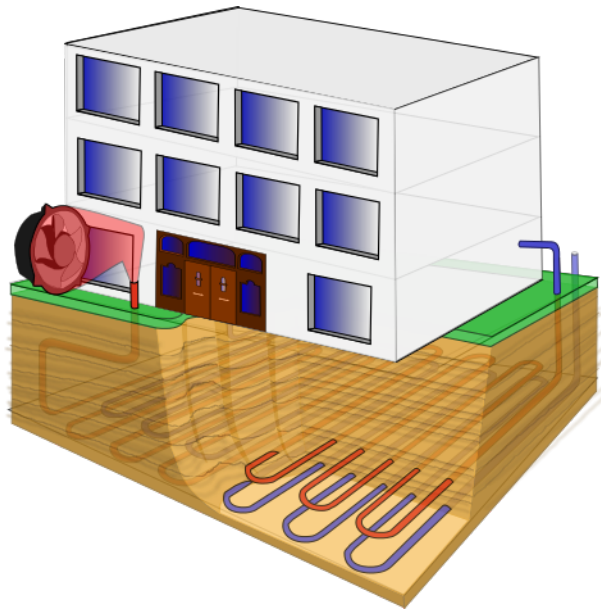


Figura 1.1: Sistema de ventilación natural forzada utilizando tubos enterrados. (fuente: Los autores del libro.)

1.2. GENERALIDADES

La técnica que se aplica a la ventilación natural forzada por medio de tubos enterrados es conocida también alrededor del mundo como intercambiadores de calor tierra-aire, cuyo fin es reducir el uso de aire acondicionado y así lograr una disminución en el consumo de energía en el edificio[14].

Un parámetro importante de este sistema es la profundidad a la cual se deben enterrar los tubos, se ha considerado que una profundidad de $3m$ es un valor razonable con el fin de reducir costos de implementación.

Dentro del proceso de diseño se debe establecer la temperatura en las paredes de los tubos enterrados, para luego especificar la longitud y el diámetro de los tubos. A mayor longitud de los tubos existe una mayor transferencia térmica y aumenta el rendimiento del sistema.[12].

El diámetro de los tubos influye indirectamente con la potencia con que se debe inyectar el aire al sistema desde el exterior y también influye en la velocidad con que el aire circula a través de los tubos. Dentro del análisis se debe considerar un diámetro de los tubos, de tal manera que exista un balance entre transferencia de calor y flujo de aire que circula por los tubos.

Las posibles capas de aire que queden en las cercanías de las paredes de los tubos pueden causar la aparición de humedad dentro de ellos, así como la posibilidad de una condensación del vapor de agua[15].

Las regiones ubicadas en el trópico suelen ser muy húmedas, esto se ve reflejado en las

características del suelo, Los suelos húmedos son preferibles a los suelos secos debido a su mejor conductividad térmica aunque un excesivo grado de humedad no es conveniente. Por lo cual, se debe tener en cuenta el material de los tubos que se desean enterrar con el fin de prevenir los efectos de la corrosión que pueda producir la humedad del suelo[16].

1.3. TIPO DE SUELO

La identificación del tipo de suelo en la Universidad industrial de Santander, se realizó con base en los datos presentados en el trabajo análisis dinámico del suelo en el campus de la Universidad[5]. Además de esto se corroboran los datos con el libro Hemerlin, 2007[17], donde explica la clase de suelo del área metropolitana de Bucaramanga, según datos recopilados por Ingeominas 2001.

La columna litológica del depósito aluvial de la ciudad de Bucaramanga se definió patentemente en el estudio realizado por Ingeominas (Ingeominas, 2001). En la Figura 1.2 se muestra el modelo que reúne las columnas resultantes de las perforaciones realizadas, específicamente la definida por la perforación en el sector “Parque de los niños”, zona contigua a la ubicación de la Universidad Industrial de Santander. La perforación llegó hasta 98m de profundidad con muestreo continuo de los materiales.

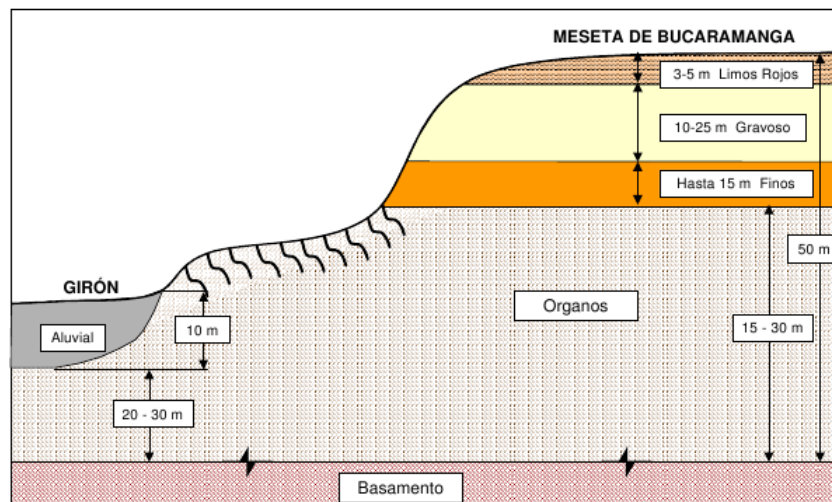


Figura 1.2: Columna litológica de Bucaramanga fuente: Garcia N.J.[4].

Con base en el perfil geotécnico y a partir de un análisis de sensibilidad se establece la ubicación del basamento a 50m de profundidad, como se presenta en la Figura 1.3.

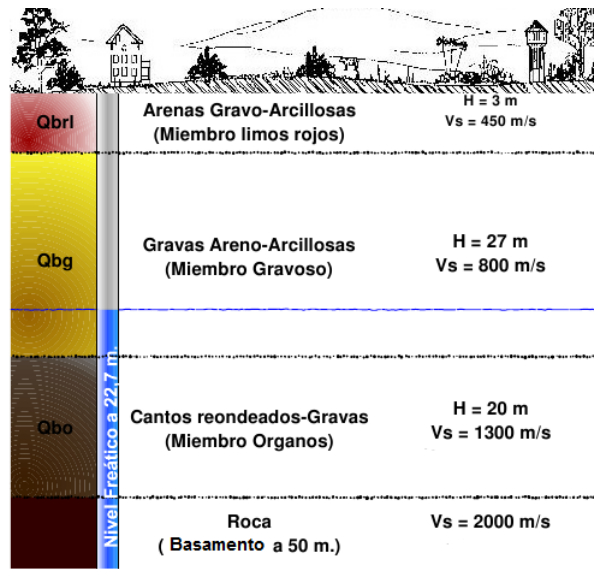


Figura 1.3: Perfil geotécnico del suelo de Bucaramanga[5].

De este análisis se concluye que el tipo de suelo de Bucaramanga y mas específicamente del campus de la Universidad Industrial de Santander es limo rojo, por lo tanto se tendrá en cuenta esta información para análisis y cálculos posteriores.

1.4. DIMENSIONADO DEL SISTEMA

La teoría de sólido semi-infinito¹ brinda una útil idealización para calcular la transferencia de calor en la cercanía de la superficie de la tierra[18].

Baehr-Stephan[19], propone para este caso, que la temperatura en la superficie de la tierra ($x = 0$) durante el año, sigue el comportamiento mostrado por la expresión 1.1

$$T_{superficial}(t) = T_m + (T_{max} - T_m) \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0}\right) \quad (1.1)$$

Donde:

$T_{superficial}$ = Temperatura en la superficie de la tierra [$^{\circ}C$].

T_m = Temperatura media anual ambiente [$^{\circ}C$].

T_{max} = Temperatura ambiente máxima anual en [$^{\circ}C$].

t = Tiempo [seg].

t_0 = Duración de un año [seg] ($1 \text{ año} \approx 31,5 \times 10^6 [seg]$).

$\frac{t}{t_0}$ = Fracción de año (con $\frac{t}{t_0}$ igual a cero para la máxima temperatura ambiente).

¹solido semi-infinito es un cuerpo de gran extensión con una superficie plana cuya distribución de temperatura sólo depende de una superficie

1.4.1. PROFUNDIDAD

Baehr-Stephan[19], propone una solución para la variación de temperatura de la tierra, en función de la profundidad y del tiempo.

$$T_{(x,t)} = T_m + (T_{max} - T_m)e^{-mx} \cos(2\pi \frac{t}{t_0} - mx) \quad \text{con : } m = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha t_0}} \quad (1.2)$$

Donde:

$T_{(x,t)}$ = Temperatura de la tierra en función de la profundidad y del tiempo [$^{\circ}C$].

x = Profundidad [m]

α = Difusividad térmica [$m^2 \cdot seg$].

Con la solución para la temperatura de la tierra en función de la profundidad y del tiempo mostrada en la expresión 1.2, se obtienen varias curvas de temperatura según el período, las cuales convergen a medida que aumenta la profundidad. Esto se muestra en la Figura 1.4.

$$\alpha = \frac{k}{c_p \rho} = \frac{1.5}{(2.085 * 1300)} = 0.5534x10^{-6} \left[\frac{m^2}{seg} \right] \quad (1.3)$$

$$m = \sqrt{\frac{\pi}{(0.55 * 31.5 * 10^6)}} = 424.5205x10^{-3} \left[\frac{1}{m \cdot seg} \right]$$

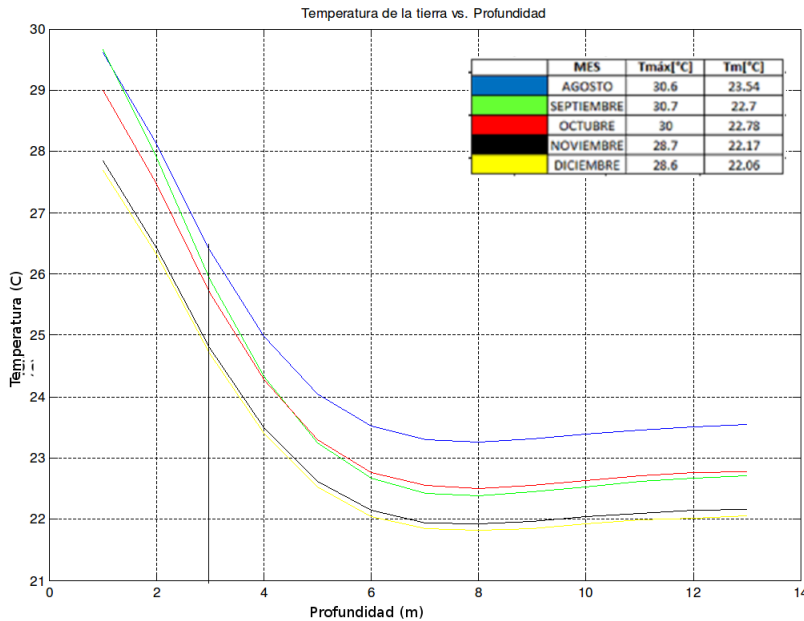


Figura 1.4: Gráfica de temperatura respecto a la profundidad.

1.4.2. TEMPERATURA

En esta sección se listan parámetros para el diseño del intercambiador tierra-aire, tales como la temperatura de entrada y salida en los tubos y la temperatura ambiente.

Para el estudio de los fenómenos de transferencia de calor que ocurren en un sistema de intercambio de calor aire-tierra se consideró el modelo Benkert, Hedidt y Schöler (Anexo A). Debido a que el sistema de intercambio de calor aire-tierra consta básicamente de: un tubo que tiene una salida al interior del recinto, otra al exterior y que se encuentra enterrado en el suelo, como se mostró en la Figura 1.1,

Es indispensable la aplicación de un factor de corrección para representar la influencia del tubo en la temperatura de la tierra en la pared exterior del tubo. Esto es posible con el factor B definido en el Anexo A. Entonces, la temperatura corregida de la tierra en la pared del tubo $T_{(E,W)}$ está definida por la expresión 1.4.

$$T_{(E,W)} = \frac{B \cdot T_{(E,0)} + T_{(A,P)}}{B + 1} \quad (1.4)$$

Donde:

$T_{E,W}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo [$^{\circ}\text{C}$].

$T_{A,P}$ = Temperatura del aire en el tubo [$^{\circ}\text{C}$].

Temperatura Ambiente del Aire.

El Área metropolitana de Bucaramanga posee un clima cálido a templado, con una temperatura promedio que varía entre los 23.5°C y 24.9°C , con régimen de precipitación mono-modal²[17].

La temperatura ambiente del aire ($T_{(A,0)}$) determina la temperatura en la entrada del intercambiador de calor aire-tierra. Además, esta temperatura se relaciona indirectamente con la temperatura de la tierra, debido a que es la condición de borde (expresión 1.1) de la solución propuesta por Baehr-Stephan [19], para la variación de la temperatura de la tierra (Anexo A)

La Ecuación (1.5) muestra un perfil de temperatura sinusoidal a través del año para la temperatura del ambiente ($T_{(A,0)}$).

$$T_{(A,0)}(t) = T_m + (T_{max} - T_m) \cdot \cos\left(2\pi \frac{t}{t_0}\right) \quad (1.5)$$

Donde:

$T_{(A,0)}$ = Temperatura ambiente en $^{\circ}\text{C}$ en el tiempo t en *seg*

Transferencia de Calor en el intercambiador de Calor Aire-Tierra

²el régimen de precipitación mono-modal, se caracteriza por ser un largo periodo de lluvias que es seguido por un periodo seco

Para calcular el intercambio de calor en el tubo, la longitud total del Intercambiador se divide en segmentos iguales. Como los segmentos no varían, el intercambio de calor en el segmento produce un salto de temperatura entre dos segmentos. El intercambio de calor para cada segmento está definido por la Ecuación (1.6).

$$\dot{Q}_w = \Delta_z \cdot U_L \cdot (T_{(E,W)} - T_{(A,P)}) \quad (1.6)$$

Dónde:

\dot{Q}_w = Flujo de calor, a través de la pared del tubo al aire en él [W].

Δ_z = Largo del segmento [m]

En el Anexo A se describe con detalle el modelo matemático para encontrar el valor de transferencia de calor en el intercambiador de calor.

Temperatura del Aire en el Tubo.

La temperatura del aire a través de la longitud total del intercambiador de calor aire-tierra, puede ser calculada. Se supone una temperatura de aire de entrada al intercambiador, igual a la temperatura ambiente del aire, la temperatura entonces varía gradualmente con la longitud. Este paso está definido por la Ecuación (1.7).

$$\dot{Q}_w = \dot{m}c_p((T_{A,P})_{out} - (T_{A,P})_{in}) \quad (1.7)$$

Donde:

\dot{m} = Flujo másico de aire [kg/seg].

c_p = Calor específico del aire [J/(kg.K)].

$(T_{A,P})_{in}$ = Temperatura del aire en el tubo a la entrada del segmento [°C].

$(T_{A,P})_{out}$ = Temperatura del aire en el tubo a la salida del segmento [°C].

Finalmente, la expresión (1.7) se iguala con la (1.6). Con lo anterior es posible calcular la temperatura final del segmento ($T_{(A,P)}$). Esto, comenzando con la temperatura ambiente del aire a la entrada del segmento. Luego, se repite el procedimiento para el nuevo segmento, pero esta vez considerando como temperatura de entrada, la temperatura obtenida a la salida del tramo anterior. Así, se realiza este procedimiento hasta obtener una temperatura tan cercana como se desee la temperatura del suelo, no influenciada por el tubo y a la profundidad de instalación del tubo. Seguidamente, se calcula la cantidad de segmentos utilizados y el calor transferido en cada tramo, con lo cual, se obtiene el tramo total de tubo y el calor total transferido.

1.4.3. DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR CALOR AIRE-TIERRA

Para el diseño de la automatización y control del sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados, es necesario establecer las variables a partir del análisis de

un intercambiador tierra-aire, adaptando algunas mediciones y variables al comportamiento climático de Bucaramanga.

MEDICIONES DE TEMPERATURA

Un parámetro esencial para el diseño del sistema de ventilación natural forzada con tubos enterrados, es la temperatura del suelo a cierta profundidad. Para realizar estas mediciones, se realizaron huecos de 3 metros de profundidad y de 3 pulgadas de diámetro, en la zona en la cual va a estar ubicado el Edificio Eléctrica II.

La primera prueba que se realizó fue, tomar las mediciones de temperatura con termistores ntc, de diferente material. Estos termistores fueron ajustados en el laboratorio, utilizando instrumentos de medición previamente calibrados. La caracterización que se aplicó a los termistores se ilustra en la Figura 1.5.

Para la caracterización de cada termistor se utilizó regresión de tipo potencia. En la Figura 1.5 se muestra la ecuación de cada termistor con su respectivo coeficiente de correlación.

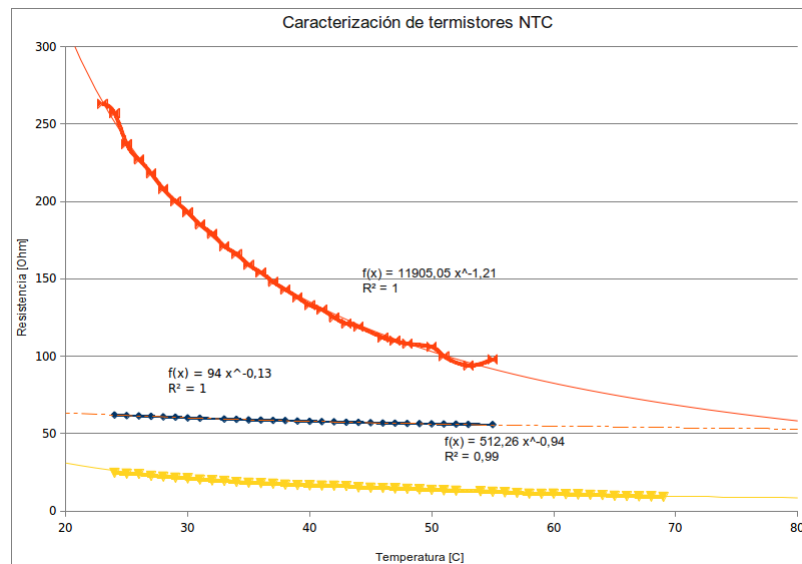


Figura 1.5: Caracterización de los termistores de diferente material.

Partiendo de la caracterización de los termistores, se realizaron medidas dentro de los huecos, estas mediciones fueron realizadas el mes de octubre de 2010.

En la Figura 1.6 se observa como los termistores tienen un rango de variabilidad bastante alto, sobretodo si se observa el termistor NTC1, el cual tiene una sensibilidad muy alta a temperaturas bajas, por lo tanto, la medición varía considerablemente.

La diferencia entre las mediciones tomadas con los diferentes tipos de sensores es significativa, por lo cual el nivel de incertidumbre es significativo. La Figura 1.6 muestra el error en las mediciones, uno respecto al otro, por lo tanto se llegó a la conclusión, que es necesario un elemento de medición que presente menos incertidumbre en los datos tomados.

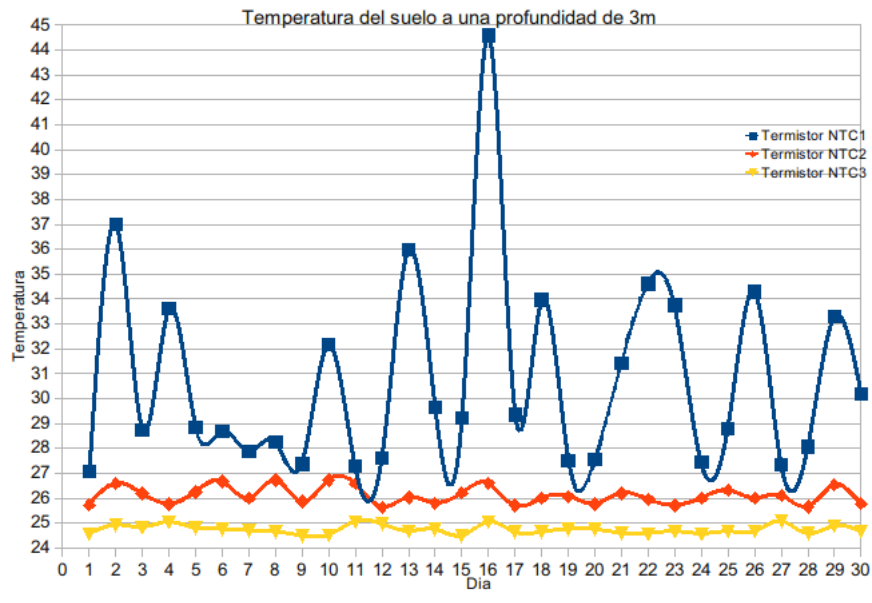


Figura 1.6: Mediciones de temperatura realizadas con termistores NTC, en el mes de Octubre.

Por este motivo, para las mediciones en los meses posteriores, se realizó la adquisición de una RTD PT100 clase A, esta termorresistencia de platino presenta una resistencia de 100ohm a una temperatura de 0°C , se adquirió clase A, debido a que su tolerancia en temperatura es de $\pm 0.15^{\circ}\text{C}$ y tolerancia de resistencia de 0.06ohm , según la norma IEC 751:1995[20].

La decisión de realizar la medición con una RTD, se tomó partiendo de las siguientes características propias de este tipo de sensores: posee un margen de temperatura bastante amplio. Proporciona medidas de temperatura con mayor exactitud y repetitividad que otros sensores.

- Los sensores RTD son muy estables con el tiempo, presentando cambios en la medida del orden de $0.1^{\circ}\text{C}/\text{año}$.
- La relación entre la temperatura y la resistencia es la más lineal.
- Los sensores RTD tienen una sensibilidad mayor que los termopares. La tensión debida a cambios de temperatura puede ser alrededor de diez veces mayor.
- La existencia de curvas de calibración estándar para los distintos tipos de sensores RTD (según el material conductor, $R0y\alpha$), facilita la posibilidad de intercambiar sensores entre distintos fabricantes.

En la Figura 1.7 se puede ver la medida de temperatura de una RTD PT100 clase A, y la misma medida realizada con un termistor NTC, se nota la variación en la medida, mientras que la RTD genera una medida más constante.

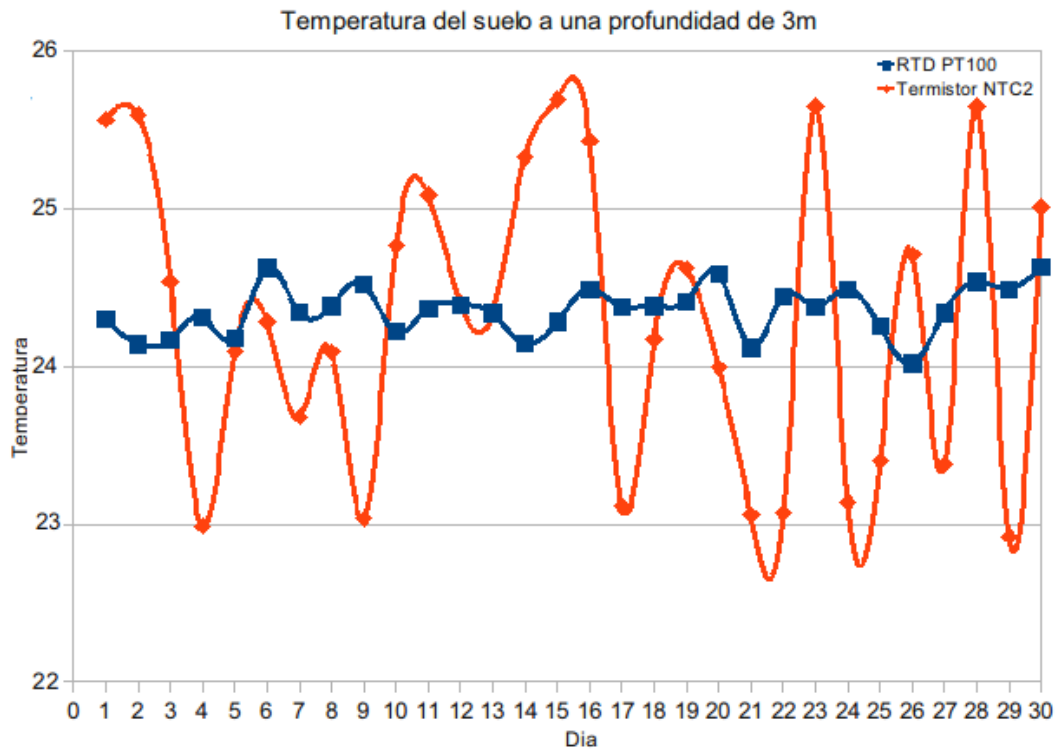


Figura 1.7: Comparación en la medición de temperatura entre un termistor NTC y una RTD PT100.

Las mediciones se realizaron con los 3 huecos abiertos, a 1m, 2m, 3m como lo muestra la Figura 1.8a. Estas mediciones generaron incertidumbre, debido a que se presentó filtración de aire dentro del hueco, lo cual no proporciona la medición esperada.

Para solucionar esto, se llenaron los huecos de tierra a diferentes distancias, con el fin de tener la medición del suelo y no la medida del aire dentro del hueco a esta profundidad, tal como lo muestra la Figura 1.8b.

Sin embargo, en cada hueco se presentaba una entrada de aire exterior, lo cual hace variar la medida tomada significativamente, por esto se enterraron las RTD, con el fin de obtener la medida real de la temperatura del suelo a estas distancias, tal como lo muestra la Figura 1.9.

Una vez realizadas las mediciones continuas cada hora en el transcurso del día, durante tres meses consecutivos, se obtuvieron resultados satisfactorios, donde se demuestra claramente el potencial de esta tecnología, en climas cálido-húmedo como el de Bucaramanga.

En la Figura 1.10 se puede observar la temperatura máxima de cada día tomada a 3m de profundidad durante los tres meses de medición, logrando una diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura tomada con la RTD PT100 clase A. los datos de la gráfica se muestran en la Tabla C.1 que se encuentra en el Anexo C.

Demostrando así que el suelo permite la implementación del sistema de ventilación nat-

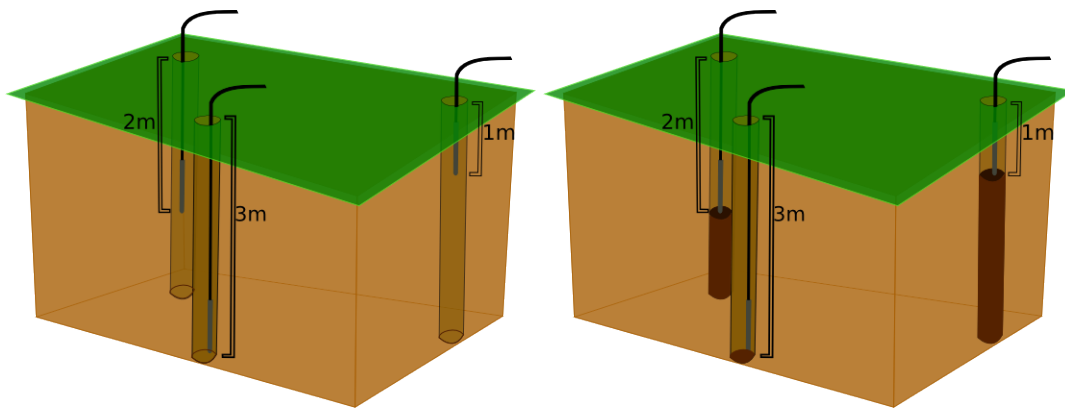


Figura 1.8: a) (izquierda) Mediciones realizadas con los huecos abiertos a 1m, 2m, 3m. b) (derecha) Mediciones realizadas con los huecos llenos de tierra parcialmente.

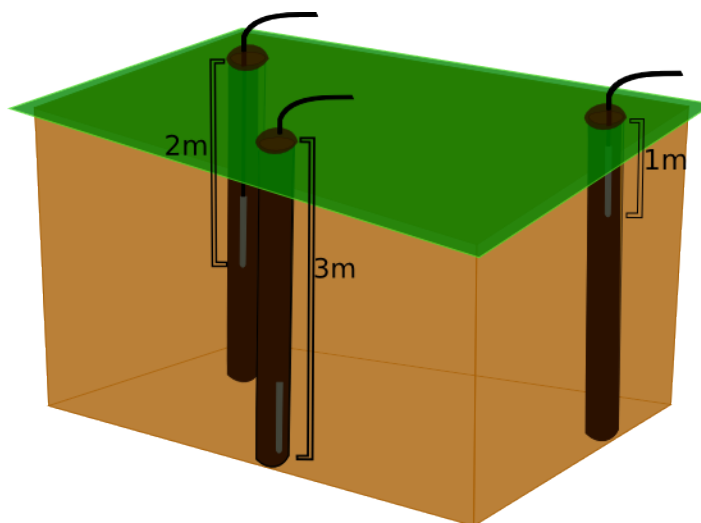


Figura 1.9: Mediciones realizadas con los sensores enterrados a diferentes distancias.

ural forzado a partir de tubos enterrados en Bucaramanga.

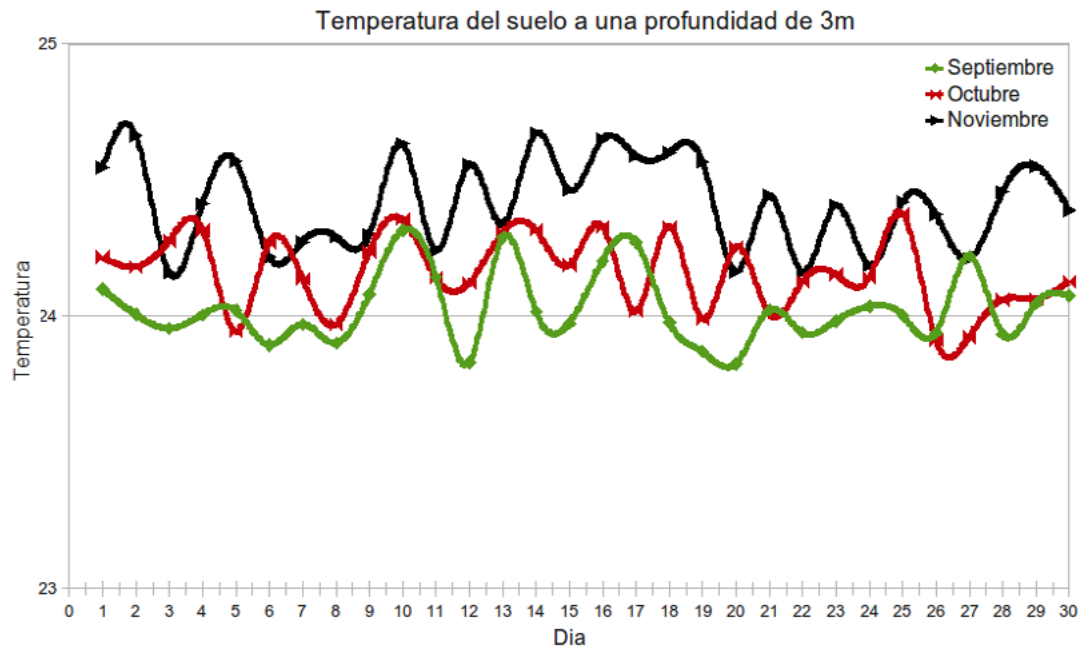


Figura 1.10: Datos medidos de la temperatura del suelo a 3m de profundidad.

Así mismo se logró validar la herramienta de cálculo, al corroborar los resultados teóricos (Figura 1.4) con los resultados obtenidos (Figura 1.10) de los meses septiembre, octubre y noviembre, los cuales estuvieron dentro del margen estimado.

DIMENSIONES DEL DUCTO

Para el uso del modelo de Benkert, Hedidt y Schöler, detallado en el Anexo A, es necesario definir un listado con los datos de entrada. A continuación se presentan los datos respectivos:

1. **Superficie habitable:** Es necesario definir la superficie total del local para el cual se va a diseñar el intercambiador de calor aire-tierra. En este caso, se considera un áreas de 250 [m^2].
2. **Altura:** La altura entre piso y techo se supone de 3m.
3. **Volumen de Aire a Renovar:** Para diseñar el intercambiador de calor aire-tierra, se requiere definir cuanto volumen de aire del interior del local se renovará por hora. Este dato depende de cuánto se desea aportar con el intercambiador. En este caso, se desea que el intercambiador realice un aporte en base a las distintas normas que se tienen, considerando necesario 6 renovaciones cada hora del 100 % del volumen total de los locales.
4. **Diámetro del Tubo:** El diámetro del tubo para este tipo de aplicación es seleccionado generalmente de 250mm por razones de precio, disponibilidad, tamaño e instalación.

5. **Profundidad de Instalación:** Uno de los datos de entrada más importantes es la profundidad de instalación de los tubos, que recordando los resultados obtenidos en la Figura 1.4, se seleccionó una profundidad de $3m$.
6. **Conductividad térmica del suelo (k_s):** El sistema a diseñar depende de la conductividad del suelo donde están enterrados los tubos. En este caso, $k_s=1.5 [W/m.K]$.
7. **Capacidad Calórica Volumétrica ($\rho.C_p$):** El sistema depende también de la capacidad calórica volumétrica del suelo en donde se instalará, así, $\rho.C_p=2.7105 \times 10^6 [W/mK]$.
8. **Condiciones de Temperatura:** Para el diseño del sistema se debe ingresar la máxima temperatura registrada, así se iniciará el diseño considerando que en el peor de los casos el aire ingresará con esa temperatura al intercambiador de calor. Por último, según la estación meteorológica instalada en la escuela de ingenierías eléctrica, electrónica y telecomunicaciones, se espera una temperatura máxima de entrada de aire a los tubos de $26^\circ C$ y se proyecta una temperatura objetivo de $25,5^\circ C$.

TEMPERATURA DE ENTRADA Y SALIDA DEL AIRE

Usando el modelo de Benkert, Hedidt y Schöler, se calcula en primer lugar el parámetro B , el cual representa el radio de transferencia de calor, desde la superficie de la tierra al tubo y desde el flujo de aire a la pared del tubo.

El radio de transferencia de calor (B) depende de algunos datos de entrada, como la conductividad térmica del suelo del lugar de instalación k_s , la profundidad de instalación S_0 y el radio del tubo R_0 . Además, depende del coeficiente de transferencia de calor a lo largo de la pared del tubo U_L . Este coeficiente se calcula teniendo en cuenta la conductividad térmica del aire en el tubo k_A y el número de Nusselt (N_u) del aire en el tubo. A partir de los datos de entrada, se obtiene que la velocidad del aire es:

$$\begin{aligned} \text{Área} &= 250 \text{ m}^2 \\ \text{Volumen} &= 750 \text{ m}^3 \\ \text{Caudal renovable} &= 100 \% \text{ del volumen } local/h = 0,20833 [m^3/s] \end{aligned}$$

$$A = \left(\frac{250 \times 10^{-3}}{2}\right)^2 \cdot \pi = 0,049087 [m^2] \quad (1.8)$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{0,20833}{0,049087} = 4,2441 [m/s] \quad (1.9)$$

Así mismo, son calculados los demás parámetros necesarios para la estimación de la cantidad de tubos.

$$U_L = 20,657 [W/m.K]$$

$$B = 0,10412[-]$$

$$m = 0,58833[kg/s]$$

$$Nu = 307,2585[-]$$

No obstante, es necesario calcular la temperatura de la tierra en la pared del tubo pero no influenciada por este, denominada $T_{(E,0)}$ (temperatura de la tierra a la profundidad de instalación), teniendo en cuenta que para la temperatura máxima ambiental $t/t_0 = 0$. Así se obtiene que: $T_{(E,0)} = 24.63^{\circ}C$

Para seguir con el procedimiento se debe estimar la temperatura del aire en la entrada del tubo $T_{(A,P)}$ que inicialmente es tomada como la máxima temperatura anual promediada siendo $29,4^{\circ}C$ y consecuente con eso se calcula la temperatura de la tierra en la pared del tubo $T_{(E,W)}$ (1.4). Para calcular el flujo de calor a través del tubo (Q_w) se utiliza la expresión (1.6) dónde $\Delta_z=6m$ (largo comercial de cada tubo).

Por último, para encontrar las condiciones iniciales de temperatura $T_{(A,P)}$ y $T_{(E,W)}$ a la entrada del siguiente tramo se realiza un balance de calor entre (Q_w) (1.6) y (Q_w) (1.7). En la Ecuación (1.7) se tendrá la diferencia entre la temperatura del aire a la entrada del tramo y la temperatura del aire a la salida del mismo, así se establece que la temperatura del aire a la salida del tramo es la temperatura del aire a la entrada del tramo siguiente. De esta forma se itera hasta conseguir la temperatura objetivo del aire de salida.

En el Anexo B se encuentra descrito el algoritmo programado en MATLAB[®] Para realizar las correspondientes iteraciones y encontrar el número de tubos necesarios y la temperatura de salida deseada.

Ahora, se toma un número de iteraciones hasta alcanzar 0,98 veces la temperatura objetivo obteniendo una temperatura del aire a la salida del tubo de: $T_{(A,P)final} = 25,5^{\circ}C$

El resultado de la simulación indica que para cumplir con el requerimiento de 6 renovaciones por hora y obtener la temperatura objetivo de $25,5^{\circ}C$ es necesaria la instalación de 10 tramos de tubería de 45 metros cada uno.

La Tabla 1.4.3 representa los resultados de varias simulaciones, para mostrar la cantidad de tubería necesaria para dos temperaturas objetivo de salida, $25,5^{\circ}C$ y $26^{\circ}C$ haciendo un barrido del porcentaje de renovación por hora.

Partiendo de los datos de la Tabla 1.4.3 se puede concluir que a menor temperatura objetivo, aumenta la cantidad de tubería, del mismo modo, a mayor renovación por hora, la cantidad de tubería aumenta, como se puede observar en la Figura 1.11.

Tabla 1.1: Relación del % de renovación con la longitud de los tubos para dos temperaturas objetivo.

%Renovación/h	Temperatura objetivo=25,5°C	Temperatura objetivo=26°C
50	42	5
100	78	6
150	114	12
200	150	18
250	186	21.5
300	222	26
350	258	30.5
400	294	35
450	330	39.5
500	366	44
550	402	48.5
600	438	53

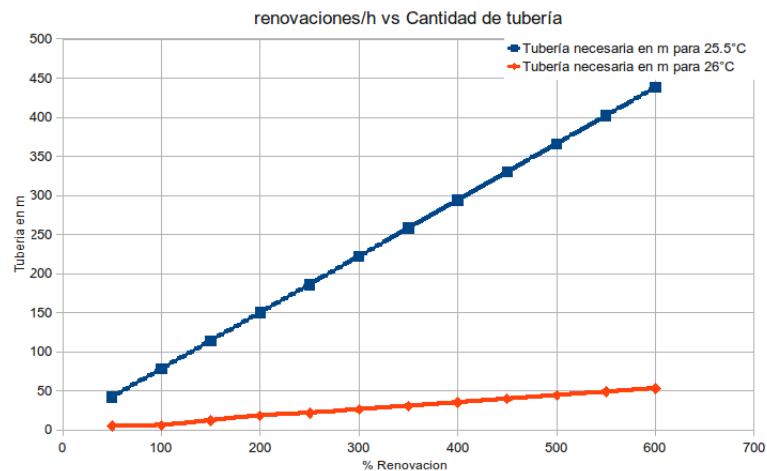


Figura 1.11: Renovaciones/h vs Cantidad de tubería.

1.4.4. SELECCIÓN DEL VENTILADOR

Para aulas es recomendable realizar entre 5 y 7 renovaciones de aire por hora, por lo tanto, en el diseño se va a realizar la selección del ventilador teniendo en cuenta 6 renovaciones por cada hora.

El caudal de aire para el diseño es de $0,20833m^3/s$ por 6 renovaciones cada hora, por lo tanto, el caudal que debe suministrar el ventilador debe ser de por lo menos $1,25m^3/s$

La selección del tipo y tamaño de un ventilador se realiza en función de la siguiente información:

- Caudal de aire a suministrar.
- Nivel de ruido permisible en la instalación.

- Tipo de potencia disponible.

Para facilitar la selección del equipo, los fabricantes suministran información en forma de tablas o de curvas que generalmente muestran los siguientes factores para cada tamaño de ventilador operando contra un amplio rango de presiones estáticas:

1. Volumen de aire suministrado en condiciones normales (CFM).
2. Velocidad a la salida del ventilador (fpm).
3. Velocidad de giro de la rueda (rpm).
4. Potencia al freno requerida (BHP).

Con frecuencia el tipo de servicio determina el ventilador a utilizar:

1. Cuando la operación ocurre con poca o ninguna resistencia y particularmente sin un sistema de conducción, el ventilador propeller³ es el indicado por conveniencia y bajo costo.
2. Cuando se involucra un sistema de ductos, la selección debe hacerse entre un ventilador centrífugo y un tubo axial o vano axial. En general, estos tipos de ventiladores son comparables en eficiencia y nivel de ruido generado, pero los dos últimos son más livianos y requieren menor espacio para su instalación. Un vano axial es más eficiente y silencioso que un tubo axial, pero más costoso y generalmente requiere más espacio.

Existen modelos normalizados por los fabricantes de ventiladores centrífugos que cubren rangos desde 700 a 500000 CFM ⁴ con presiones estáticas generadas desde $\frac{1}{4}$ " hasta 15" de columna de agua.

Los ventiladores de tubo axial y vano axial, pueden encontrarse en rangos de 2000 a 125000 CFM y presiones estáticas hasta 3" de columna de agua. En aplicaciones de extracción a descarga abierta, los ventiladores tipo propeller son generalmente los más usados[21].

En la Tabla 1.2 se encuentra una comparación de 5 ventiladores tipo axial que es el que se va a tener en cuenta para el diseño, según las características nombradas anteriormente, se puede observar el diámetro, el caudal de aire que generan, la potencia de cada motor e inclusive se realiza la comparación de peso de cada ventilador con el nivel de ruido que cada uno genera.

³Tipo de ventilador en el cual el flujo de aire no sale de la hélice del ventilador en una dirección uniforme recta.

⁴Cubic Feet per Minute, es una unidad de medida no incluida en el sistema internacional de unidades que mide el flujo de un gas o líquido que indica cuánto volumen, en pies cúbicos, pasa a través de un punto fijo en un minuto.

Tabla 1.2: Comparación de ventilador axial de distintos fabricantes.

MARCA	MODELO	DIAMETRO (mm)	CAUDAL (m ³ /s)	POTENCIA (kW)	TENSIÓN (V)	RUIDO (dBA)	PESO (kg)
Siemens	2CC2 504-5YB6	500	2,93	0,66	110 - 220	78	21,5
Greenheck	TDI 18-0634	466	2,77	0,75	110 - 220	86	31,75
ATB	63C LAT	770	2,67	0,75	110 - 220	59,8	28
ACI	EVF 500/D	641	2,72	0,9	110 - 220	78	22
YUTON	5G-4	508	2,58	0,75	110 - 220	75	25

El ventilador Siemens 2CC2 504-5YB6, presenta menor consumo de potencia, mayor caudal de aire, menor peso y un nivel de ruido no muy alto en comparación con los otros ventiladores, por lo tanto es el seleccionado para usar en el sistema de ventilación natural forzada del edificio eléctrica II.

1.5. CARGA TÉRMICA

Los estándares incluyen límites para llegar a la insatisfacción de un usuario dentro de un recinto. Por ejemplo, internacionalmente la insatisfacción por aspectos térmicos está basada entre un 5 a un 10 %, ISO 7730 estandariza los indicadores PMV-PPD para cuantificar el grado de confort para ambientes térmicamente moderados. Ambos estándares, ASHRAE 55-92 e ISO 7730 proveen información sobre los límites de velocidad de aire y de temperatura para actividades sedentarias y de máximo movimiento[22].

Definiciones

1. **PPD(%) Porcentaje de previsión de insatisfacción.**

El índice PPD expresa el porcentaje previsible de individuos que juzgarán como no-comfortables, las condiciones climáticas de un local, bien por demasiado calor, o por demasiado frío. Se tendrá en cuenta que el porcentaje de insatisfacción nunca es 0 %: las normas prevén un límite irreducible del 5 %, sean cuales sean las condiciones climáticas.

2. **$T_a(^{\circ}C)$ Temperatura del aire.**

Es la temperatura seca, medida por un termómetro normal sin influencias de radiación de las paredes.

3. **$T_g(^{\circ}C)$ Temperatura Global.**

La temperatura global es un valor meteorológico, destinado esencialmente a la medida indirecta de la temperatura media radiante. La temperatura global en un punto de un cuarto es, según ISO 7243, la temperatura de equilibrio en ese punto, de una esfera de 15 cm de diámetro y pintada de negro.

4. $T_r(^{\circ}C)$ **Temperatura Media Radiante.**

Es la temperatura en la cual, un ocupante intercambia la máxima cantidad de energía radiante en un cuarto.

Medición

En un punto dado de un local, T_r se deduce de las mediciones de velocidad de aire, temperatura del aire y temperatura global, utilizando la ecuación siguiente (Principios ASHRAE):

$$(T_r + 273)^4 = (T_g + 273)^4 + 0,247 \times 10^9 \sqrt{V}(T_g - T_a) \quad (1.10)$$

Simplificando se obtiene:

$$T_r = T_a + (T_g - T_a)(1 + 2,2\sqrt{V}) \quad (1.11)$$

5. $\Delta T_{pr}(^{\circ}C)$ **Temperatura Asimétrica de Radiación**

Se define como la diferencia entre las temperaturas radiantes orientadas, medidas sobre las dos caras opuestas a un mismo plano. Normalmente es inferior a la diferencia de temperatura entre paredes opuestas.

6. $T_o(^{\circ}C)$ **Temperatura Operativa.** Es la temperatura en la cual un ocupante intercambiará la misma cantidad total de energía (por radiación y convección) en el local.

1.5.1. CÁLCULO DE LA CARGA TÉRMICA DEL EDIFICIO.

Para establecer la carga térmica del edificio completo sin tener conocimiento de planos arquitectónicos ni planos eléctricos, se van a tener en cuenta cálculos para diferentes áreas de cuarto, diferentes tipos de actividad del cuarto y diferentes cantidades de ocupantes en cada cuarto del edificio, también se va a partir del supuesto que el cuarto es de base rectangular y la altura de los cuartos será de $3m$. en la Tabla 1.3 se puede observar las diferentes dimensiones de cada cuarto que posiblemente se puede construir dentro del edificio.

Considerando los conceptos de confort térmico, el valor de la temperatura deseada del interior ($T_{interior}$) del cuarto es de $25,5^{\circ}C$.

Debido a que la estación meteorológica de la UIS se encuentra fuera de operación desde el año 2002, se toman los datos de temperatura absoluta y temperatura media, así como los datos de humedad relativa hasta este año, adicionalmente se comparan con los datos recopilados por la estación meteorológica que adquirió la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones de la universidad.

En la Tabla 1.4 se presentan las temperaturas promedio de Bucaramanga tomadas por la estación meteorológica del IDEAM. En esta tabla se puede apreciar que la temperatura mínima se presentó en diciembre y tiene un valor de $18,9^{\circ}C$ y la temperatura máxima se presentó en el mes de febrero con un valor de $30,9^{\circ}C$.

Por otra parte, se pueden considerar los valores de la Tabla 1.5, los cuales corresponden a la temperatura medida por la estación que adquirió la escuela para este fin. Las tablas

Tabla 1.3: Posibles dimensiones de los cuartos del edificio.

dimensiones	área	perímetro	dimensiones	área	perímetro
10x10	100	40	40x15	600	110
20x5	100	50	50x12	600	124
25x4	100	58	60x10	600	140
20x10	200	60	28x25	700	106
25x8	200	66	35x20	700	120
40x5	200	90	50x14	700	128
20x15	300	70	70x10	700	160
25x12	300	74	32x25	800	114
30x10	300	80	40x20	800	120
50x6	300	112	50x16	800	132
20x20	400	80	30x30	900	120
25x16	400	82	36x25	900	122
40x10	400	100	45x20	900	130
50x8	400	116	50x18	900	136
25x20	500	90	60x15	900	150
50x10	500	120	40x25	1000	130
25x24	600	98	50x20	1000	140
30x20	600	100			

Tabla 1.4: Temperatura registrada en la estación meteorológica del IDEAM ubicada en la UIS.

Mes	Temperatura Max. ($^{\circ}C$)	Temperatura Min. ($^{\circ}C$)	Humedad Relativa %
Enero	30.8	19.9	80
Febrero	30.9	20.2	80
marzo	30	21.4	82
abril	29	20.6	83
mayo	29.1	19.5	84
junio	29	19.4	83
julio	29.2	19	82
agosto	29.4	19.1	82
septiembre	29.3	19.1	83
octubre	29.6	19	84
noviembre	29.2	19	85
diciembre	28.5	18.9	83

mencionadas se utilizan solamente con el fin de ilustrar y comparar parámetros tomados por el IDEAM y así comparar estos valores con los tomados por la estación ubicada en la escuela (valores con los cuales se trabajara en el análisis de los cálculos correspondientes del sistema).

Se debe tener en cuenta que las pérdidas térmicas son diferentes según el piso; en el cálculo de carga térmica.

Hay que diferenciar el calor transferido por cada elemento. Esto se logra, utilizando el valor U (coeficiente de transferencia global) para cada elemento.

Estos valores son presentados en la Tabla 1.6 y son los valores máximos permitidos por la Norma técnica Colombiana NTC 4595 [23] que estipula los valores típicos para edificios educativos con lo cual se logra un cálculo más exacto de las pérdidas térmicas en cada piso.

Para edificios únicamente se consideran pérdidas a través del piso, en el primer piso, el cual, no interactúa con los pisos superiores (pérdidas debidas al techo). De hecho, se

Tabla 1.5: Temperatura tomada en la estación meteorológica adquirida por la escuela.

Mes	Temperatura Max. ($^{\circ}C$)	Temperatura Min. ($^{\circ}C$)
Enero	30.8	19
Febrero	33	20.2
marzo	28	21.4
abril	27	17.6
mayo	31.1	19.8
junio	29	19.4
julio	29.2	19
agosto	29.4	19.1
septiembre	29.3	19.1
octubre	29.6	18.9
noviembre	29.2	19
diciembre	28.5	18.9

Tabla 1.6: Calor transferido a través del suelo.

Aislamiento del piso	Transmitancia (k) $W/m.K$
Piso común	1.4
Piso con aislamiento medio	1.2
Piso bien aislado	1

considera que los pisos intermedios no interactúan térmicamente entre ellos. Con lo cual, únicamente se consideran pérdidas debidas al techo en el último piso.

Para el cálculo el calor transferido por el piso (1.12) se utilizó un coeficiente k para el caso de piso medianamente aislado de la Tabla 1.6 además de las pérdidas producidas en la fachada (muros y ventanas).

$$Q_{piso} = k \cdot p \cdot (T_{exterior} - T_{interior}) \quad (1.12)$$

Donde:

Q_{piso} = Calor transferido a través del piso [W].

k = Transmitancia térmica o conductividad térmica [$W/m.K$]

p = Perímetro exterior del piso considerado [m]

$T_{exterior}$ = Temperatura ambiente exterior [$^{\circ}C$].

$T_{interior}$ = Temperatura en el interior del cuarto [$^{\circ}C$].

Para pisos en contacto con el terreno, en general, se emplea el concepto de transmitancia térmica (k) que es igual al flujo de calor que sale de la habitación, por metro de perímetro exterior del piso considerado, por cada grado Celsius de diferencia de temperaturas entre el interior de la habitación y el ambiente exterior. Con lo cual, el flujo de calor a través del piso queda definido por la ecuación (1.12).

Para realizar el cálculo de la carga térmica en cada cuarto del edificio se realizó un programa en Visual Basic 6.0, con los parámetros propios para Colombia, según las normas vigentes, pero más específicamente para la ciudad de Bucaramanga.

En el Anexo B, se incluye el código fuente del programa realizado en Visual Basic 6.0 para el cálculo de la carga térmica de cada cuarto del Edificio Eléctrica II.

Los parámetros iniciales para el cálculo se describen a continuación, los cuales son necesarios para cálculos posteriores en las diferentes ecuaciones de carga térmica.

- Altura de los pisos del edificio: se estableció una altura normal para cada piso de $3m$.
- Ubicación del edificio: el edificio se ubica en las coordenadas Latitud $7^{\circ}08'31''$ longitud $73^{\circ}07'16''^5$.
- Presión atmosférica: La presión atmosférica en Bucaramanga es de 760 mmHg equivalente a $1013,25$ hPa.
- Transmitancia térmica de los muros: Para un muro de bloque normal con estuco y pintura estándar se tiene una transmitancia térmica de $1,2$ W/m^2K .
- Transmitancia térmica del vidrio: Para un vidrio de $4mm$ de espesor, la transmitancia térmica es de $5,70$ W/m^2K ; para espesores de $3mm$ y $19mm$ se tienen transmitancias correspondientes de $5,8W/m^2K$ y $5,2W/m^2K$. Si el vidrio es hermético con cámara de aire, la transmitancia es de $2,8W/m^2K$, para el programa se estableció una transmitancia de $5,5W/m^2K$.
- Metabolismo de los ocupantes del cuarto: según los datos calculados en el Anexo E, se tomo para el metabolismo de una persona un valor de $140,634W/m^2K$.
- Humedad relativa: En Bucaramanga se presenta una humedad relativa promedio de $83,07\%$, según datos emitidos por el IDEAM, sin embargo alcanza máximos de 90% y mínimos de 75% , para el cálculo se trabaja con el valor promedio (83%).

Con este programa es posible calcular la carga térmica de cada cuarto del edificio con sólo ingresar los valores tales como dimensiones del cuarto, número de paredes expuestas, ubicación física del cuarto entre otros parámetros, en la Figura 1.12 se puede observar una imagen del programa con los parámetros que se deben ingresar.

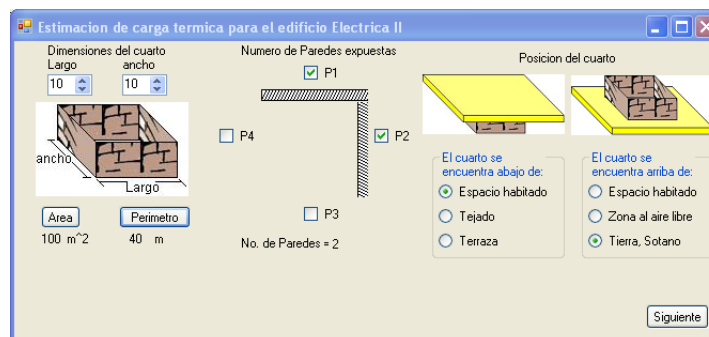


Figura 1.12: Estimación de la carga térmica de cada cuarto.

⁵Fuente tomada de Google Earth 5.2.1.1588

De izquierda a derecha (en la Figura 1.12) se observan los espacios para ingresar los datos, en el primer módulo se ingresan las dimensiones del cuarto (largo y ancho) donde se puede hallar el área y el perímetro del cuarto, en cálculos posteriores se usa también para hallar el volumen del cuarto y otros parámetros involucrados en la estimación de la carga térmica.

El siguiente módulo establece el número de paredes expuestas directamente al sol, con este dato se establece la transferencia de calor con respecto a la radiación solar. Por último, se indica la posición del cuarto con respecto a pisos superiores o inferiores, se establece si el cuarto se ubica arriba de un espacio habitado, o del suelo o algún sótano, además si se encuentra bajo un espacio habitado, un techo o una terraza.

Al presionar el botón “siguiente”, el programa nos lleva a una segunda ventana como la que se muestra en la Figura 1.13, en esta ventana es necesario ingresar otros parámetros necesarios para el cálculo de la carga térmica.

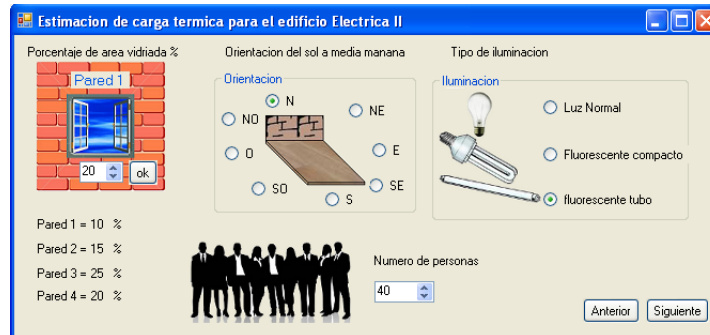


Figura 1.13: Estimación de la carga térmica de cada recinto.

En esta ventana se observan 4 módulos, con parámetros que son ingresados por el usuario de forma manual, el primer módulo establece el porcentaje de área vidriada de cada pared con el fin de establecer, junto con el número de paredes expuestas, la cantidad de calor transferida por radiación solar. En el segundo módulo se indica la orientación del sol a media mañana (aproximadamente las 10 a.m.) debido a que dependiendo la ubicación del sol, la carga térmica varía considerablemente.

Se indica que tipo de iluminación se va a utilizar en el cuarto, basados en la norma técnica colombiana NTC 2050[24] se establece la carga y el número de bombillas necesarias para cada cuarto, dependiendo del área del mismo.

Luego se puede fijar el número de personas que ocupan el cuarto con el fin de calcular la carga térmica según los parámetros de metabolismo hallados anteriormente.

En seguida de establecer estos parámetros, es necesario identificar otras fuentes que generen carga térmica, en la Figura 1.14 se observa la tercer ventana que muestra el programa luego de haber presionado el botón “siguiente” de la segunda ventana.

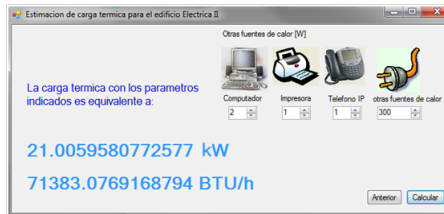


Figura 1.14: Estimación de la carga térmica de cada cuarto.

En esta parte del cálculo se indican las fuentes adicionales de carga térmica como computadores, impresoras, teléfonos IP y cargas adicionales en Watts con el fin de tenerlas en cuenta a la hora de implementar el sistema de ventilación y acondicionamiento de aire. El máximo para computadores es de 50 por cuarto, las impresoras máximo 10, los teléfonos IP máximo 20 y cargas adicionales de máximo $3000W$.

Finalmente al presionar el botón “calcular”, aparece el total de la carga térmica, según los parámetros indicados, este valor se muestra en kW y su equivalente en BTU/h .

Todos los parámetros pueden ser cambiados, inclusive los que se establecieron como constantes, si se presiona el botón “configuración”, entre estas constantes se encuentra la humedad relativa, la altura del cuarto, y las transmitancias de las paredes y los vidrios, entre otros parámetros.

A continuación se presentan los valores de carga térmica relacionados con el Edificio Eléctrica II, en el Anexo A, se encuentran las ecuaciones utilizadas en el cálculo, así como la explicación detallada de cada parámetro.

Para un vidrio convencional, el factor de exposición solar esta entre 70% y 88% . según la norma ISO 9050[25], el valor típico para un vidrio común es de 85% , factor que se utiliza en el cálculo.

Para la zona andina y más específicamente el departamento de Santander, la radiación solar es de $1643kWh/m^2/año$ según el Atlas de Radiación Solar de Colombia[26]. Si se especifica la radiación solar diaria y se divide en 24 horas, según los datos anteriores resulta un valor de $187,6W/m^2$.

La carga térmica por radiación solar para una pared expuesta al sol por cada hora en función de la superficie vidriada de la pared.

$$Q_s = S * 187,5571 * 0,85[W]$$

$$Q_s = 159,4235 * S[W]$$

Según los cálculos realizados, una persona tiene una carga térmica de $140,634W/m^2K$.

Un computador produce una carga térmica de $1020 BTU/h$, cuyo equivalente es $300,15625W/m^2K$.

El consumo de una impresora es de $150W/m^2K$ y un teléfono IP tiene un consumo de $30W/m^2K$. Con estos valores se complementa el valor de cargas internas por equipos.

2

SELECCIÓN DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

En este capítulo se expone el proceso de selección del protocolo de comunicaciones que se considera pertinente implementar en el Edificio de Eléctrica II. De manera breve se presenta información sobre los protocolos de comunicación.

En el momento de controlar y automatizar el sistema inmótico, se hace necesaria la obtención de información que conlleve a obtener un buen funcionamiento del sistema inmótico, haciendo necesaria la comunicación entre los distintos dispositivos empleados en el Edificio de Eléctrica II. Se puede señalar que el protocolo de comunicación es la vía o el medio mediante el cual se interconectan los dispositivos controladores para generar información dentro de un establecimiento.

En el momento de diseñar un sistema inmótico, se analiza la necesidad de controlar el sistema desde un sitio remoto. Para tener un manejo detallado del flujo de información desde un centro de cómputo y dependiendo de la cantidad de pisos de la edificación se debe sectorizar el sistema; Es importante que un sistemas inmótico sea lo más confiable posible, disminuyendo el grado de errores al mínimo, puesto que los procesos que se manejan son más elevados, debido a que se manipula un flujo de información y de trabajo intenso.

2.1. ANÁLISIS DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN

En el diseño de la automatización y control del sistema inmótico del Edificio Eléctrica II, es indispensable establecer el protocolo de comunicación que permitirá la transferencia e intercambio de datos entre los distintos dispositivos que conformaran la red del sistema inmótico.

El protocolo de comunicación es la vía o el medio a partir del cual se interconectan dos o más dispositivos controladores para generar información dentro de un establecimiento. En otras palabras, es el lenguaje que permite el envío y/o recepción de datos de un lugar a

otro[27].

2.2. CLASIFICACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Los protocolos de comunicación se pueden clasificar según su licencia (Figura 2.1) y según su aplicación (Figura 2.2).

En la Figura 2.1 se listan algunos protocolos según su licencia, que puede ser estándar o propietaria.

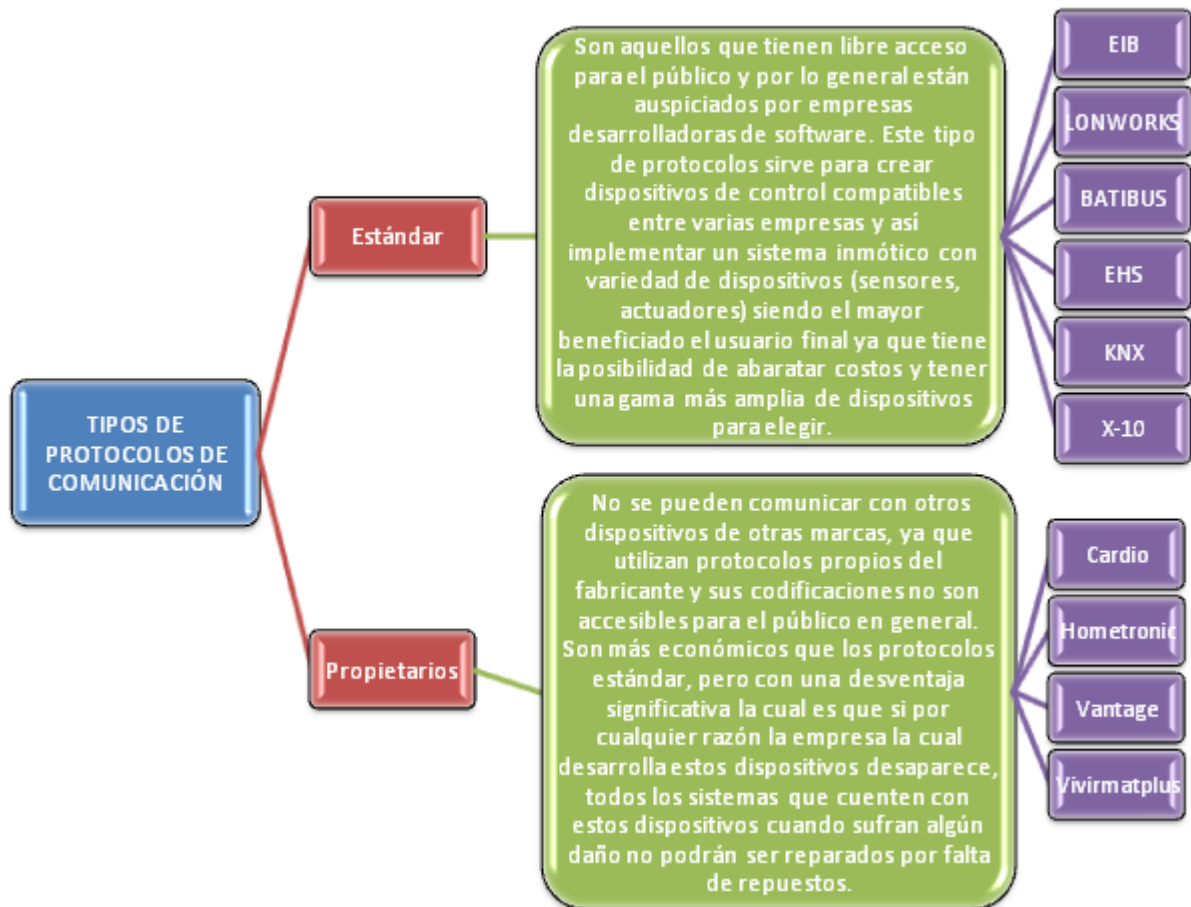


Figura 2.1: Esquema de tipo de protocolos según su licencia[6].

En la Figura 2.2 se describen las tecnologías de comunicación e interconexión entre los dispositivos presentes en el entorno inmótico.

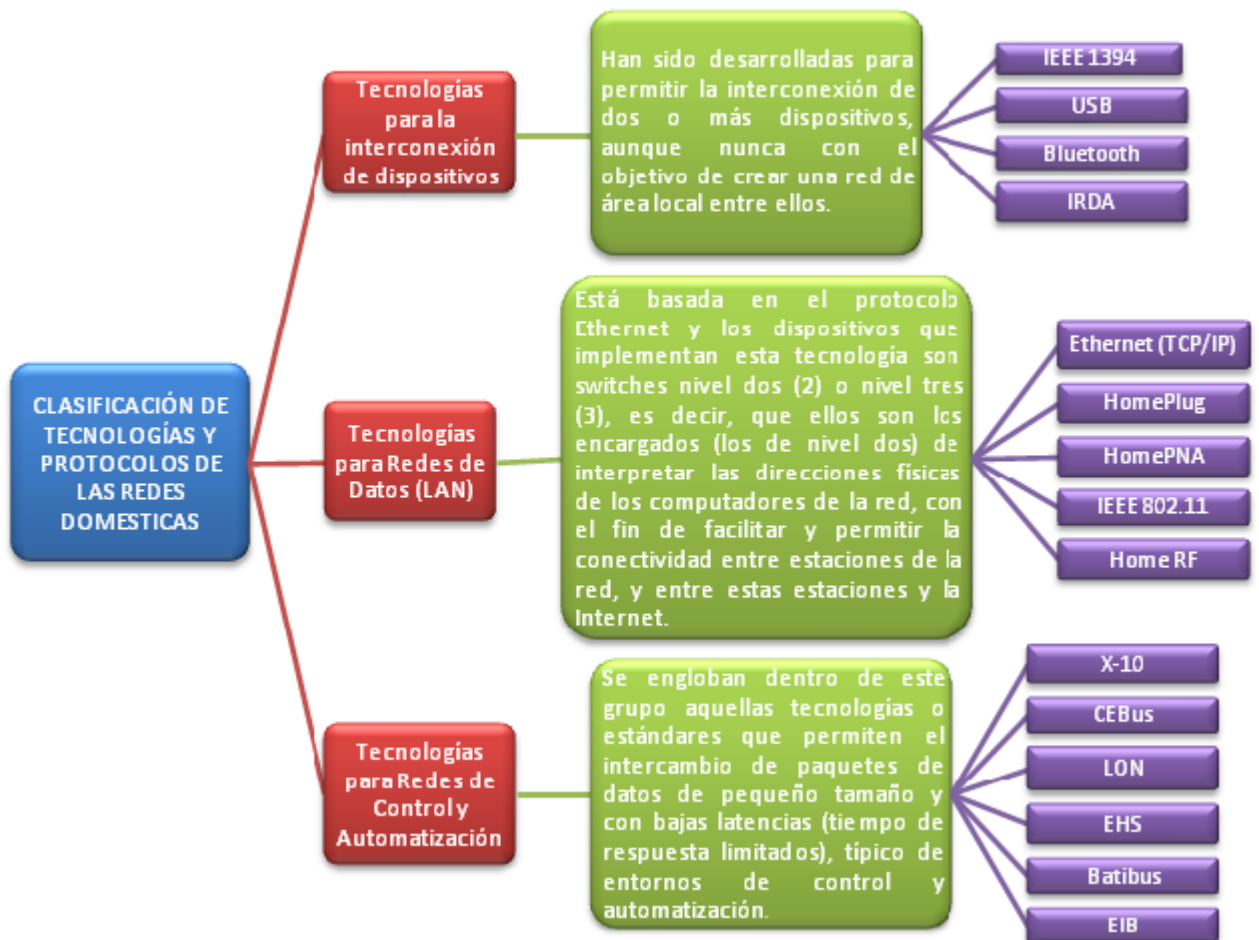


Figura 2.2: Esquema de tipo de protocolos según su aplicación[6].

Tabla 2.1: Características para la interconexión entre dispositivos[1].

Tecnología	Ventajas	Desventajas
IEEE 1394	Amplio soporte en los sistemas operativos de última generación. Gran ancho de banda. Ideal para aplicaciones de video digital. Peer to peer.	Necesita un cable por dispositivo. Tecnología cara en relación a sus prestaciones.
USB	Montaje y configuración sencillo. Ideal para la conexión de todo tipo de dispositivos a un PC o similar. Tecnología asequible en cuanto a precio	Necesita un host que controle la conexión. Distancia entre dispositivos limitada
Bluetooth	Inexistencia de cables. Consumo de corriente bajo posible comunicación activa	Configuración y puesta en marcha. Coste
IRDA	Tecnología muy extendida. Fácil implantación y uso	Punto de acceso por estancia. Velocidad baja.

La misma comparación se realiza con los diferentes tipos de red local (LAN y WLAN), que permitan interconexión entre los equipos que componen el sistema inmótico del Edificio

Eléctrica II, tal como lo muestra la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Ventajas y desventajas de diferentes tipos de redes de datos LAN[1].

Tecnología	Ventajas	Desventajas
Ethernet (TCP/IP)	Tecnología de red doméstica más rápida sumamente segura. Fácil de mantener después de la instalación.	La instalación de cableado red y dispositivos de red pueden resultar costosa. La configuración y puesta en marcha tiene su complejidad
HomePlug	Coste bajo de implantación. Ausencia de cableado adicional. Alto ancho de banda.	Oferta limitada de productos. Inexistencia de instaladores especializados
HomePNA	Instalación fácil y económica. No requiere equipos de red. Velocidad aceptable.	Disponibilidad de rosetas. Velocidad limitada según aplicaciones. Ruidos
IEEE 802.11.a	Alto ancho de banda. Bien protegido contra interferencias	Alcance limitado. Coste. Incompatibilidad con 802.11. b y g
IEEE 802.11.b	Alcance y velocidad. Fácil integración con otras redes. Soporta gran variedad de servicios	Interferencias. Difícil configuración
IEEE 802.11.g	Alto ancho de banda. Compatible con 802.11.b	Puede sufrir interferencias por trabajar en una banda muy colapsada. Poca oferta de productos en este momento
Home RF	No requiere punto de acceso. Fácil instalación	El Home RF Working Group se disolvió en Enero de 2003

En la Tabla 2.3 listan dos grupos, el grupo que se rige por estándares europeos y otro que es regido por estándares americanos, el cual se adapta al diseño de automatización para el Edificio Eléctrica II, debido a que las condiciones y parámetros que establecen los estándares americanos, son los que aplican a Colombia; por lo tanto, el estudio estará centrado principalmente en estos protocolos[28].

Tabla 2.3: Estándares de control para un sistema de gestión de edificios[2].

Tipo	Usabilidad	Características y requerimientos
Estándares americanos		
X-10	Muy fácil implantación	Utiliza la red eléctrica instalada del edificio, pensando para mercado domestico
CEBus	Mediana implantación	Utilizado en instalaciones de tipo medio
LON	Mucha implantación	Utilizado ampliamente en climatización. Apto para grandes instalaciones
Estándares europeos		
EHS	Poca implantación	Pensado para utilidades domesticas.
Batibus	Sencillo	Instalaciones de tipo medio.
EIB	Gran implantación	Complejo y útil en instalaciones de tipo medio-alto

2.3. PLATAFORMAS DE INTEGRACIÓN Y PROGRAMACIÓN

Dentro de un sistema inmótico se pueden encontrar diferentes arquitecturas de software, lo cual ha sido una de las principales causas por las que grandes compañías han auspiciado plataformas, generalmente software, que permiten el intercambio de información entre los equipos que componen el sistema inmótico; además, permiten crear servicios orientados hacia la programación de dispositivos de automatización y control de edificios. En la Tabla 2.4 se exponen brevemente las plataformas de integración más comunes[29].

Las plataformas de integración están asociadas directamente con los controladores (unidad de control) y el software de control de una instalación inmótica.

Una plataforma de integración debe cumplir dos puntos básicos[30]:

1. El sistema de control debe contar con los medios necesarios, hardware y software, para comunicarse con los diferentes subsistemas (seguridad, iluminación, ventilación, etc)
2. El sistema de control será el medio por parte del usuario para actuar sobre dichos subsistemas. Esto aporta robustez al sistema pues se puede garantizar el correcto funcionamiento del estado de cada uno de los elementos controlados y una mayor interacción entre ellos.

Dentro de la edificación existen actores con diferentes tecnologías, lo cual ha sido una de las Principales causas por las que grandes compañías han auspiciado plataformas generalmente software que permitan el intercambio de información y datos de forma sencilla y transparente para el usuario final, creando servicios orientados hacia la programación de dispositivos de automatización y control de edificios. En la siguiente Tabla 2.4 se exponen brevemente dichas plataformas [31].

Tabla 2.4: Plataformas de integración y programación.

Tipo	Características
UPnP	Arquitectura de software abierta que permite compartir información y recursos entre dispositivos, auspiciada por Microsoft.
Jini	Arquitectura de software abierta que permite compartir información y recursos entre dispositivos, auspiciada por Sun Microsystems.
HAPI	Servicios e interfaces de programación orientados hacia la automatización y control de edificios.

2.4. COMPARACIÓN DE PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Estableciendo la instrumentación y los distintos sistemas que se encontraran en el Edificio de Eléctrica II, se debe seleccionar el protocolo de comunicación para el sistema inmótico, el cual se define como “El idioma o formato de los mensajes que los diferentes elementos de control del sistema deben utilizar para entenderse unos con otros y que puedan intercambiar su información de una manera coherente”[32].

Para la comparación se hizo énfasis en las principales características que ofrecen los distintos protocolos de comunicación más sobresalientes en el sector de la automatización de edificios[31].

En las siguientes tablas se nombraran las características técnicas que se tendrán en cuenta para el desarrollo del sistema inmótico (Tabla 2.5) y los protocolos más sobresalientes a nivel mundial, que podrían ser o son utilizados en el país para la parte de control y automatización de edificios (Tabla J.9).

Tabla 2.5: Descripción de las características para los protocolos.

CARACTERÍSTICA	DESCRIPCIÓN
Tipo de protocolo	Hace referencia a la clasificación del protocolo según su estandarización.
Soporte físico	Relaciona el medio de transmisión que utiliza el protocolo para el intercambio de información entre los distintos elementos del sistema.
Velocidad de transferencia	Tiempo que tarda una estación o un servidor en poner en la línea de transmisión el paquete de datos a enviar. El tiempo de transmisión se mide desde el instante en que se pone el primer bit en la línea hasta el último bit del paquete a transmitir. Se mide En bps instante en que se (bits por segundo) o en octetos o bytes (B/s).
Alcance máximo	Máxima distancia que puede existir entre dos dispositivos para su intercambio de información dentro del sistema utilizando de dicho protocolo.
Costo	Busca estimar el nivel de costo de la aplicación de dicho protocolo en una instalación domótica. Se considera bajo o alto según su costo frente a las demás tecnologías en el ámbito comercial.
Ámbito de aplicación	Da idea del reconocimiento y acogida que tiene cada protocolo a nivel mundial. Existen algunos con grandes prestaciones pero solo se aplican en determinados países regiones.
Especificaciones generales	Destaca características básicas de funcionamiento y ventajas de cada protocolo.

2.5. EVALUACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS PROTOCOLOS MEDIANTE LA METODOLOGÍA AHP

Al analizar cada uno de los protocolos (Tabla J.9), se extrajo las características principales de cada uno de los protocolos utilizados en un sistema inmótico. Se realizó un esquema para la evaluación y análisis de los protocolos de comunicación a partir de la metodología AHP.

Para cada uno de los protocolos, se establecieron 4 parámetros tenidos en cuenta como

criterio de selección para la selección del protocolo:

- Versatilidad y Adaptabilidad: Se refiere a la gran capacidad para el cambio o para adaptarse con facilidad y rapidez a diversas funciones. Evalúa la flexibilidad del sistema para integrar gran variedad de aplicaciones; en este caso, gestión de la iluminación, seguridad, ventilación y generación de energía eléctrica a partir de bicicletas estáticas.
- Facilidad y Accesibilidad: Indaga sobre la facilidad de que la UIS acceda a estas tecnologías. Involucra su disponibilidad en el país y en la región, la facilidad y prestaciones en cuanto a diseño, operación y mantenimiento del sistema, así como el nivel de asesoría antes, durante y después de la implementación del sistema de automatización del edificio.
- Costo: Busca tener idea de qué tan costosa resulta la implementación, teniendo en cuenta los gastos de software, capacitación y dispositivos.
- Características técnicas: Busca evaluar las principales características técnicas y de funcionamiento de cada protocolo en la instalación.

Al realizar cada uno de los pasos según como lo indica el Anexo J, se obtiene según los resultados de la metodología AHP el orden de rendimiento y prestaciones de los distintos protocolos propuestos. Estos resultados se muestran en la Figura 2.3. Como se observa se nombran los 3 primeros lugares para cada uno de los criterios.

Por último se realiza un análisis general en el que se le da un valor de ponderación igualdad a todos los criterios. Teniendo en cuenta los pesos del análisis que se realizó en el análisis AHP (Anexo J) los puestos obtenidos por cada protocolo son los siguientes Tabla 2.6:

Tabla 2.6: Resultados obtenidos de la metodología AHP.

Protocolo	TOTAL	Puesto
MODBUS/TCP	0,97	1
LONWORKS	0,927	3
TCP/IP	0,826	4
KNX	0,787	7
OPC	0,939	2
BACNET	0,803	6
ZIGBEE	0,732	9
X-10	0,808	5
CEBUS	0,738	8
PROFIBUS	0,704	10

Por lo tanto se considera que el protocolo que brinda mejores prestaciones para el sistema de automatización del Edificio de Eléctrica II, es el protocolo MODBUS, por lo cual se propone la aplicación de esta tecnología en el diseño del sistema inmótico para la nueva edificación.

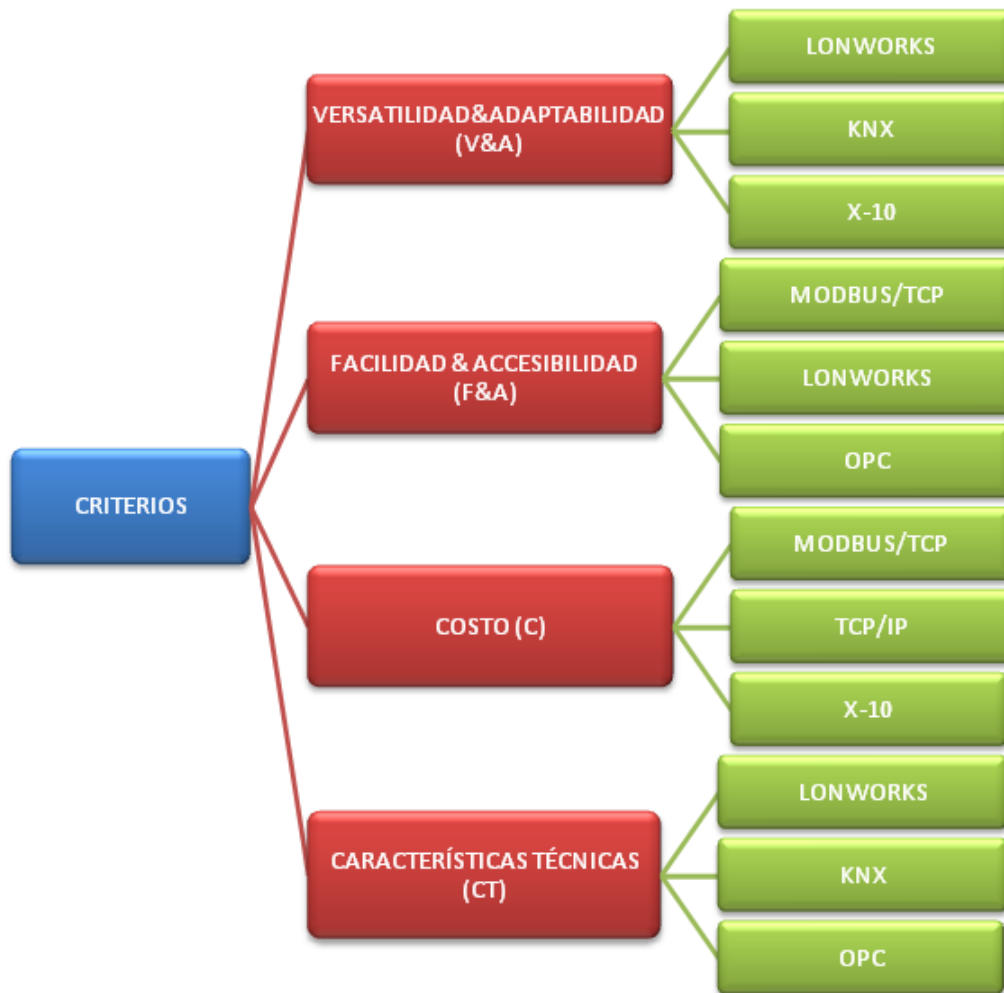


Figura 2.3: Resultados de la metodología AHP.

El protocolo MODBUS. Es un protocolo maestro \ esclavo que permite a un único “maestro” solicitar respuestas de los esclavos o realizar acciones dependiendo de las solicitudes. El “maestro” se puede comunicar con cada uno de los “esclavos” o iniciar un mensaje de difusión para todos los “esclavos”. Los “esclavos” devuelven un mensaje (respuesta) a cada una de las solicitudes de difusión desde el maestro[33].

El medio físico de conexión puede ser un bus semidúplex (half duplex) (RS-485 o fibra óptica) o dúplex (full duplex) (RS-422, BC 0-20mA o fibra óptica). La comunicación es asíncrona y las velocidades de transmisión previstas van desde los 75 baudios a 19.200 baudios. La máxima distancia entre estaciones depende del nivel físico, pudiendo alcanzar hasta 1200 m sin repetidores.

El acceso al medio La estructura lógica es del tipo maestro-esclavo, con acceso al medio controlado por el maestro. El número máximo de estaciones previsto es de 63 esclavos más una estación maestra.

Los intercambios de mensajes pueden ser de dos tipos:

- Intercambios punto a punto, que comportan siempre dos mensajes: una demanda del maestro y una respuesta del esclavo (puede ser simplemente un reconocimiento (acknowledge)).
- Mensajes difundidos. Estos consisten en una comunicación unidireccional del maestro a todos los esclavos. Este tipo de mensajes no tiene respuesta por parte de los esclavos y se suelen emplear para mandar datos comunes de configuración, reset, etc [34].

La codificación de datos dentro de la trama puede hacerse en modo ASCII o puramente binario, según el estándar RTU (Remote Transmission Unit). En cualquiera de los dos casos, cada mensaje obedece a una trama que contiene cuatro campos principales, según se muestra en la Figura 2.4. La única diferencia estriba en que la trama ASCII incluye un carácter de encabezamiento (3AH) y los caracteres CR y LF al final del mensaje. Pueden existir también diferencias en la forma de calcular el CRC, puesto que el formato RTU emplea una fórmula polinómica en vez de la simple suma en módulo 16. Con independencia de estos pequeños detalles, a continuación se da una breve descripción de cada uno de los campos del mensaje:

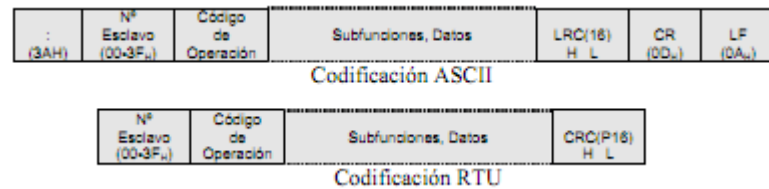


Figura 2.4: Trama genérica del mensaje según el código empleado.

Todas las solicitudes y respuestas Modbus están diseñadas en tal forma que el receptor puede verificar que un mensaje esta completo.

Modbus es un protocolo de comunicación diseñado para permitir a equipos industriales tales como PLCs, computadores, drivers para motores y otros tipos de dispositivos físicos de entrada/salida comunicarse sobre una red. Fue introducido por Schneider Automation como una variante de la familia de protocolos MODBUS, ampliamente usada para la supervisión y el control de equipo de automatización. Específicamente el protocolo define el uso de mensajes MODBUS en un entorno intranet o internet usando los protocolos TCP/IP[35].

3

COMPONENTES BÁSICOS DEL SISTEMA INMÓTICO PARA EL SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL FORZADO

En un sistema inmótico se pueden encontrar componentes básicos dentro de la infraestructura, tales como, sensores, actuadores, interfaz, y controlador, mostrados en la Figura 3.1, cumplen con tareas específicas descritas en la Tabla 3.1, su selección se realizó teniendo en cuenta las características de los componentes básicos dentro de el sistema de ventilación natural forzado como se da a conocer en la Tabla 3.1.

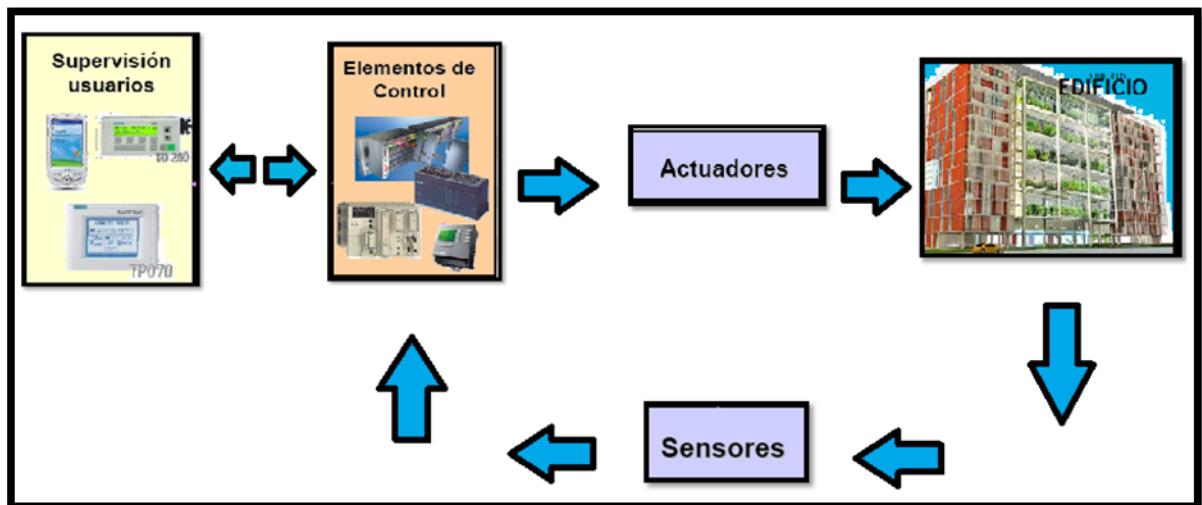


Figura 3.1: Esquema general de un sistema inmótico.

Tabla 3.1: Componentes básicos de un sistema inmótico[3].

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN
Sensores	Son los ojos del sistema y dicen lo que esta sucediendo dentro y fuera de la edificación.
Controlador	Es el cerebro del sistema, toma las decisiones para realizar alguna tarea.
Actuadores	son los brazos del sistema, y reciben las órdenes del controlador para realizar alguna tarea en especifico.
IHM	Es el enlace entre el operador y la máquina para de esta manera dotar al sistema de un grado de confort para así realizar las tareas dentro de la edificación de una manera rápida y sencilla, consiguiendo optimizar el funcionamiento de cada uno de los subsistemas que se encuentran dentro de la edificación.
Acondicionamiento de señales	Es el componente que permite el acoplamiento de la señal de control de unidad controladora al actuador.

3.1. SENSORES

Los sensores son dispositivos capaces de convertir magnitudes físicas, químicas, biológicas, en magnitudes eléctricas, al convertir un tipo de energía en otra, para proporcionar al controlador la información correcta para que realice el respectivo control del sistema[36].

Un sistema inmótico debe contar con sensores que le permitan saber lo que está sucediendo en el edificio, permitiendo al controlador obtener la información necesaria para gestionar de manera eficaz los procesos. Sensores habituales dentro de los edificios son los de temperatura, humedad, presencia e iluminación.

Los sensores se pueden clasificar según la señal de salida o la magnitud medida como se indica en el diagrama esquemático de la Figura 3.2.

Con base en los requerimientos de automatización y control del sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados, se realizó la clasificación de sensores, según la señal de salida o la magnitud medida:

3.1.1. SENSORES DE TEMPERATURA

Para medir la temperatura exterior, la temperatura en la pared de los tubos y la temperatura dentro del recinto, con base en la Figura 3.3 se selecciona la RTD para la toma de datos en el sistema, debido a su bajo costo, bajo consumo de potencia y la precisión en la medición de temperatura en los rangos de interés del proyecto.

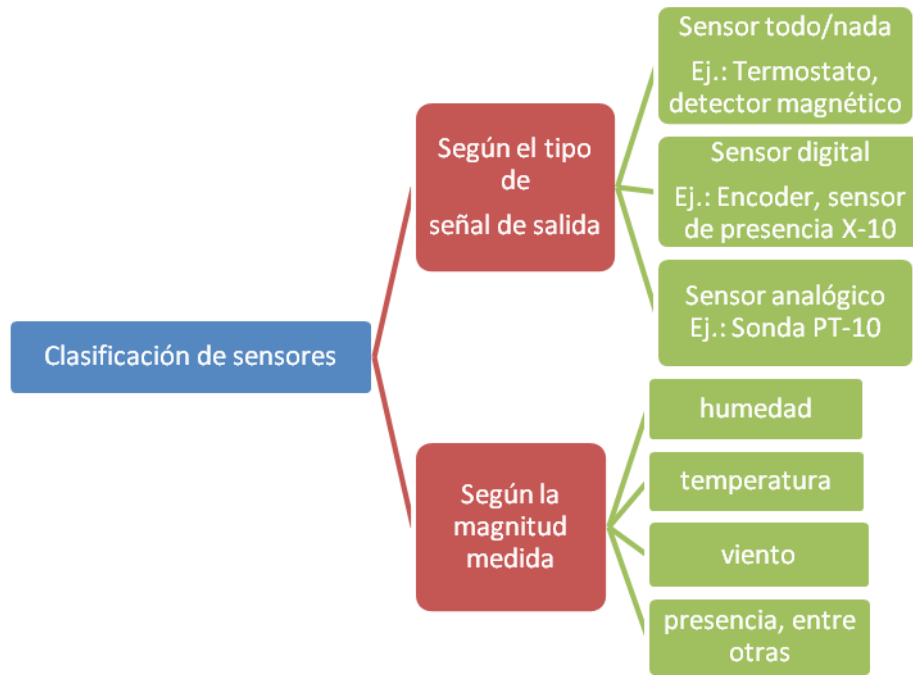


Figura 3.2: Clasificación de los sensores[7].

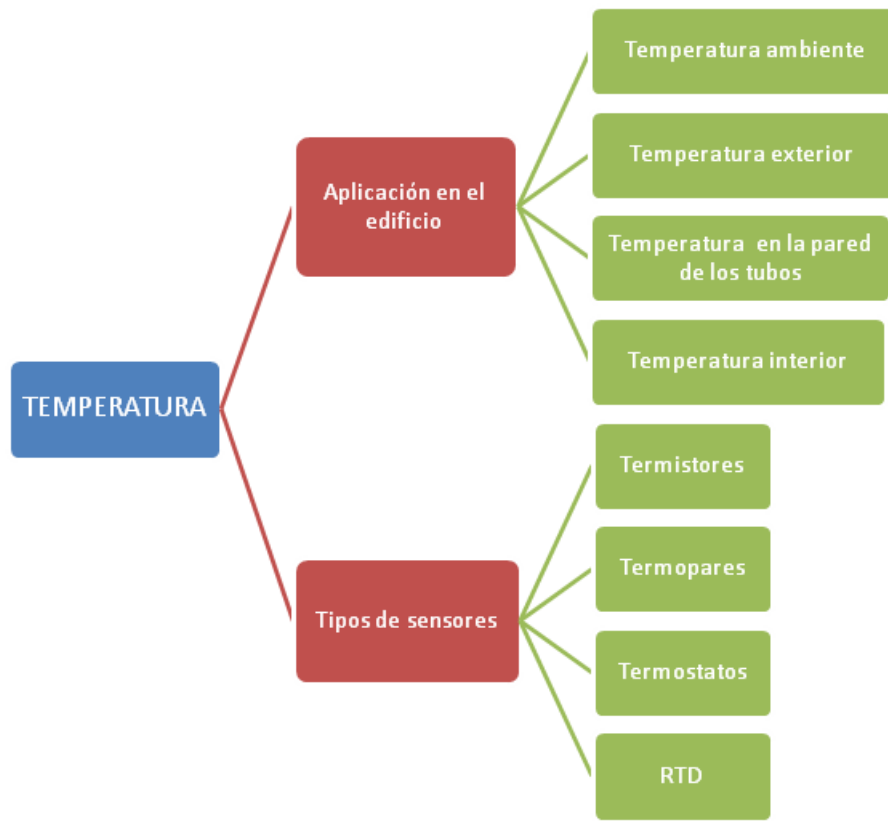


Figura 3.3: Sensores de temperatura.

Además del costo y el consumo, también se tuvo en cuenta parámetros que se observan en la Tabla 3.2, donde se dan a conocer distintas características de la RTD.

Tabla 3.2: Características de las RTD más comunes.

Material del elemento	Resistencia a $0^{\circ}C$ (Ohms)	Coficiente Temperatura	Rango de uso $^{\circ}C$	Especificación según norma
Platino Pt100	100	0.003926		REFERENCIA
Platino Pt100	100	0.00385	(-)200 a 750	DIN
Platino Pt1000	1000	0.00385	(-)100 a 200	DIN
Cobre CU-10	10($25^{\circ}C$)	0.00427	(-)100 a 200	DIN
Níquel Ni-100	100	0.00672	(-)100 a 200	DIN

El esquema de la Figura 3.4 muestra los tipos de RTD existentes en el mercado, según su precisión de la RTD.

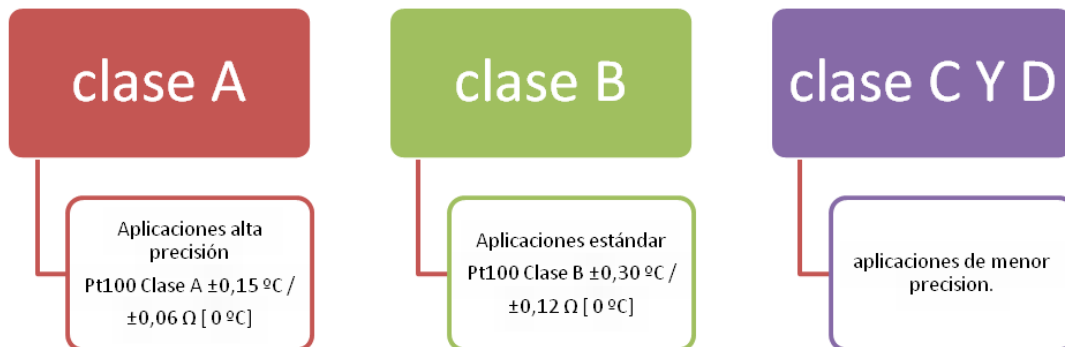


Figura 3.4: RTD según la tolerancia.

Se ópto por utilizar una RTD PT100 tipo A debido a su alta precisión, y su fácil extensión de hasta 30m con cable de cobre; la Tabla 3.3, lista varias referencias de RTD con su respectivo fabricante, una breve descripción y su precio correspondiente.

Tabla 3.3: Elección de la RTD a utilizar.

Empresa	Referencia	Características	precio (\$COL)
Via Industrial	125202	Termoresistencia PT 100 cabezote rosca 2, 1/4, clase B y 3 hilos simple	167 266
Via Industrial	TWRPT 125605	Longitud bulbo 50 mm Acero inoxidable SS304 PT100, 3 hilos, diámetro bulbo 4 mm	83 200
omega.com	PR-14-2-100-1/4-12-E	Utiliza el estilo de 3 hilos, acero inoxidable SS304, PT100	162 000
omega.com	PR-12-2-100-1/4-6-E-RP	PT100, estilo 3 hilos, rango de temperatura de -200 to 500° C, clase A	136 800
omega.com	PRTF-12-2-100-1/4-6-E-RP	PT100 Clase B, rango de temperatura 50 to 260° C, 3 hilos	93 600
omega.com	PR-23-1-100-A-1/8-0600-M8	PT100 Clase A rango de temperatura -30 to 350° C y Clase B rango de -50 to 500° C, 3 hilos	59 400
Instrumentos & Controles S.A.	0068-R-11-N-30-N-20	68 Descripción del producto: Thin-Film Platinum seis terminales; tapa plana Longitud de extensión: 3.0 inches (std)	913 752
Instrumentos & Controles S.A.	0078-R-13-N-30-A-75	78 Descripción del producto: Wire-Wound Platinum seis terminales; Tipo de sensor: Single-Element Temperature Sensors; General-Purpose Style -200 to 500 deg C (-328 to 932 deg F) Longitud de extensión: 3.0 inches (std)	1 358 196
Instrumentos & Controles S.A.	0068Q-N-11-0050-L150	0068Q Descripción del producto: Sanitary Platinum Tipo de sensor: Single Stepped Stem -50 to 200 Deg C (-58 to 392 Deg F)	954 156

La referencia del sensor utilizado es PR-12-2-100-1/4-6-E-RP visto en la Figura 3.5 de la empresa Omega, ya que cumple las características mencionadas y su precio es razonable respecto a las prestaciones del sensor.



Figura 3.5: RTD PR-12-2-100-1/4-6-E-RP.

Para obtener la medida de la RTD y realizar el correspondiente control, se hace necesario utilizar un transmisor. Se requiere que soporte conexión de 3 hilos, para adaptarlo a una RTD PT100 y salida analógica de 4 a 20mA. La Tabla 3.4 lista transmisores de temperatura y describe sus características más relevantes.

Tabla 3.4: Selección del transmisor de temperatura.

FABRICANTE	MODELO	CONSUMO	ALIMENTACIÓN [V]	TIPO DE SALIDA	PRECIO
STATUS INSTRUMENTS	SEM203P	0,36-0,9	8 a 30	20-4mA	32€
PR ELECTRONICS	RTT5333A	25m-0,8	8 a 35	20-4mA	67€
CONAX TECHONOLOGIES	6333A	0,19-0,8	8 a 35	4-20mA	150\$US
Pyro MATION,INC	TM01 440	40m-0,6	10 a 30	4-20mA o 20-4mA	122,5\$US
SIEMENS	TH400	11mA	10 a 30	4-20mA	540\$US

La selección del transmisor de temperatura se realizó con base en su consumo de potencia y precio; sin embargo, se requiere su disponibilidad de compra en Colombia y garantía y soporte; por lo cual, se seleccionó el transmisor pyromation TM01-440, mostrado en la Figura 3.6.

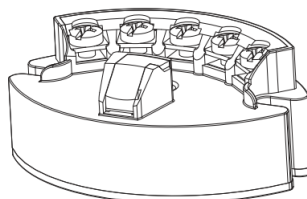


Figura 3.6: Transmisor pyromation TM01-440.

3.1.2. SENSOR DEL CAUDAL DE AIRE

Para medir el caudal de aire, la Tabla 3.5 describe dos sistemas muy utilizados para la medición de gases. Al comparar los dos, se observa que los rotámetros son la instrumentación más adecuada para el sistema de ventilación natural forzada del Edificio Eléctrica II, debido a su bajo precio y consumo.

Tabla 3.6: Características de algunos rotámetros comunes.

MARCA	ALIMENTACIÓN	CONSUMO	PRECIO	SEÑAL DE SALIDA
PCE-EE-575	10-19V DC o 19-29V DC	máx. 70mA a 20 m/s	138 €	4-20 mA
PCE-EE-65	24V DC/AC $\pm 20\%$	160mA máx. en AC 90mA máx. en DC	189€	4-20 mA normalizada
PCE	24 V DC/AC $\pm 20\%$	máx. 100 mA	189€	4-20 mA normalizada

El rotámetro seleccionado es el modelo PCE-EE-65 mostrado en la Figura 3.7 siendo el de menor precio. Tiene salida analógica y es de uso típico en la parte de control de sistemas de ventilación y calefacción, controladores de ventilación o entradas de aire en hornos.

Tabla 3.5: Ventajas y desventajas de caudalímetros.

SISTEMA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
ROTÁMETROS	<ul style="list-style-type: none"> * Es económico para caudales bajos y tuberías con diámetros menores a 2". * Cubre un rango amplio de caudales. * Sirve para líquidos y gases. * Provee una información visual directa. * La caída de presión es baja. * Instalación y mantenimiento simple. * Es económico para caudales bajos y tuberías con diámetros menores a 2". * Cubre un rango amplio de caudales. * Sirve para líquidos y gases. * Provee una información visual directa. * La caída de presión es baja. * Instalación y mantenimiento simple. 	<ul style="list-style-type: none"> * No es sencillo ni económico obtener señal eléctrica a partir de la indicación. * Se incrementa mucho su costo para tuberías de Diámetro grande. * No se consiguen rotámetros para tuberías grandes. * Debe instalarse en sentido vertical de modo que el Caudal sea ascendente. * Son de baja precisión.
CAUDALIMETROS A TURBINA	<ul style="list-style-type: none"> * Es el instrumento más preciso disponible para medir caudal. * Lineal sobre un amplio rango de caudales. * Rápida respuesta y excelente repetibilidad. * Fácil interfaz a sistemas de computación. * Operación sobre un muy amplio rango de temperaturas y presiones. 	<ul style="list-style-type: none"> * Al tener piezas móviles que giran sobre rodamientos, el desgaste suele ser el problema principal de la turbina. * Es un instrumento delicado en comparación con otros caudalímetros. * Cualquier exceso de velocidad puede dañar sus rodamientos. * Es caro y su costo aumenta desmedidamente con el tamaño de la turbina. * Requiere que el flujo a medir sea limpio y tenga propiedades lubricantes. * Alto costo de mantenimiento. * No es utilizable en fluidos de alta viscosidad.

Su funcionamiento es resistente al polvo y tiene alta reproducibilidad y estabilidad a largo plazo. Su montaje es rápido y sencillo, y su profundidad se puede regular libremente en la instalación[37].



Figura 3.7: Rotámetro PCE-EE-65.

SENSOR HUMEDAD RELATIVA DEL RECINTO

La humedad relativa mide la cantidad de agua que contiene un gas, expresada en tanto por ciento de la cantidad que el gas tendría en estado de saturación, a la misma temperatura y presión absoluta; la Figura 3.8 describe los tipos de sensores de humedad.



Figura 3.8: Sensores de humedad relativa[8].

En la Tabla 3.7 se pueden observar algunos sensores de humedad relativa con las características más importantes a tener en cuenta para la selección del sensor.

Tabla 3.7: Sensores de humedad relativa.

MARCA	ALIMENTACIÓN	CONSUMO	PRECIO	SEÑAL DE SALIDA
PCE-EE23- FTA	15 V-35 V DC o 15 V- 28 V AC	12 mA DC	418 €	0 -10 V, 4 -20 mA
PCE-EE22	15 V - 35 V DC	10 mA DC	349 €	4 mA - 20 mA
PCE-EE23- FTB	15 V - 35 V DC	10 mA DC	476 €	0-10 V, 4 - 20 mA
PCE-EE-061 FX	9 V - 28 V DC	1,56 A máx DC	124 €	4 - 20 mA

El sensor de humedad seleccionado fue el PCE-EE22 con base en su menor precio y su menor consumo. Se muestra en la Figura 3.9 y a causa de su funcionalidad de humedad y temperatura es usado para controlar almacenes o procesos de producción. Debido a su construcción robusta se puede usar en gran variedad de lugares y condiciones. Además de la posibilidad de montar el equipo en una pared, también puede colocarse en una regleta de montaje según la normativa DIN EN 50022. La pantalla incorporada permite una lectura rápida de la temperatura y la humedad del aire, lo que convierte este sensor multifunción

de humedad y temperatura en un instrumento de medición valioso en el ámbito de procesos de producción. El sensor multifunción de humedad y temperatura trabaja en un rango de medición de 0 a 100 % H.r. y -40°C a 80°C [37].



Figura 3.9: Sensor de humedad PCE-EE22.

SENSOR DE NIVEL DE CO₂

El dióxido de carbono CO₂ es un gas básicamente exhalado en la respiración de seres vivos, que actúa por desplazamiento del oxígeno y a elevadas concentraciones puede causar dolor de cabeza, mareos, somnolencia, y problemas respiratorios dependiendo de la concentración y de la duración de la exposición.

Para la selección de su dispositivo de medición se debe tener en cuenta su tipo de salida, ya que se requiere que sea analógica de acuerdo al diseño.

Tabla 3.8: Sensores de CO₂.

Empresa	ALIMENTACIÓN	CONSUMO	PRECIO	SEÑAL DE SALIDA
PCE-MF 420	24 Vdc	1.3 W	165€	4 - 20 mA
Herter-DHD37BT	16 - 40 Vdc	1.7 W	139€	4 - 20 mA
Delta OHM	16 - 40 Vdc	2 W	189€	4 - 20 mA
Detectores y Sensores. Cl	24 V AC DC	1,8 W	179€	4 - 20 mA
Detectores y Sensores. Cl	24 V AC DC	0,8 W	180€	0-10V

Para la selección del sensor de medición de CO₂, se toma como dato principal la potencia de consumo. como resultado se escoge el MOL-CO₂-3-10V mostrado en la Figura 3.10 de la empresa Detectores y Sensores.cl con un consumo de 0,8 [W].



Figura 3.10: Sensor de CO₂ MOL-CO₂-3-10V.

El detector de dióxido de carbono, emite señales de alarma cuando se superan los valores límite establecidos, con este objeto posee posibilidad de establecer set point a diferentes concentraciones; además, se puede utilizar el relé de conexión para poner en funcionamiento una instalación de ventilación que esté activa hasta que el contenido de CO₂ vuelva a encontrarse por debajo del valor crítico y no existan riesgos para las personas. La calidad superior de estos detectores se basa en el sistema NDIR (non dispersive infrared), lo cual asegura una alta calidad y duración del detector.[38]

SENSOR DE PRESENCIA

En la Figura 3.11 se describen los tipos de sensor de presencia.

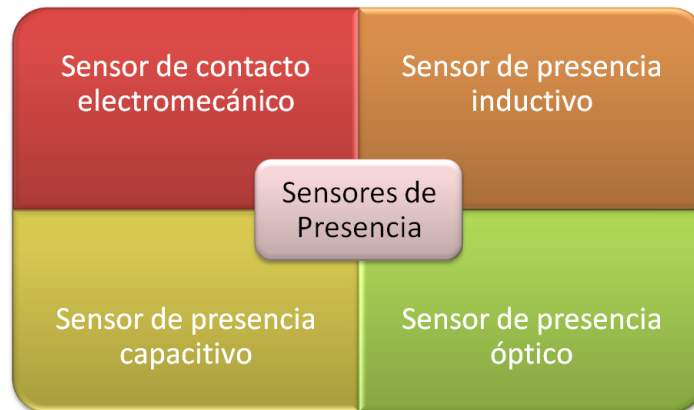


Figura 3.11: Tipos de sensor de presencia.

Para la detección de presencia se utilizaron sensores analógicos o de salida on-off; la Tabla 3.9 presenta algunos sensores con sus características más relevantes para su selección.

Tabla 3.9: Sensores de presencia.

MARCA	MODELO	CONSUMO	COBERTURA	PRECIO	SEÑAL DE SALIDA
GLD-308T12	12 Vdc	35 mA	360°	30.17€	RELÉ (NA)
LEVITON	ODC0S-11W	30 mA	360° 49m2	30€	RELÉ (NA)
DOMODESK	DD-4300	14 mA	90° 18m	31€	RELÉ (NA)
DOMAUT	DIR-360SM	20 mA	360° 10m	47€	RELÉ (NA)

Se seleccionó el sensor de presencia ODC0S-11W de LEVITON mostrado en la Figura 3.12 debido a su menor costo y a la capacidad que tiene de sensar a 360°.



Figura 3.12: Sensor de presencia ODC0S-11W.

3.2. ACTUADORES

Son dispositivos electromecánicos que tienen incidencias directas sobre el medio exterior, capaces de modificar magnitudes del entorno, y actúan de manera física sobre los sistemas que se están controlando dentro del sistema inmótico como lo muestra el diagrama de bloques de la Figura 3.13[7].

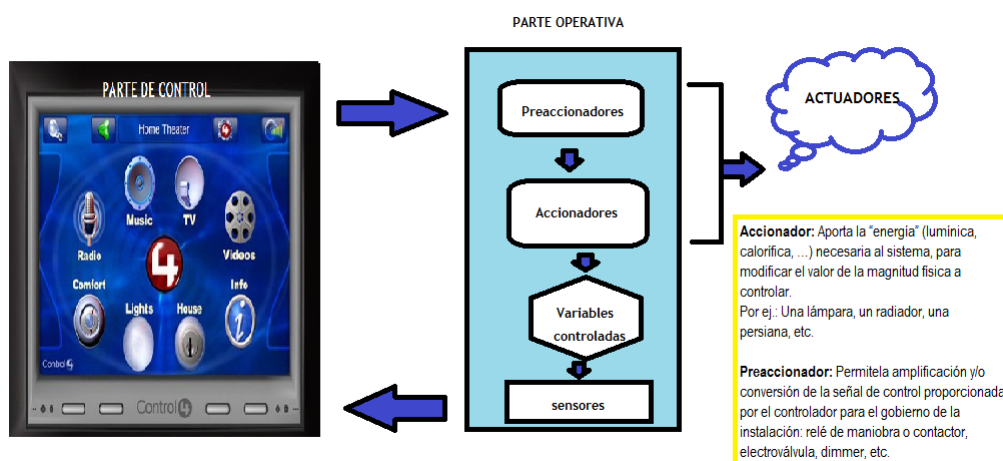


Figura 3.13: Diagrama de bloques de un sistema inmótico convencional.

3.2.1. CLASIFICACIÓN

Los actuadores se pueden clasificar según su señal de entrada y según su constitución, como se observa en el esquema de la Figura 3.14.

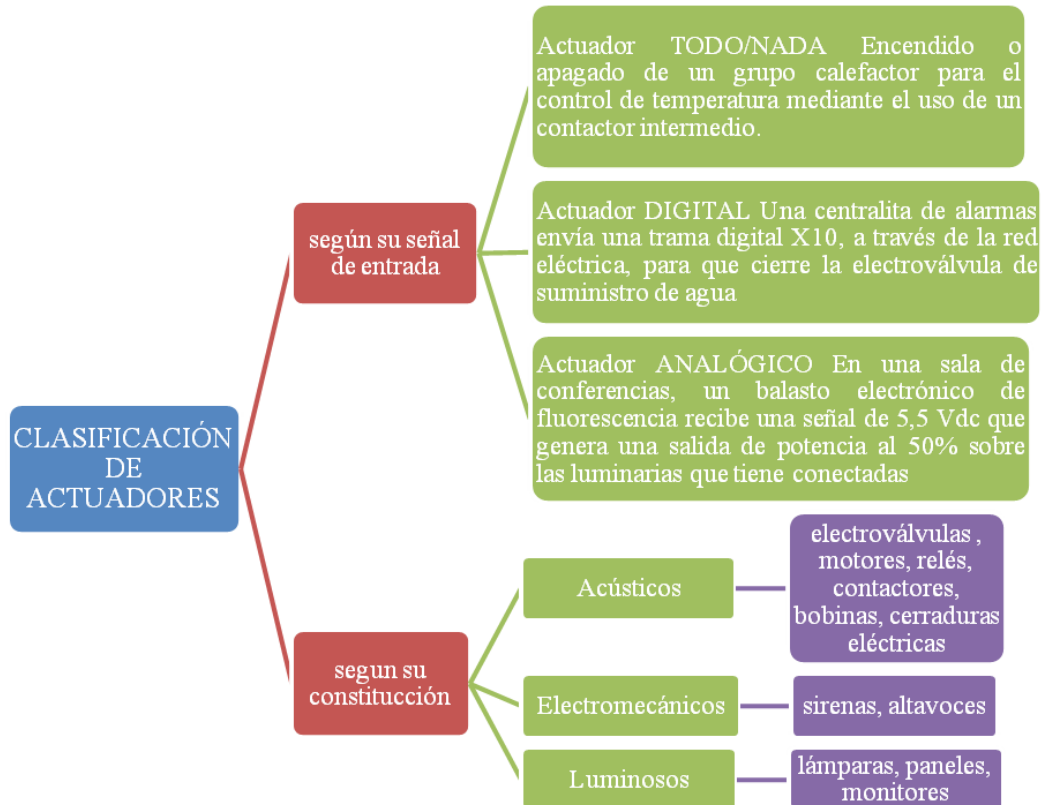


Figura 3.14: Clasificación de los actuadores.

Los elementos más utilizados dentro de los sistemas inmóticos son los relés, ya que permiten conmutar circuitos de alta potencia con señales de baja potencia. Los contactores son similares a los relés con la diferencia, que permiten trabajar con cargas de mayor potencia y al igual que los relés, son de gran utilidad dentro de las edificaciones.

Los actuadores que utilizará el sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados para el accionamiento de las ventanas, el acondicionamiento de las rejillas de el sistema de ventilación forzado, para la absorción del aire y el aire acondicionado son tipo on-off:

VENTANAS Y REJILLAS DEL SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL FORZADO

En la Tabla 3.10 se nombran distintos actuadores que se podrán utilizar en las ventanas y rejillas del sistema.

Tabla 3.10: Actuadores tipo corredera para las ventanas.

MARCA	MODELO	ALIMENTACIÓN	CONSUMO	CARGA	APERTURA	PRECIO
TOPP	T80/24	24Vdc		800N	1000mm	
APRIMATIC	Aprigrata	24Vdc	20W	200N	1500mm	315€
HOPO	CON400	20V-30V Vdc	2A Máx.	400N	400mm	US\$185.7
HOPO	CON300	20V-30V Vdc	1A Máx.	300N	350mm	US\$78.38

Para la selección se tuvo en cuenta el precio debido a que es una de las instrumentaciones más costosas que se presentan en este sistema. El actuador CON300 fue el escogido.

ABSORCIÓN DE AIRE

Se describen algunos motores de tipo axial que se tuvieron en cuenta para la selección del motor que va a hacer el trabajo de recirculación de aire. El instrumento escogido se encuentra nombrado en el Capítulo 1 como se observa en la Tabla 1.2.

AIRE ACONDICIONADO

Considerando la aplicación diseñada para el cálculo de carga térmica a condiciones esperadas para un recinto de $250 m^2$, se obtuvo que se necesita una configuración de 4 aires acondicionados con capacidad de 24 kBTU c/u o 2 de 36 kBTU c/u. Para el cálculo se utilizó la herramienta Visual Basic 6.0 nombrada anteriormente, los siguientes valores fueron los utilizados para el cálculo:

Número de personas: 25 Paredes expuestas: 2 Computador de escritorio: 2 Impresora: 1 Teléfono IP: 1 Otras fuentes de calor: 300 [W]

En la Figura 3.15 se observa el uso de esta herramienta.



Figura 3.15: Estimación de carga térmica para el aire acondicionado.

En la Tabla 3.11 se listan distintos aires acondicionados que podrán suplir esta carga térmica.

Tabla 3.11: Aire acondicionado de 24 kBTU para el Edificio Eléctrica II.

MODELO	ALIMENTACIÓN	CONSUMO	CAPACIDAD	PRECIO
LG-SJ242CD	220 Vac-1 fase	2340 W	24000 BTU	\$2.300.000
SAMSUNG-VIVIALDI	220 Vac	2380 W	24000 BTU	\$2.330.000
PANASONIC-CS-C24 MKV	220 Vac	2400 W	24000 BTU	\$2.100.000
CARRIER WRCAR243R	220 Vac	2820 W	24000 BTU	US\$ 1799

El aire acondicionado seleccionado fue el LG-SJ242CD que se muestra en Figura 3.16, tomando como criterio el menor consumo, debido a el uso de 4 aires acondicionados para climatizar un área de 250 m^2 .



Figura 3.16: Aire acondicionado LG-SJ242CD.

Teniendo la selección de los sensores y actuadores que harán parte de el sistema de ventilación natural forzado, se observa en la Figura 3.17 la forma en que se distribuirán los distintos dispositivos.

3.3. UNIDAD DE CONTROL

El controlador es el dispositivo principal dentro del sistema inmótico, ya que este actúa como el cerebro de todo el edificio. Este es el encargado de tomar decisiones dentro de la edificación. Al controlador llegan todas las señales provenientes de los sensores, este las procesa y manda señales a los actuadores para que estos realicen una función en específico.

En el controlador se encuentran algoritmos escritos en un lenguaje de programación el cual depende del controlador que se utilice. El programa que se encuentre corriendo dentro del controlador será el encargado de enviar señales para que los actuadores funcionen de acuerdo a las necesidades de los usuarios. El controlador dentro de una edificación puede ser de múltiples opciones dependiendo por una parte las necesidades y por otra la parte financiera. Se pueden utilizar como controladores de sistemas inmóticos, controladores propios de automatización de edificios, PC's, microcontroladores, PLC's o lo que en la actualidad está tomando un gran realce los PAC's (controladores de automatización programables).

▪ Piso 1

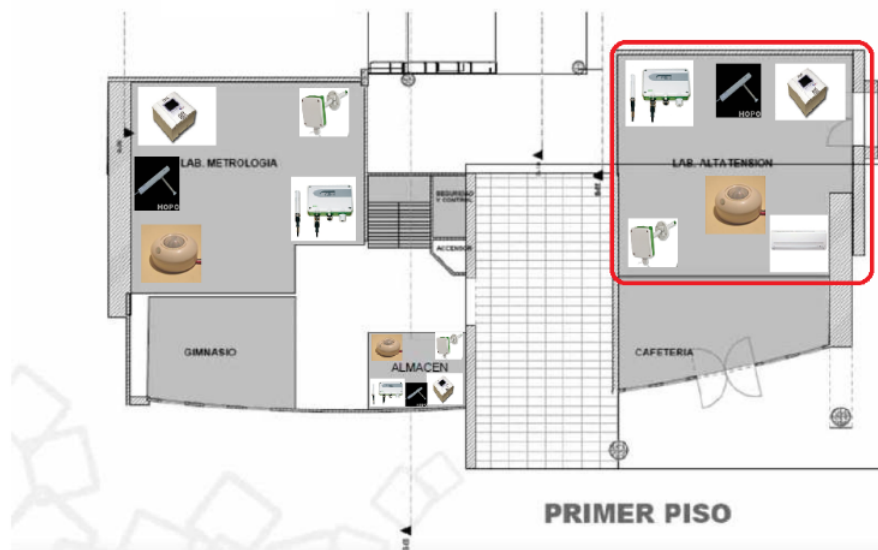


Figura 3.17: Distribución de los dispositivos en el Edificio de Eléctrica II.

El controlador o unidad de control debe tener la capacidad de manejar todo tipo de señal y comunicaciones como por ejemplo: E/S digitales, E/S analógicas, comunicación serial, entre otras.

3.4. ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES

Es un punto relevante dentro de la implementación de sistemas inmóticos, debido a que las señales producidas por el controlador, pueden ser digitales o analógicas, no compatibles con las señales de activación de los actuadores. Es en esta etapa en la que las señales de baja potencia enviadas por el controlador se acoplan mediante una interfaz para que estas se amplifiquen en tensión o en corriente.

Las señales que envían los controladores pueden ser utilizadas como señales de control para activar bobinas de contactores y estos a su vez suministran energía a circuitos de iluminación, fuerza, entre otros.

Para la adquisición de datos se hizo uso de la M-DAQ presentado en la figura 3.18, para un área de $250m^2$, se realizara la adquisición de datos con dos módulos de adquisición de datos Serie M-DAQ Multifunción de alta precisión 16 o 32 Entradas analógicas de 18 bits a 625 kS/s.



Figura 3.18: M-DAQ.

4

IHM-INTERFAZ HOMBRE-MAQUINA

Dentro de un sistema inmótico, la creación de una IHM permite visualizar el comportamiento de un espacio en función de los fenómenos sensados.

Una IHM hace que el trabajo del operario sea más eficiente, que permitirá tomar decisiones preventivas y/o correctivas. Además debe ser sencilla, intuitiva y amigable para el usuario.

El control y monitoreo de lo que sucede dentro del edificio se lo hace a través de un computador que puede estar ubicado local o remotamente y en el cual se encuentre cargado la respectiva IHM.

Para el diseño e implementación de la interfaz, se tuvo en cuenta que las señales, de sensores y actuadores fueran analógicas, para simplificar diseño. La Figura 4.1 muestra el diagrama graceft para el algoritmo de control utilizado en el diseño inmótico del Edificio Eléctrica II, con señal de activación la presencia o no de personas en el establecimiento.

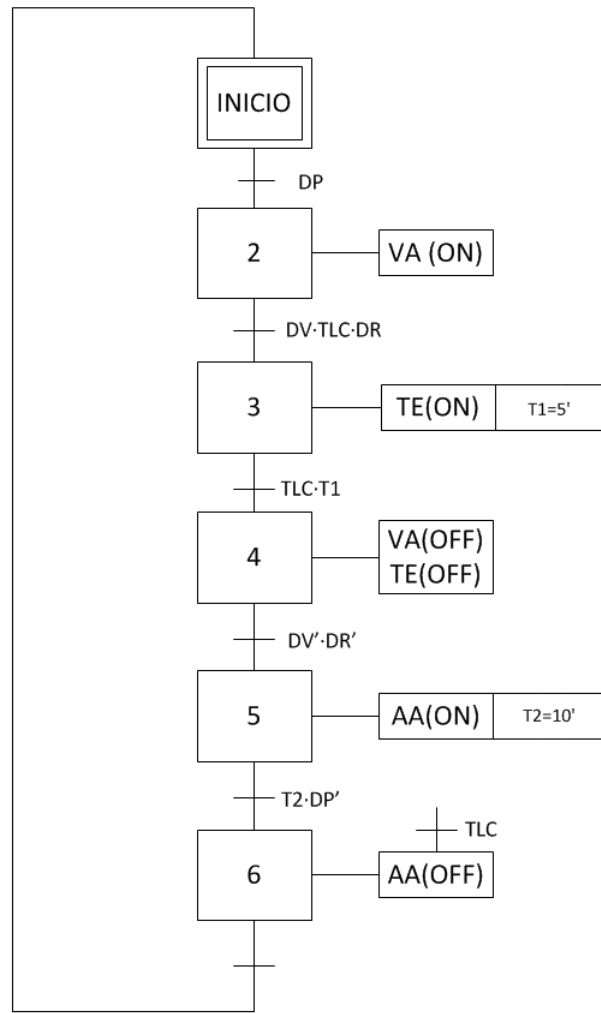


Figura 4.1: Diagrama grafcet del sistema de control del sistema.

La Tabla 4.1 lista las convenciones utilizadas en el diagrama grafcet.

Tabla 4.1: Convenciones para el diagrama grafcet del sistema.

DETECTORES	ACTUADORES
DP: Detector de Presencia	VA: Actuador de ventanas
DV: Detector de Ventana	AA: Actuador aire acondicionado
DR: Detector de Rejilla	TE: Ventilador tubos enterrados
TLC: Sensor temperatura límite de confort	RE: Rejilla salida de los tubos

Inicialmente, se dispone de un detector de presencia el cuál indicará el arranque o no del sistema de control. Mientras no se detecte presencia de personas no se accionará ni el aire acondicionado (AA) ni el sistema de tubos enterrados (TE).

El sistema de tubos enterrados constará de un ventilador axial encargado de impulsar aire

del exterior al interior de la tubería y al final de ésta se encontrará una rejilla que se abrirá en conjunto con las ventanas, siempre y cuando la temperatura del aire dentro del recinto no exceda la temperatura límite de confort. Es de gran importancia que el detector de la rejilla y de las ventanas se encuentre en estado de apertura antes de poner a funcionar el ventilador impulsor.

Al mismo tiempo que inician a funcionar los tubos enterrados, se iniciará un contador de 5 minutos que establecerá el tiempo de espera para enfriar el recinto. Después de esto, se establece la misma pregunta de la temperatura límite de confort que de no lograrse su estabilización por debajo de ésta, se dará la orden de cerrar ventanas, rejilla y apagar el ventilador axial, y tan pronto se detecte que ventanas y rejilla están cerradas se encenderá el aire acondicionado.

Por consiguiente, entra a trabajar el sistema de aire acondicionado y se inicia otro contador de 10 minutos el cual deberá retornar a su término de cuenta a la pregunta de sobrepaso de la temperatura límite de confort. De estar controlada se preguntará si existe presencia para encender de nuevo el sistema de ventilación natural forzada. Si no existe presencia alguna sencillamente apaga el sistema por completo.

La Figura 4.2 muestra el comportamiento en el tiempo, del detector de presencia, el aire acondicionado, los actuadores de las ventanas y el ventilador del sistema de tubos enterrados.

TABLA DE ANÁLISIS POR ESCENARIO HORARIO

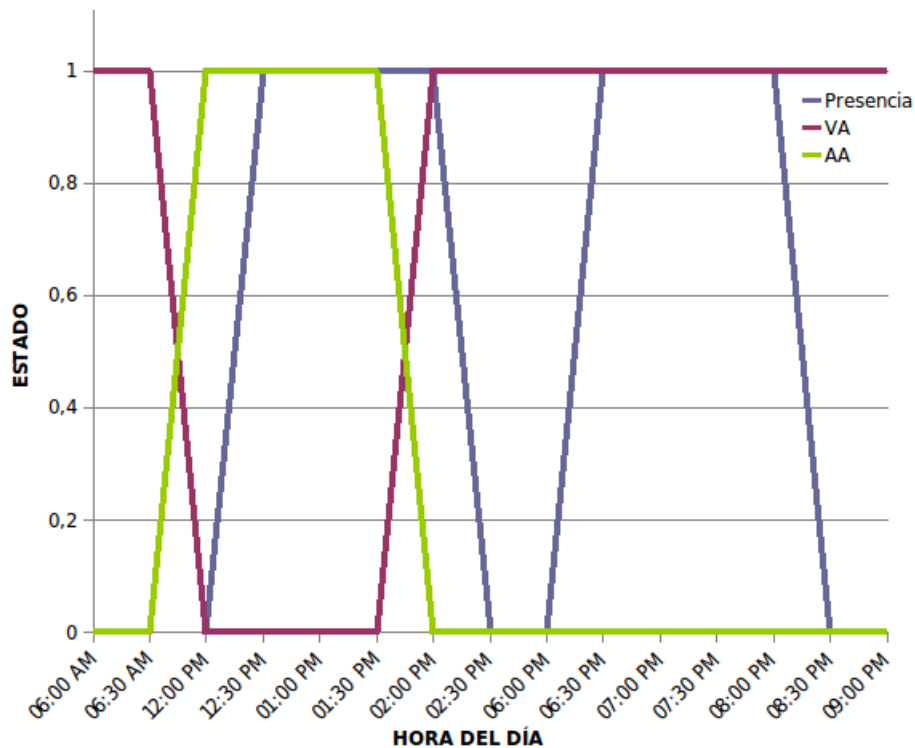


Figura 4.2: Comportamiento en el tiempo de algunos elementos inmóticos.

La Tabla 4.2 lista los datos correspondientes al comportamiento mostrado en la Figura 4.2.

Tabla 4.2: Comportamiento en el tiempo de los elementos inmóticos del sistema de ventilación natural forzada.

HORA	Presencia	$T_{amb}[^{\circ}C]$	VA	TE	AA	$T_{int}[^{\circ}C]$
06:00 AM	1	22	1	1	0	20
06:30 AM	1	23	1	1	0	21
12:00 PM	0	28	0	0	1	27
12:30 PM	1	28	0	0	1	27
01:00 PM	1	28	0	0	1	28
01:30 PM	1	27	0	0	1	26
02:00 PM	1	29	1	1	0	25
02:30 PM	0	28	1	1	0	25
06:00 PM	0	25	1	1	0	25
06:30 PM	1	25	1	1	0	24
07:00 PM	1	25	1	1	0	24
07:30 PM	1	25	1	1	0	23
08:00 PM	1	24	1	1	0	22
08:30 PM	0	24	1	1	0	22
09:00 PM	0	22	1	1	0	20

Tabla 4.3: Convenciones de la Tabla 4.2.

VA	Ventana Abierta
AA	Aire Acondicionado
TE	Tubos enterrados
Tamb	Temperatura Ambiente
Tint	Temperatura Interior

4.1. INTERFAZ GRÁFICA EN LABVIEW

LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) es un lenguaje de programación gráfico para el diseño de sistemas de adquisición de datos, instrumentación y control. Permite diseñar interfaces de usuario mediante una consola interactiva a partir del sistema funcional, el diagrama de bloques o una notación de diseño de ingeniería. LabVIEW es compatible con herramientas de desarrollo similares y puede trabajar con programas de otra área de aplicación. Tiene la ventaja de que permite una fácil integración con hardware, específicamente con tarjetas de medición, adquisición y procesamiento de datos (incluyendo adquisición de imágenes).

Cuando se diseñan programas con LabVIEW se está trabajando siempre bajo algo denominado VI, es decir, un instrumento virtual. Los VI's se caracterizan por: ser un cuadrado con su respectivo símbolo relacionado con su funcionalidad, tener una interfaz con el usuario, tener entradas con su color de identificación de dato, tener una o varias salidas y por su puesto ser reutilizables.

En la Figura 4.3 se muestra la visualización de cada uno de los sensores y actuadores necesarios para la supervisión del control de todo el sistema de ventilación. Se dispondrá de tres sensores de temperatura los cuales se distribuyen para medir la temperatura ambiente exterior, la temperatura en la pared de los tubos y la temperatura del recinto, los cuales emplearán transmisores que en configuraciones de la salida entre 4-20 mA, entregarán los datos de medición a la interfaz.



Figura 4.3: Pestaña de animaciones del sistema de ventilación natural forzada.

Por otro lado, se podrá visualizar también el nivel de CO_2 presente en el aire, la velocidad del aire al interior de los tubos, el caudal de aire que ingresa al recinto y el porcentaje de humedad relativa. Este último parámetro juega un papel muy importante en el confort térmico debido a que un exceso de humedad en el ambiente puede provocar cansancio, estrés y un decaimiento de la calidad del trabajo y/o nivel de estudio.

En la Figura 4.4, nombrada como “buscador de archivos”, se configuran dos espacios que están relacionados con el envío de datos TCP/IP, los cuales corresponden al número de puerto de el módulo envío de datos y la dirección IP. No obstante, esta interfaz permite almacenar los datos de temperatura en un archivo .txt, con el fin de tener registros del comportamiento térmico del sistema y a su vez el registro de las temperaturas máxima y mínima durante su operación.

En la Figura 4.5 correspondiente a “bosquejo”, se muestra una presentación introductoria para la interfaz, ahí se encuentran los nombres de los participantes, un dibujo ilustrativo y el título de la interfaz.

En la Figura 4.6 se presenta el esquema de la estructura que controla el sistema, la cual se basa en el uso de “Case Structure”, donde cada una depende de una señal verdadera o falsa para activar el funcionamiento de los actuadores. Esas señales provienen de los detectores

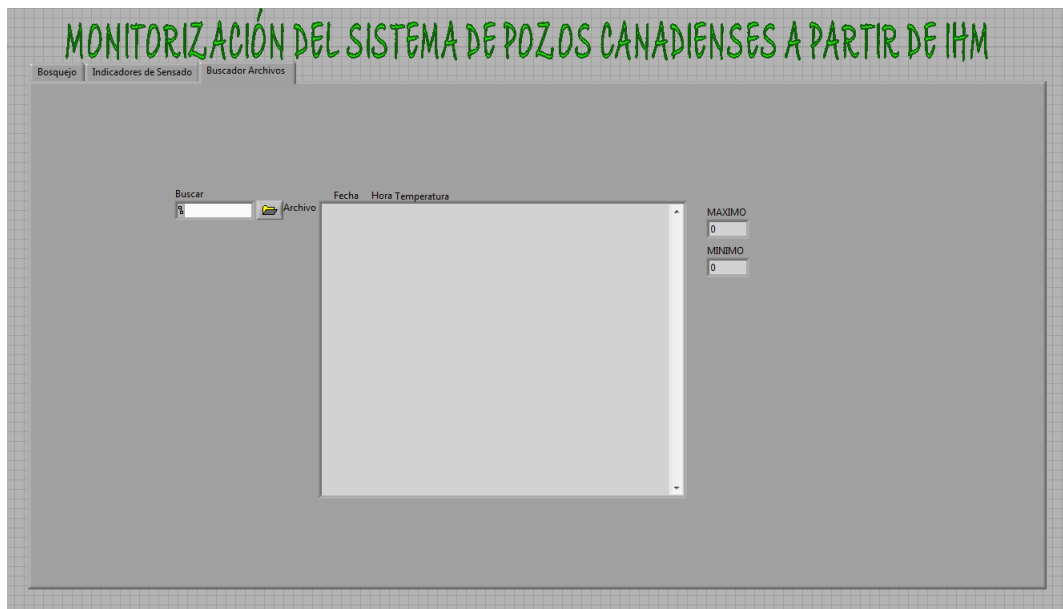


Figura 4.4: Pestaña buscador de archivos.



Figura 4.5: Pestaña bosquejo del sistema.

que para activación de esos *Case* es necesario una o más señales y aplicarlas a una compuerta lógica con el fin de seguir el algoritmo de control.

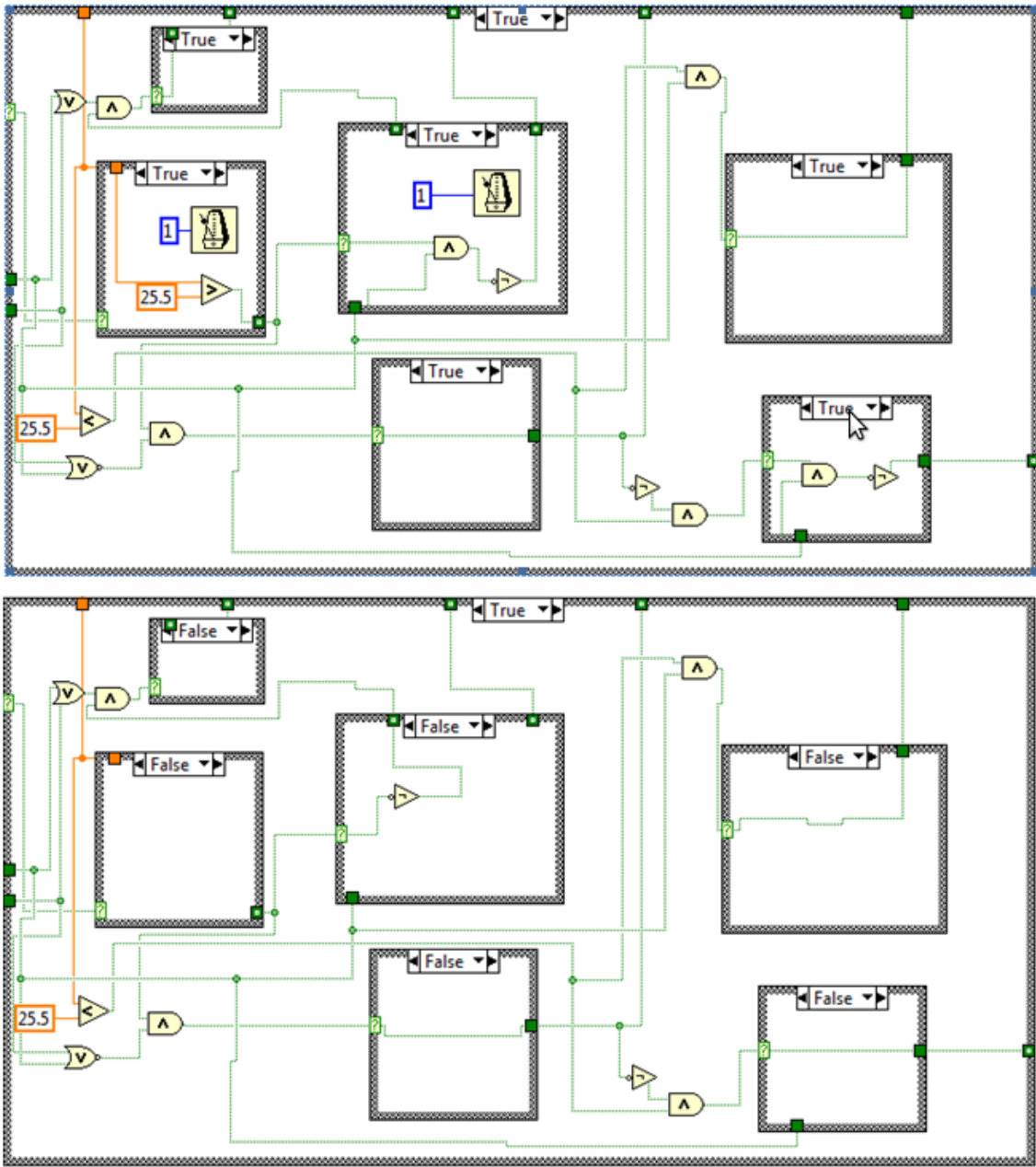


Figura 4.6: Estructura de control.

4.2. ENVÍO DE DATOS TCP

Para la verificación de la recepción de datos y del funcionamiento automático de esta interfaz, se diseñó una secuencia donde se generan señales que simulan temperaturas, nivel de CO₂, velocidad y caudal de aire y a su vez son enviadas por comunicación TCP como lo muestra la Figura 4.7.

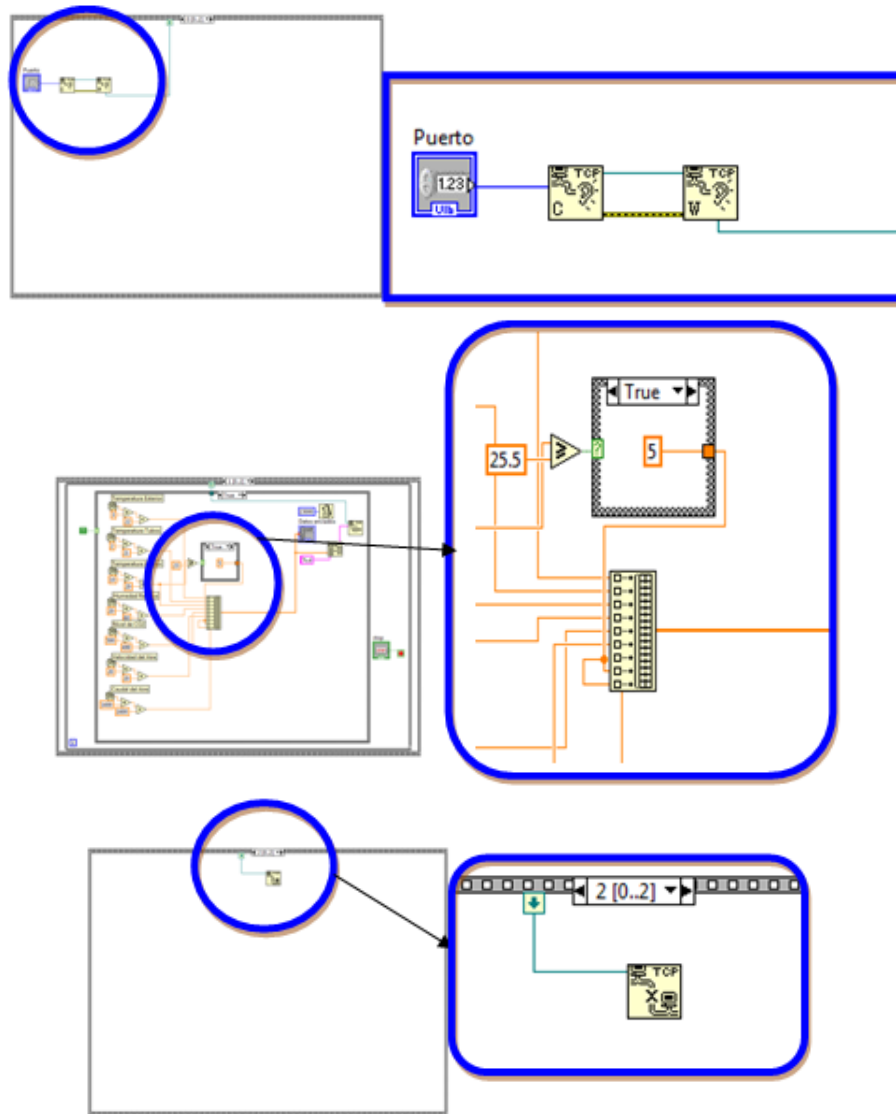


Figura 4.7: Envío de datos TCP.

En la Figura 4.8 se muestra el diagrama de flujo del algoritmo utilizado para realizar la interfaz.

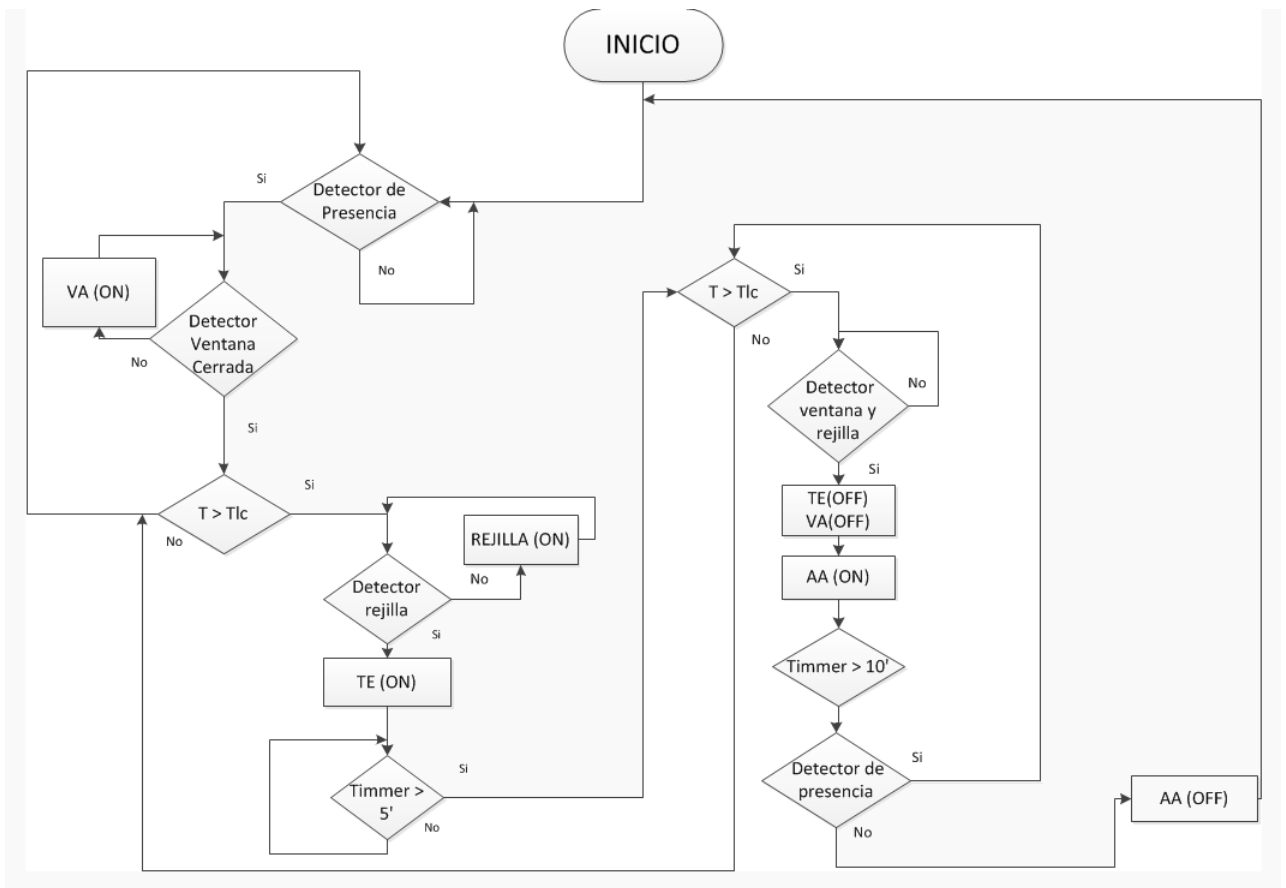


Figura 4.8: Algoritmo de control del sistema de automatización para el confort térmico.

5

RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este capítulo se exponen los resultados obtenidos con la realización de este proyecto; así como conclusiones y algunas recomendaciones para complementar, mejorar o ampliar sus alcances, enfocados en la posibilidad de implementación de este sistema en otros edificios de la ciudad de Bucaramanga.

5.1. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Esta sección lista por capítulo las conclusiones y los resultados relevantes de este proyecto,

5.1.1. Dimensionamiento del ducto (Capítulo 1)

Para el diseño de la automatización y control de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados, fueron establecidas las variables a partir del análisis de un intercambiador tierra-aire, adaptando las mediciones y variables al comportamiento climático de Bucaramanga.

Se estableció que para cumplir con el requerimiento de 6 renovaciones por hora y una temperatura límite de confort de 25,5 [°C] en un área de 250m², es necesario la instalación de 10 tramos de 45m de tubería cada uno, con un diámetro de tubería de 6" y longitud de cada tubo de 6m, haciendo de esta una instalación de poca robustez para su construcción y para el espacio que debe ocupar dentro del área planeada para la construcción del Edificio Eléctrica II.

Para esto fue necesario el análisis de distintos parámetros relacionados con la inercia térmica del suelo, y otros parámetros físicos que fueron necesarios para la adecuación de un

modelo que estableciera el comportamiento térmico del suelo en la Universidad Industrial de Santander. No obstante, se realizaron mediciones de temperatura del suelo a 3m, 2m y 1m con distintos dispositivos estableciendo que la RTD presentaba la mayor confiabilidad con el fin de estimar la temperatura del tubo a la profundidad de instalación de 3m, por donde se hará circular el aire para su posterior enfriamiento.

Es de destacar, que para la toma de aire en la futura edificación se construirán bancas que serán de utilidad para la captación de aire, lo cual ayuda en el sector de seguridad física del sistema y en el parámetro de la temperatura del aire a la entrada de los tubos; es decir, que este espacio bajo sombra contribuyó en la reducción de aproximadamente 3°C en la temperatura del aire a la entrada principal de los tubos.

5.1.2. Evaluación y análisis de los protocolos mediante la metodología AHP (Capítulo 2)

Se realizó un análisis comparativo de diez de los protocolos que han sido utilizados en la parte de automatización y control de sistemas como lo son: MODBUS/TCP, LONWORKS, TCP/IP, KNX, PROFIBUS, BACnet, CEBus, X-10, ZIGBEE y OPC. Con respecto a estas comparaciones se dio un porcentaje específico para generar la tabla matriz, a través de la numeración que presenta la Tabla Saaty expuesta en el Anexo J. La valoración se realizó de acuerdo a 4 parámetros de criterio de selección: versatilidad y adaptabilidad, facilidad y accesibilidad, costo y características técnicas de cada uno de los protocolos presentados en la Tabla J.9.

La metodología AHP se expone en la Tabla J.10 y como resultado el protocolo que brinda mejores prestaciones para el sistema de automatización del Edificio de Eléctrica II, es el protocolo MODBUS, debido a que es un protocolo de bajo costo y es de estándar abierto lo que permite ser usado para comunicar con una gran base instalada de dispositivos MODBUS, usando productos de conversión los cuales no requieren configuración, entre otras características nombradas en el Capítulo 2.

Un protocolo de comunicación debe ser escogido teniendo en cuenta los servicios que va a ofrecer el protocolo y la hipótesis acerca del medio donde se ejecutará el protocolo. Teniendo en cuenta que es para un edificio inmóvil, se hace fundamental obtener un protocolo de comunicación que tenga fácil versatilidad y adaptabilidad para todos los sistemas con que contara el Edificio de Eléctrica II: seguridad, iluminación, generación de energía y ventilación. El protocolo de comunicación debe ser estándar debido a que se necesita una gran variedad en cuanto a dispositivos para abordar todos los sistemas implementados en el Edificio de Eléctrica II.

5.1.3. Componentes básicos del sistema inmótico del sistema de ventilación natural forzada (capítulo 3)

La selección de los dispositivos para el sistema inmótico depende directamente de los controladores o unidad control seleccionada, por criterios de compatibilidad de protocolos y tecnologías. En la selección de los dispositivos del sistema de ventilación natural forzado se tuvo en cuenta el dimensionamiento y las características técnicas del sistema obtenidas en el Capítulo 1, ya que dicha información constituye la base para ejecutar una selección adecuada de los mismos. Los dispositivos para la automatización y control del sistema de ventilación natural forzado son sensores analógicos y actuadores on-off, para evitar el manejo redes independientes para cada subsistema; esto con el fin de disminuir costos. En el presente diseño se estableció un grado de automatización básico que podría ser incrementado mediante el empleo de equipos y dispositivos adicionales que el mercado de la automatización ofrece para dicho propósito.

5.1.4. Algoritmo de Control (Capítulo 4)

Se diseñó un algoritmo de control que no dependiera de la hora de actividad del recinto a causa de la posible variedad de actividad dentro del mismo y con el fin de simplificar el control y la automatización teniendo en cuenta que la implementación del sistema de ventilación natural forzado tiene como uno de sus objetivos la reducción en el aspecto financiero.

No obstante, es un control ON/OFF que maneja todos sus sensores con señales analógicas que para un área de recinto de $250m^2$ sería dispendioso trabajar con dispositivos digitales y de esta forma tener que seleccionar un protocolo de comunicaciones que trabaje con señales inalámbricas y se vean afectadas por ruido generado por motores, generadores eléctricos entre otros equipos que se manejan por ejemplo en un laboratorio de alta tensión.

Un sistema de control y automatización debe buscar simplicidad en su diseño contribuyendo a reducir el uso de recursos de software y hardware lo que da un punto significativo en el análisis financiero del desarrollo de un proyecto de obra bioclimática que busca el aprovechamiento de energías renovables fomentando el cuidado de los recursos naturales.

5.1.5. IHM-INTERFAZ HOMBRE MÁQUINA (Capítulo 4)

Se realizó una interfaz que permite la monitorización de temperatura ambiente del recinto, temperatura al exterior del edificio, temperatura en de la tierra en la proximidad de la pared de los tubos, humedad relativa, nivel de CO₂, velocidad y caudal de aire al interior de la tubería con el objetivo de identificar el correcto funcionamiento o no del sistema de ventilación natural forzado.

Una IHM hace que el trabajo del operario sea más eficiente, pues con esta interfaz el operador sabe lo que está sucediendo en tiempo real en el edificio, lo cual permitirá tomar

decisiones preventivas y/o correctivas. Además debe ser sencilla, intuitiva y amigable para que el usuario pueda utilizarla desde el primer momento sin ningún problema.

Esta interfaz también presenta a manera de animación el comportamiento dinámico del sistema donde se puede apreciar la apertura y cierre de ventanas, el funcionamiento del ventilador axial del sistema de ventilación natural forzada, el funcionamiento del aire acondicionado, el accionamiento de la rejilla, lo cual hace de esta interfaz un producto llamativo e ilustrativo que busca captar la atención del operario y contribuir al confort del mismo, no solo en ámbitos térmicos sino mentales.

Finalmente, esta interfaz permite almacenar un registro de la temperatura en tiempo real, establecer máximos y mínimos de temperatura y visualizar el estado de los distintos actuadores y detectores ON/OFF.

5.1.6. Carga térmica (Capítulo 1)

Con base en cálculos realizados, se logró establecer la carga térmica causada por los ocupantes del edificio y otros parámetros como el tipo de iluminación, la radiación solar, el porcentaje de área vidriada de las paredes, y otras fuentes que producen calor con su funcionamiento.

Basados en el método de Fanger, se logró calcular dicha carga térmica y establecer el volumen de aire que se debe renovar cada hora para alcanzar en los recintos del Edificio Eléctrica II un nivel de confort térmico.

Estos datos se recopilaron en una interfaz gráfica agradable al usuario, programada en *Visual Basic*, que permite configurar fácilmente todos los parámetros necesarios para realizar los cálculos correspondientes; así al final de la ejecución de la herramienta, se obtiene el valor de la carga térmica que produce un recinto del edificio expresado en kW y en BTU/h, y de esta manera se establecen las características del sistema de ventilación natural forzada, de igual manera las características que debe tener el aire acondicionado, facilitando de esta forma su selección.

5.2. RECOMENDACIONES

En esta sección se enumeran algunas recomendaciones a tener en cuenta en estudios posteriores, nuevos diseños y en la implementación de este sistema en nuevas edificaciones en Bucaramanga.

La base teórica generada y presentada en este proyecto sirve como guía para el desarrollo de futuros proyectos con características similares.

Los algoritmos y cálculos presentados en este proyecto son específicas para el diseño del sistema de ventilación natural forzada a partir de tubos enterrados para el Edificio Eléctrica

II, por este motivo se deben cambiar los datos y la configuración de interfaz, algoritmos y demás cálculos realizados, si se desea trabajar en un diseño como el presentado en este libro en otra ciudad o en condiciones climáticas distintas a las aquí planteadas.

Debido a la variación de las condiciones climáticas en Colombia, es recomendable antes de iniciar un cálculo o un análisis basado en el trabajo presentado en este libro, realizar los ajustes necesarios para adaptar estos cambios al sistema diseñado, para evitar así datos erróneos y por ende un mal funcionamiento del sistema.

Bibliografía

- [1] Miguel Ángel Moreno Barajas. El hogar digital automatización doméstica basada en tecnología ip.
- [2] B.A. Forouzan, C. Coombs, and S.C. Fegan. *Transmisión de datos y redes de comunicaciones*. McGraw-Hill, 2002.
- [3] C.A. Morillo Cerón. Diseño del sistema de automatización para un edificio inteligente. 2009.
- [4] Castro M.E Garcia N.J., Ibañez A. *Zonificación geotécnica del área metropolitana de Bucaramanga*. IX Congreso Colombiano de Geotecnia, Medellin, 2002.
- [5] F.R. Gómez. *Caracterización Dinámica de los suelos del campus de la Universidad Industrial de Santander sede Bucaramanga - Colombia*, volume 1. Universidad Industrial de Santander, Tesis - Escuela de ingeniería Civil, 1a edition, 2007.
- [6] F. Davila and C. Andres. Diseño y simulacion del sistema inmotico del hospital un canto a la vida. 2008.
- [7] <http://isa.uniovi.es/docencia/AutomEdificios/transparencias/sensores.pdf>.
- [8] J. Glaría. Sensores de humedad.
- [9] Refrigerating American Society of Heating and Inc. Air-Conditioning Engineers. *Fundamentals F09 CH01, Psicrometrics*. ASHRAE, 2009.
- [10] Jesús Soto. El método de fanger, norma une-en-iso 7730. *Tecnosostenible*, Ingeniería, 2008.
- [11] J. Hagg. Arquitectura y sustentabilidad, edificios inteligentes. *Revista Seguridad en América*, 2010.
- [12] Escuer J. Brunat, L. Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones. *Pozos provenzales y técnicas emparentadas.*, Geoconsultores técnicos y ambientales, 2008.
- [13] Inercia térmica. *Construmatica, Arquitectura, Ingeniería y Construcción*.

- [14] Valencia A. Meneses, O.A. and R.F. Gonzalez. *Diseño de un intercambiador aire-tierra para generar calefacción y climatización de edificios en Santiago*. Universidad de Chile, 2007.
- [15] Choudhury B.J. Schmugge T.J. and Mo T. A parameterization of effective soil temperature for microwave emission. *Journal of Geophysical Research*, 84:5699–5706, 1982.
- [16] *Los Bosques de Los Tropicos Humedos de America*. Bib. Orton IICA / CATIE.
- [17] M. Hermelín. *Entorno natural de 17 ciudades de Colombia*. Fondo Editorial Universidad EAFIT, 2007.
- [18] F.P. Incropera and D.P. DeWitt. *Fundamentos de transferencia de calor*. Prentice Hall, 1999.
- [19] Karl Stephan Hans Dieter Baehr. *Wärme-und Stoffübertragung (Transferencia de calor y masa)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1994.
- [20] Asociación Española de Normalización y Certificación. *CEI/IEC 751 A2: sondas industriales de resistencia termométrica de platino*. AENOR, 1998.
- [21] H.A. Garcia. *Fundamentos de ventilación mecánica*. Univ. Nacional de Colombia.
- [22] Fiberglass Colombia S.A. *Notas Técnicas No 22, Calidad del aire parte II*. División: Aislamiento, 1997.
- [23] Norma Técnica Colombiana NTC 4595. *Ingeniería Civil y Arquitectura Planeamiento y Diseño de Instalaciones y Ambientes Escolares*. 2006.
- [24] Norma Técnica Colombiana NTC 2050. *CÓDIGO ELÉCTRICO COLOMBIANO*. 2006.
- [25] total solar energy transmittance ultraviolet transmittance Glass in building Determination of light transmittance, solar direct transmittance and related glazing factors. *International Standard ISO/FDIS 9050*. 2003.
- [26] IDEAM UPME. *Atlas de radiación solar de Colombia*. Unidad de planeación minero energética UPME, con apoyo del IDEAM, 2005.
- [27] Barandica L. Asfur Ruiz O. Andres F., Guerrero Fabio G. *implementación de una red Modbus/TCP*. Grupo de investigación Percepción y sistemas inteligentes, área de investigación, comunicaciones industriales edición.
- [28] <http://automatizacion.bligoo.com/content/view/465221/Protocolos-de-comunicaciones.html>.
- [29] <http://www.emb.cl/electroindustria/articulo.mvc?xid=1223&edi=64>.

- [30] AMX Iberica. *Proyecto Residencial, Integración y Control*. <http://www.amx.com.es/pdf/ProyectoResidencial.pdf>.
- [31] EPSIG. *AUTOMATIZACIÓN INTEGRAL DE EDIFICIOS*.
- [32] <http://isdeecuador.com/index.php>.
- [33] <http://www.casadomo.com/noticiasDetalle.aspx?c=22&idm=29>.
- [34] A.B. Lopez, F.G.G. Moreno, and A.F.R. Olaya. Implementacion de una red mod-bus/tcp.
- [35] P. Moromenacho and C. Alberto. Implementación del sistema inmótico para el control de accesos en el aeropuerto de latacunga basado en la tecnología lonworks. 2011.
- [36] C.A. Fabara Dávila. Diseño y simulación del sistema inmótico del hospital un canto a la vida. 2008.
- [37] http://www.pce-instruments.com/espanol/product_info.php/info/p11302_Transductor-de-caudal-EE-575.html/XTCsid/3d9eab50487a2fd42f6fb240a46f828c.
- [38] <http://www.detectoresysensores.cl/sensordioxidocarbonomolco23010v.html>.
- [39] Refrigerating American Society of Heating and Inc. Air-Conditioning Engineers. *Fundamentals F09 CH6, Mass Transfer*. ASHRAE, 2009.
- [40] P.R. Mondelo. *Ergonomía 2*. Number v2 in Aula politécnica ETSEIB. Edicions UPC, 1999.
- [41] Jesús Soto. sensación térmica (i) - índices y parámetros del confort. *Tecnosostenible, Eficiencia Energética*, 2008.
- [42] J.A. Sobrino, N. Raissouni, and N. Kerr. *Teledetección*. Universitat de València, 2000.
- [43] *Introducción a la Física de Suelos*. Bib. Orton IICA / CATIE.
- [44] <http://www.acgih.org/home.htm>. *ACGIH American Conference of Governmental Industrial Hygienists*.
- [45] M.R.P. Velásquez and T.G. Zapata. El ruido y el diseño de un ambiente acustico. *Ind. data*, 8(2), 2005.
- [46] SEGURIDAD SOCIAL Y SALUD MINISTERIO DE TRABAJO. *Resolución Número 1792 de 1990*. 1990.
- [47] E. Yarke. *Ventilacion natural de edificios/natural Ventilation Of Buildings*. Nobuko, 2005.
- [48] Refrigerating American Society of Heating and Inc. Air-Conditioning Engineers. *Fundamentals F09 CH10, Indoor Environmental Health*. ASHRAE, 2009.

- [49] VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL MINISTERIO DE AMBIENTE. *Norma de Calidad del Aire o Nivel de Inmisión, para todo el territorio nacional en condiciones de referencia*. Resolución Número 601 del 04 de abril, 2006.
- [50] VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL MINISTERIO DE AMBIENTE. *Decreto Número 979 del 03 de abril*. 2006.

Anexo A

MODELO DE BENKERT, HEDIDT Y SCHÖLER.

La temperatura de la tierra en los límites de la pared del tubo depende del traspaso térmico de la superficie de la tierra a capas más profundas.

$$B = 2\pi \frac{k_{s}}{U_{L}} \frac{1}{\ln \left(\frac{S_{0}}{R_{0}} + \sqrt{\left(\frac{S_{0}}{R_{0}}\right)^2 - 1} \right)} \quad (\text{A.1})$$

Donde:

B = Razón de transferencia de calor, desde la superficie de la tierra al tubo y desde el flujo de aire, a la pared del tubo. [-]

k_{s} = Conductividad térmica del suelo [W/m.K].

U_{L} = Coeficiente de transferencia de calor por largo de pared del tubo, entre el aire y la pared del tubo [W/m.K].

S_{0} = Profundidad de instalación del tubo [m].

R_{0} = Radio del tubo [m].

En la Ecuación A.1, se define el parámetro B , que es simplemente una razón de transferencia de calor obtenida con las temperaturas involucradas (temperatura de la tierra a la profundidad de instalación $T_{-}(E, 0)$; temperatura de la tierra en la pared del tubo $T_{-}(E, W)$ y temperatura del aire en el interior del tubo $T_{-}(A, P)$).

Esta razón es obtenida de un balance de calor, entre el flujo de calor desde la tierra hacia la pared del tubo, o viceversa como se muestra en la siguiente ecuación:

$$2\pi \cdot \frac{k_{s}}{\ln \left(\frac{S_{0}}{R_{0}} + \sqrt{\left(\frac{S_{0}}{R_{0}}\right)^2 - 1} \right)} \cdot (T_{-}(E, 0) - T_{-}(E, W)) = U_{L} \cdot (T_{-}(E, W) - T_{-}(A, P)) \quad (\text{A.2})$$

Luego:

$$B = \frac{T_{-}(E, W) - T_{-}(A, P)}{T_{-}(E, 0) - T_{-}(E, W)} \quad (\text{A.3})$$

Donde:

$T_{-}(E, 0)$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo, no influenciada por él [°C].

$T_{-}(E, W)$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo [°C].

$T_{-}(A, P)$ = Temperatura del aire en el tubo [°C].

El valor B es ocupado como factor de corrección de la Ecuación A.4.

La temperatura de la tierra en la pared exterior del tubo, pero no influenciada por este ($T_{-}(E, 0)$), es calculada con la temperatura media ambiental (T_{-m}) y con la temperatura máxima ambiental (T_{-max}), asumiendo una variación de temperatura sinusoidal a través del año. Además es definido un parámetro adimensional (ξ), el cual describe la “profundidad térmica” del tubo. Esto se resume en la Ecuación A.4.

$$T_{-E,0}(t) = T_{-m} + (T_{-max} - T_{-m}) \cdot \exp^{-\xi} \cos(2\pi \frac{t}{t_{-0}} - \xi) \quad (A.4)$$

Donde:

$T_{-E,0}$ = Temperatura de la tierra en la pared del tubo, no influenciada por él mismo [°C].

ξ = Parámetro adimensional para la “profundidad térmica” del tubo. [-]

t = Tiempo [seg].

t_{-0} = Duración de un año [seg] (1 año $\approx 31,5 \times 10^6$).

$\frac{t}{t_{-0}}$ = Fracción de año (con $\frac{t}{t_{-0}}$ igual a cero para la máxima temperatura ambiental).

La Ecuación A.4, no es nada más que el modelo de Baehr-Stephan [19] mostrado en la Ecuación 1.2, evaluada a la profundidad del tubo. Esto considerando:

$$\xi = x \cdot m; \quad \text{Profundidad } x = S_{-0}; \quad \text{Difusividad térmica } \alpha = \frac{k_{-s}}{\rho \cdot c}$$

Donde:

$\rho \cdot c$ = Capacidad calórica volumétrica de la tierra [J/(m³K)].

ρ = Densidad de la tierra [K_{-g}/m³].

c = Calor específico de la tierra [J/(k_{-g}K)].

Con esto, la “profundidad térmica” ξ , en la cual se sitúa el intercambiador de calor aire-tierra, depende de la profundidad real en la cual se sitúa el intercambiador junto con las características térmicas de la tierra sobre él. Esto se muestra en la ecuación A.5.

$$\xi = S_{-0} \sqrt{\frac{\pi \rho c}{t_{-0} k_{-s}}} \quad (A.5)$$

A.1. TRANSFERENCIA DE CALOR EN EL INTERCAMBIADOR AIRE-TIERRA.

El coeficiente del traspaso térmico por la longitud de la pared del tubo (U_{-L}), para los tubos intercambiadores de calor de aire-tierra depende solamente del coeficiente de traspaso

térmico (h_i) en su superficie interna. En la Ecuación A.6, se aprecia cómo se define el coeficiente de traspaso térmico por longitud de la pared del tubo (U_L).

$$U_L = 2\pi R_0 h_i \quad (A.6)$$

Dónde:

h_i = Coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo [$W/m^2.K$]

El coeficiente de transferencia de calor en la superficie interna del tubo (h_i), depende de características del flujo, de las dimensiones del tubo y de las propiedades del aire en el tubo. Este coeficiente está definido por la Ecuación A.7.

$$h_i = \frac{k_A N_u}{2 \cdot R_0} \quad (A.7)$$

Dónde:

k_A = Conductividad térmica del aire en el tubo [$W/m.K$].

N_u = Número de Nusselt del aire en el tubo.

El número de Nusselt (N_u) del aire en el tubo, depende del número de Reynolds (Re) y por ende del caudal. Para la circulación de aire turbulento en la región de la relevante para los intercambiadores de calor aire-tierra, Gnielinski propone la aproximación de la Ecuación A.8

$$N_u = 0,0214(Re^{0,8} - 100)Pr^{0,4} \quad (A.8)$$

Donde:

Re = Número de Reynolds del aire en el tubo.

Pr = Número de Prandtl del aire (típicamente: $Pr = 0,72$).

A.2. Cálculo de la carga térmica para el edificio

Para una estimación realista de las cargas de refrigeración y de calefacción es requisito fundamental el estudio riguroso de las componentes de carga en el espacio que va a ser acondicionado. Es indispensable en la estimación que el estudio sea preciso y completo, no debiendo subestimarse su importancia se dara a conocer uno de las aspectos físicos a tener en cuenta.

A.2.1. Carga térmica por conducción a través de la envolvente Q_C .

La ganancia de calor por conducción parcial q_c a través de la envolvente del local es:

$$Q_C = \sum q_c \quad (A.9)$$

La sumatoria de todas las pérdidas parciales q_c por conducción a través de la envolvente produce las pérdidas totales por conducción Q_C , según la ecuación A.10:

$$q_c = K * A * (T_{exterior} - T_{interior}) \quad (A.10)$$

Donde:

K = Transmitancia térmica del cerramiento (muro, techo, piso, ventana, etc) [$W/m^2.K$].

A = Superficie del cerramiento [m^2].

$T_{exterior}$ = Temperatura exterior del cuarto [$^{\circ}C$].

$T_{interior}$ = Temperatura interior [$^{\circ}C$].

A.2.2. Carga térmica por ventilación aportado por el aire exterior Q_a .

Es necesario ventilar una parte o la totalidad del aire interior, así que se debe introducir al ambiente interior una importante masa de aire circulante y húmeda que el sistema debe acondicionar. Este aire de renovación y recirculado contiene humos, partículas en suspensión y olores que son necesarios eliminar.

$$Q_a = C_{AR} * (0,29 * (T_{exterior} - T_{interior}) + 0,72 * (HE_{exterior} - HE_{interior})) \quad (A.11)$$

Donde:

C_{AR} = Cantidad de aire a renovar [$m^3/h.pers.$].

$(T_{exterior} - T_{interior})$ = diferencia de temperatura [$^{\circ}C$].

$(HE_{exterior} - HE_{interior})$ = diferencia de humedad específica [g/kg].

Para saber la humedad específica, se utiliza la Ecuación A.12 que se presenta a continuación, utilizando los datos de la tabla de valores de la curva de tensión de vapor, presentada por la norma ASHRAE 2009 [39], la cual para una temperatura de $20^{\circ}C$ la tensión de vapor es de $2,337KPa$ y para una temperatura de $30^{\circ}C$ es de $4,242KPa$.

$$W = 0,622 * \left(\frac{\psi * P_{ws}}{P - \psi * P_{ws}} \right) \quad (A.12)$$

Donde:

ψ = tensión de vapor [bar].

P_{ws} = Humedad relativa.

P = presión atmosférica [bar].

Entonces se obtiene:

$$W_{20} = 0,622 * \left[\frac{0,02337 * 0,8307}{1,01325 - (0,02337 * 0,8307)} \right] = 0,012150058 [kg_w/kg_a] \quad (A.13)$$

$$W_{30} = 0,622 * \left[\frac{0,04242 * 0,8307}{1,01325 - (0,04242 * 0,8307)} \right] = 0,022410998 [kg_w/kg_a] \quad (A.14)$$

A.2.3. Carga térmica solar Q_S .

Cuando existen superficies de vidrio en el cuarto, una parte de los aportes se deberá a la radiación del sol que al atravesar el cristal ingresa al cuarto calentándolo. La radiación del

sol varía con cada hora del día solar y también a lo largo de los meses del año. La expresión general para el cálculo de la carga debida al sol es:

$$Q_{S} = S * I_{S} * F_{es} \quad (A.15)$$

Donde:

Q_{S} = ganancia solar [W].

S = superficie vidriada [m^2].

I_{S} = Intensidad de la radiación solar [W/m^2].

F_{es} = Factor de exposición solar del vidrio o aventanamiento (adimensional 0 a 1).

La radiación solar es una forma de energía de baja concentración, fuera de la atmósfera, la intensidad de radiación oscila entre 1300 y 1400 W/m^2 . Las pérdidas en la atmósfera por absorción, reflexión y dispersión la reducen un 30 %. Si las condiciones climatológicas son buenas se puede llegar a tener 1000 W/m^2 , aunque si las condiciones son pésimas se puede tener sólo 50 W/m^2 .

A.2.4. Carga térmica por fuentes internas Q_{O} .

El aporte interno no es despreciable, siendo la suma del calor total por personas, más el calor sensible de la iluminación artificial, más el calor sensible de los artefactos de oficina (computadoras, impresoras, fotocopiadoras, etc). El cálculo se realiza mediante la Ecuación A.16:

$$Q_{O} = Q_{personas} + Q_{iluminacion} + Q_{equipos} \quad (A.16)$$

Donde:

Q_{O} = Carga térmica por fuentes internas [W].

$Q_{personas}$ = aporte de calor interno por personas; sensible + latente [W].

$Q_{iluminacion}$ = aporte de calor interno por iluminación; sensible [W].

$Q_{equipos}$ = aporte de calor interno por equipamiento; sensible + latente [W].

Anexo B

ALGORITMOS UTILIZADOS EN EL SISTEMA DE VENTILACIÓN NATURAL FORZADA.

En este anexo se describen los algoritmos utilizados para encontrar la longitud que deben tener los tubos que se van a enterrar, con el fin de cumplir con la climatización deseada para el recinto y la carga térmica que consume el edificio, y así estimar que volumen de aire se debe renovar y que tiempo debe trabajar el sistema de ventilación natural.

B.1. ALGORITMO REALIZADO EN MATLAB

Algoritmo para realizar el trazado de las curvas correspondientes a la temperatura de la tierra respecto a la profundidad del suelo, correspondiente a la figura 1.4.

```
m=0.42583;
Tmax1=30.60;
Tm1=23.54;
Tmax2=30.70;
Tm2=22.70;
Tmax3=30.00;
Tm3=22.78;
Tmax4=28.70;
Tm4=22.17;
Tmax5=28.60;
Tm5=22.06;
t1=2678400;
t2=2592000;
t3=2678400;
t4=2592000;
t5=2678400;
to=31.5E6;
x=0:1:4*pi;
T1=Tm1+(Tmax1-Tm1).*exp(-(m.*x)).*cos((2*pi*(t1/to))-m.*x);
T2=Tm2+(Tmax2-Tm2).*exp(-(m.*x)).*cos((2*pi*(t2/to))-m.*x);
T3=Tm3+(Tmax3-Tm3).*exp(-(m.*x)).*cos((2*pi*(t3/to))-m.*x);
T4=Tm4+(Tmax4-Tm4).*exp(-(m.*x)).*cos((2*pi*(t4/to))-m.*x);
T5=Tm5+(Tmax5-Tm5).*exp(-(m.*x)).*cos((2*pi*(t5/to))-m.*x);
```

Algoritmo para encontrar la longitud que debe tener el sistema de tubos enterrados para garantizar la temperatura de aire deseada que ingresa al edificio, esto se hace mediante itera-

ciones consecutivas del algoritmo, basados en el modelo de Benkert, Hedidt y Schöler[19]

```

clear all; t=0; m1=0.42452;

Tmax=26; Tm=24.5; Pr=0.72; A=250; diam=0.25; Vol=3*A; cp=1300; Ren=6; ks=1.5; S0=3; R0=(diam)/2; p=1.412; Q=(Vol*Ren)/3600;
A_tubo=((diam/2)^2)*pi; Vel=Q/A_tubo; Re=(Vel*diam)/(1.137E-5); Nu=0.0214*((Re^0.8)-100)*((Pr)^0.4); Ul=pi*Nu*0.0214; B=2*pi*(ks/Ul)*(1/(log((S0/R0)+
1))))); m=p*Vel*A_tubo; Te0=(Tm+(Tmax-Tm)*exp(-m1*S0)*cos((2*pi*t)-m1*S0))+273 Ta0=299;

dz=6;

Tap_in=Ta0; iter=1; Tew=(B*Te0+Tap_in)/(B+1); Qw=dz*Ul*(Tew-Tap_in); Tap_out=(Qw/(m*cp))+Tap_in; i=1; largo=0; while
Tap_out > 298.5

Tap_in = Tap_out; Tew = (B*Te0+Tap_in)/(B+1); Qw = dz*Ul*(Tew-Tap_in); Tap_out = (Qw/(m*cp))+Tap_in; largo = (iter)*6;

T_vector(iter)=Tap_out(1); L_vector(iter)=largo(1); iter=iter+1; i=i+1; end

x=L_vector(1:iter-1); y=T_vector-273; plot(x,y,'black')

grid num.tubos=iter; clear all;

t=0;
m1=0.42452;
Tmax=26;
Tm=24.5;
Pr=0.72;
A=250;
diam=0.25;
Vol=3*A;
cp=1300;
Ren=6;
ks=1.5;
S0=3;
R0=(diam)/2;
p=1.412;
Q=(Vol*Ren)/3600;
A_tubo=((diam/2)^2)*pi;
Vel=Q/A_tubo;
Re=(Vel*diam)/(1.137E-5);
Nu=0.0214*((Re^0.8)-100)*((Pr)^0.4);
Ul=pi*Nu*0.0214;
B=2*pi*(ks/Ul)*(1/(log((S0/R0)+sqrt(((S0/R0)^2)-1)))));
m=p*Vel*A_tubo;
Te0=(Tm+(Tmax-Tm)*exp(-m1*S0)*cos((2*pi*t)-m1*S0))+273;
Ta0=299; dz=6; Tap_in=Ta0;
iter=1;
Tew=(B*Te0+Tap_in)/(B+1);
Qw=dz*Ul*(Tew-Tap_in);
Tap_out=(Qw/(m*cp))+Tap_in;
i=1;
largo=0;
while Tap_out > 298.5,
    Tap_in = Tap_out;
    Tew = (B*Te0+Tap_in)/(B+1);
    Qw = dz*Ul*(Tew-Tap_in);
    Tap_out = (Qw/(m*cp))+Tap_in;
    largo = (iter)*6;
    T_vector(iter)=Tap_out(1)
    L_vector(iter)=largo(1)
    iter=iter+1;
    i=i+1;
end
x=L_vector(1:iter-1)
y=T_vector-273
plot(x,y,'black')
grid
num.tubos=iter;

```

B.2. Código Fuente en Visual Basic 6.0 para estimación de carga térmica

Public Class Form1

```

Public w1 = 0, w2 = 0, w3 = 0, w4 = 0, nw = 0, posar = 1, posab = 1, alto, ap1 Private Sub Label1_Click(ByVal sender As
System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles largotxt.Click End Sub

Private Sub Label2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub NumericUpDown1_ValueChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles largo.ValueChanged
End Sub

Private Sub area_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub ancho_ValueChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ancho.ValueChanged
End Sub

Private Sub TextBox1_TextChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub perimetro_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub Button1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles area.Click If (Val(largo.Text) *
Val(ancho.Text)) < 1000 Then MsgBox(,El area maxima a calcular es de 1000 m2, cambie los valores") largo.Text = 10 ancho.Text = 10
Else : areaval.Text = Val(largo.Text) * Val(ancho.Text) VarG.areas = areaval.Text End If End Sub

Private Sub perimetro_Click_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles perimetro.Click If (Val(largo.Text)
* Val(ancho.Text)) < 1000 Then MsgBox(,El area maxima a calcular es de 1000
m2
, cambie los valores") largo.Text = 10 ancho.Text = 10 Else : perimetroval.Text = 2 * Val(largo.Text) + 2 * Val(ancho.Text) VarG.perimetro
= perimetroval.Text End If End Sub

Private Sub RadioButton1_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub RadioButton1_CheckedChanged_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub P3_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub P4_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) End Sub

Private Sub p1_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles p1.CheckedChanged If
p1.CheckState = 1 Then p1.Checked = True pp1.Visible = True w1 = 1 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe1 = 1 Else
p1.Checked = False pp1.Visible = False w1 = 0 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe1 = 0 End If End Sub

Private Sub p2_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles p2.CheckedChanged If
p2.CheckState = 1 Then p2.Checked = True pp2.Visible = True w2 = 1 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe2 = 1 Else
p2.Checked = False pp2.Visible = False w2 = 0 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe2 = 0 End If End Sub

Private Sub p3_CheckedChanged_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles p3.CheckedChanged
If p3.CheckState = 1 Then p3.Checked = True pp3.Visible = True w3 = 1 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe3 = 1 Else
p3.Checked = False pp3.Visible = False w3 = 0 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe3 = 0 End If End Sub

Private Sub p4_CheckedChanged_1(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles p4.CheckedChanged
If p4.CheckState = 1 Then p4.Checked = True pp4.Visible = True w4 = 1 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe4 = 1 Else
p4.Checked = False pp4.Visible = False w4 = 0 nw = w1 + w2 + w3 + w4 nparedes.Text = nw VarG.pe4 = 0 End If End Sub

Private Sub Label5_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles Label5.Click End Sub

Private Sub nparedes_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles nparedes.Click End Sub

Private Sub RadioButton1_CheckedChanged_2(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioBut-
ton1.CheckedChanged If RadioButton1.Checked = True Then posar = 1 End If End Sub

Private Sub RadioButton2_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioBut-
ton2.CheckedChanged If RadioButton2.Checked = True Then posar = 2 End If End Sub

Private Sub RadioButton3_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioBut-
ton3.CheckedChanged If RadioButton3.Checked = True Then posar = 3 End If End Sub

Private Sub RadioButton4_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioBut-
ton4.CheckedChanged If RadioButton4.Checked = True Then posab = 1 End If End Sub

Private Sub RadioButton5_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioBut-
ton5.CheckedChanged If RadioButton5.Checked = True Then posab = 2 End If End Sub

Private Sub RadioButton6_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles RadioBut-
ton6.CheckedChanged If RadioButton5.Checked = True Then posab = 3 End If End Sub

```

```

Private Sub sig1_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles sig1.Click VarG.ap1 = largo.Text
* VarG.alto VarG.ap2 = ancho.Text * VarG.alto VarG.ap3 = largo.Text * VarG.alto VarG.ap4 = ancho.Text * VarG.alto MsgBox(resultado
("& VarG.ap1 & ") y ("& VarG.ap2 & ")("& VarG.ap3 & ")("& VarG.ap4 & ")") Dim f2 As New Form2 f2.Show() Me.Hide() End Sub
End Class Public Class VarG Public Shared alto = 3, kmuro = 1.2, kvidrio = 5.2, tex = 33, tin = 20, hr = 83.07 Public Shared kpers =
140.634, kpc = 300.15625, kimp = 150, kip = 30, ren = 0.6 Public Shared w1 = 0, w2 = 0, w3 = 0, w4 = 0, nw = 0, posar = 1, car, dt Public
Shared posab = 1, ap1, ap2, ap3, ap4, areat, perimetro, qs Public Shared av1, av2, av3, av4, qc1, qc2, qc3, qc4, qc, w20, w30, qa Public
Shared psi20 = 0.02337, psi30 = 0.04242, fes = 0.85, irs = 187.5571 Public Shared pe1, pe2, pe3, pe4, qcv, qpers, qo, qil End Class

```

```
Public Class Form2
```

```

Public clk = 0, dw, qs1, qs2, qs3, qs4, npers Private Sub ventana_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs)
Handles ventana.Click clk = clk + 1 If clk > 4 Then clk = 0 End If If clk = 1 Then a1.Visible = False a2.Visible = True a3.Visible = False
a4.Visible = False vp1.Text = Val(b1.Text) ElseIf clk = 2 Then a1.Visible = False a2.Visible = False a3.Visible = True a4.Visible =
False vp2.Text = Val(b1.Text) ElseIf clk = 3 Then a1.Visible = False a2.Visible = False a3.Visible = True a4.Visible = True vp3.Text =
Val(b1.Text) ElseIf clk = 4 Then a1.Visible = True a2.Visible = False a3.Visible = False a4.Visible = False vp4.Text = Val(b1.Text) End If
End Sub

```

```

Private Sub sig2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles sig2.Click VarG.dt = VarG.tex -
VarG.tin VarG.av1 = VarG.ap1 * (vp1.Text / 100) VarG.av2 = VarG.ap2 * (vp2.Text / 100) VarG.av3 = VarG.ap3 * (vp3.Text / 100)
VarG.av4 = VarG.ap4 * (vp4.Text / 100) VarG.ap1 = VarG.ap1 - VarG.av1 VarG.ap2 = VarG.ap2 - VarG.av2 VarG.ap3 = VarG.ap3 -
VarG.av3 VarG.ap4 = VarG.ap4 - VarG.av4 VarG.qc1 = VarG.kmuro * VarG.ap1 * VarG.dt VarG.qc2 = VarG.kmuro * VarG.ap2 * VarG.dt
VarG.qc3 = VarG.kmuro * VarG.ap3 * VarG.dt VarG.qc4 = VarG.kmuro * VarG.ap4 * VarG.dt VarG.qc = VarG.qc1 + VarG.qc2 + VarG.qc3
+ VarG.qc4 VarG.w20 = 0.622 * ((VarG.psi20 * (VarG.hr / 100)) / (1.01325 - (VarG.psi20 * (VarG.hr / 100)))) VarG.w30 = 0.622 *
((VarG.psi30 * (VarG.hr / 100)) / (1.01325 - (VarG.psi30 * (VarG.hr / 100)))) VarG.car = VarG.reat * VarG.alto * VarG.ren dw = VarG.w30
- VarG.w20 VarG.qa = VarG.car * (0.29 * VarG.dt + 0.72 * dw) If VarG.pe1 = 0 Then VarG.qc1 = VarG.kvidrio * VarG.av1 * VarG.dt
VarG.av1 = 0 Else : VarG.qc1 = 0 End If If VarG.pe2 = 0 Then VarG.qc2 = VarG.kvidrio * VarG.av2 * VarG.dt VarG.av2 = 0 Else :
VarG.qc2 = 0 End If If VarG.pe3 = 0 Then VarG.qc3 = VarG.kvidrio * VarG.av3 * VarG.dt VarG.av3 = 0 Else : VarG.qc3 = 0 End If If
VarG.pe4 = 0 Then VarG.qc4 = VarG.kvidrio * VarG.av4 * VarG.dt VarG.av4 = 0 Else : VarG.qc4 = 0 End If VarG.qcv = VarG.qc1 +
VarG.qc2 + VarG.qc3 + VarG.qc4 qs1 = VarG.av1 * VarG.irs * VarG.fes qs2 = VarG.av2 * VarG.irs * VarG.fes qs3 = VarG.av3 * VarG.irs
* VarG.fes qs4 = VarG.av4 * VarG.irs * VarG.fes VarG.qs = qs1 + qs2 + qs3 + qs4 npers = npersonas.Text VarG.qpers = VarG.kpers *
npers 'MsgBox(resultado ("& qs1 & ") y ("& qs2 & ")("& qs3 & ")("& qs4 & ")") 'MsgBox(resultado ("& VarG.qc1 & ") y ("& VarG.qc2
& ")("&& VarG.qc3 & ")("&& VarG.qc4 & ")") Dim f3 As New Form3 f3.Show() Me.Hide() End Sub

```

```

Private Sub RadioButton6_CheckedChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles so.CheckedChanged
End Sub

```

```

Private Sub ant2_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ant2.Click Dim f1 As New Form1
f1.Show() Me.Hide() End Sub End Class

```

```
Public Class Form3
```

```
Public qpc, qimp, qip, qot Dim valreskw As Double Dim valresbtu As Double
```

```

Private Sub ant3_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ant3.Click Dim f2 As New Form2
f2.Show() Me.Hide() End Sub

```

```

Private Sub calcular_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles calcular.Click qpc = pc.Text *
VarG.kpc qimp = imp.Text * VarG.kimp qip = ip.Text * VarG.kip qot = ot.Text VarG.qo = VarG.qpers + qpc + qimp + qip + qot MsgBox(-
resultado ("& VarG.qo & ")("&& VarG.qpers & ")("&& qpc & ")("&& qimp & ")("&& qip & ")("&& qot & ")") valreskw = (VarG.qc + VarG.qcv
+ VarG.qa + VarG.qs + VarG.qil + VarG.qo) / 1000 reskw.Text = valreskw & "KW" valresbtu = Val(reskw.Text) * 3398.23 resbtu.Text =
valresbtu & "BTU/h" MsgBox(resultado ("& reskw.Text & ") y ("& resbtu.Text & ") ("& VarG.qc3 & ") ("& VarG.qc4 & ")") End Sub

```

```
Private Sub reskw_Click(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles reskw.Click End Sub
```

```
Private Sub Form3_Load(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles MyBase.Load End Sub
```

```

Private Sub ot_ValueChanged(ByVal sender As System.Object, ByVal e As System.EventArgs) Handles ot.ValueChanged End Sub
End Class

```

Anexo C

MEDICIONES DE LA TEMPERATURA DEL SUELO A 3m DE PROFUNDIDAD

En la Tabla C.1 se muestran los resultados obtenidos de la medición de temperatura del suelo realizada con la RTD, a una profundidad de 3m.

Tabla C.1: Mediciones de temperatura del suelo tomadas a 3m de profundidad

Día	Temperatura medida a 3m de profundidad en °C		
	Septiembre	Octubre	Noviembre
1	24,8988258827	24,5210376957	24,9390818969
2	24,27796545	24,1592439586	24,871624296
3	24,0627518273	24,3686317029	24,1211732333
4	24,8845302734	24,3872803461	24,8727130067
5	24,9812677181	24,1897722679	24,8127418157
6	24,0980400816	24,4101776205	24,0973838273
7	24,0364549514	24,0886430293	24,6666241908
8	24,7643204205	24,5800114801	24,6217833755
9	24,2315134965	24,5596121211	24,0083956074
10	24,9626961388	24,1700558744	24,6670378498
11	24,1408723074	24,3419475593	24,1264111569
12	24,9225204475	24,2977686069	24,6829652558
13	24,2386930233	24,0554501641	24,9951697138
14	24,2174934352	24,2121833086	24,7732866019
15	24,9255036555	24,4637604127	24,913068705
16	24,1759739191	24,251122499	24,7143030867
17	24,1290219023	24,556615074	24,7550333616
18	24,217771061	24,6012844853	24,7170942957
19	24,2559256806	24,5123118964	24,6603327817
20	24,1113647443	24,1719028035	24,7797071599
21	24,2004583071	24,5752126867	24,0683728947
22	24,1850270025	24,1952003932	24,7595390804
23	24,2927915638	24,1156748603	24,7680140727
24	24,1333099065	24,5899911579	24,9296295031
25	24,7356465172	24,2123442712	24,7812503233
26	24,0926948501	24,0753253164	24,9811288703
27	24,2351270413	24,4641796173	24,9202631775
28	24,8143733556	24,3633555004	24,9018883307
29	24,9567612808	24,2986895815	24,7996407296
30	24,0372630324	24,1011606174	24,9222266754

Anexo D

HUMEDAD RELATIVA

La humedad relativa (HR) junto a la temperatura del aire (temperatura de bulbo). En el Anexo E seco y temperatura de bulbo húmedo), indica en un diagrama Psicrométrico las condiciones térmicas en el interior de un local.

La humedad relativa es la cantidad de vapor de agua que se halla en el aire en proporción a la máxima que podría contener (aire saturado = 100 % de humedad). Una baja HR permite la evaporación del sudor y por tanto el descenso de temperatura superficial de los ocupantes de un recinto; sin embargo, una HR muy baja puede provocar síndromes como el del edificio enfermo o la lipoatrofia semicircular¹ que durante el 2007 se produjo en ciertos edificios de alto nivel tecnológico.

D.1. DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

La representación gráfica de las combinaciones posibles de temperatura seca y humedad absoluta del aire húmedo, y su relación con otras propiedades físicas, se denomina Diagrama Psicrométrico o Ábaco de Mollier, y tiene la estructura que se observa en la Figura D.1.

¹como enfermedad poco frecuente, idiopática (sin causa conocida), cuya manifestación clínica consiste en la atrofia de una zona semicircular del tejido fino graso subcutáneo, situado sobre todo en el frente de los muslos.

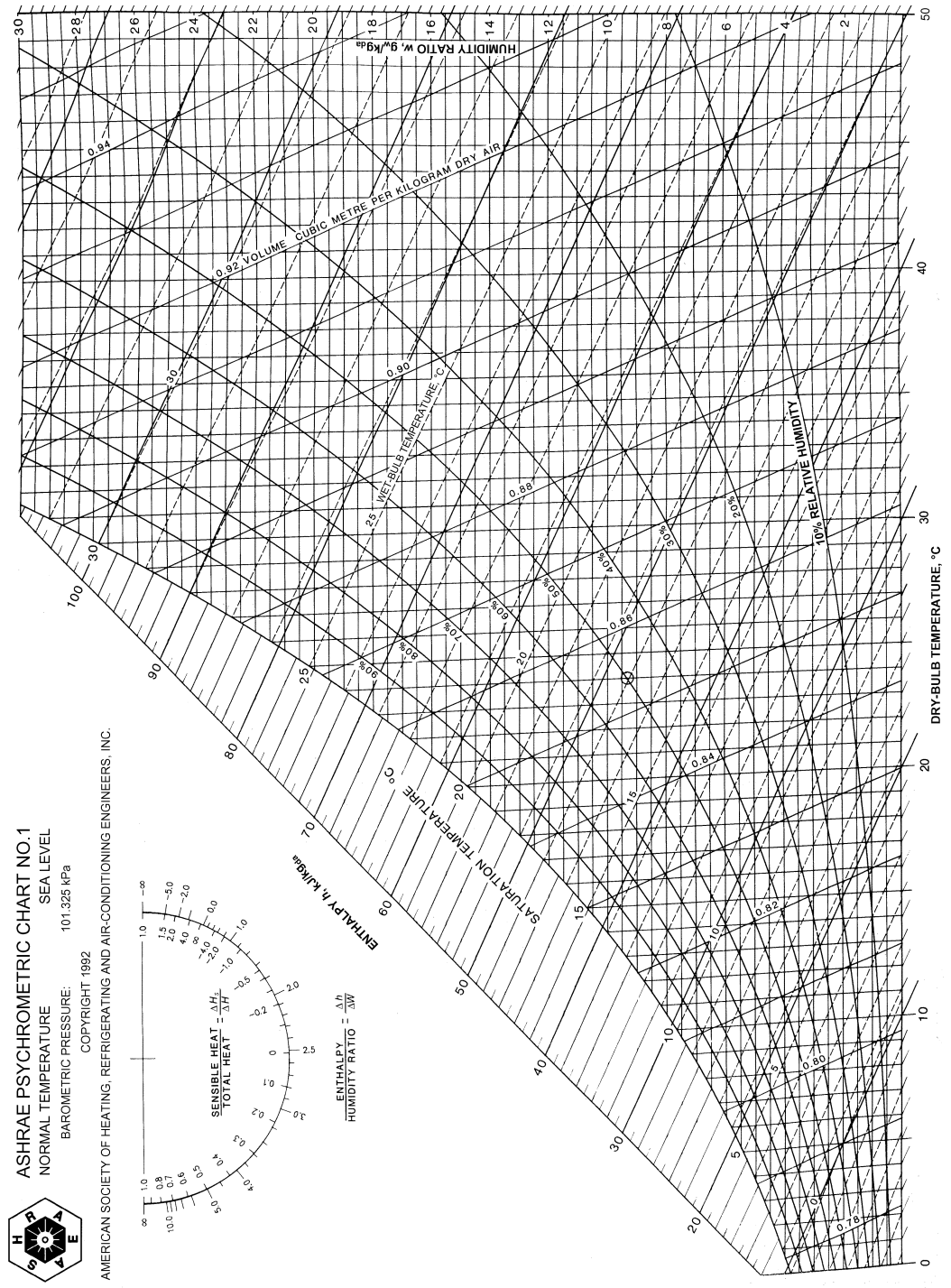


Figura D.1: Representación gráfica de la tabla Psicrométrica No.1 ASHRAE[9]

D.2. UTILIZACIÓN DEL DIAGRAMA PSICROMÉTRICO

Este diagrama aparenta ser francamente complejo, pero en la práctica se puede utilizar como una potente calculadora gráfica que permite representar y cuantificar todos los procesos físicos que se puedan producir en el aire húmedo como se puede observar a continuación:

D.2.1. TEMPERATURA DEL BULBO SECO (T_{BS})

Es la temperatura medida en un termómetro normal. La escala de temperatura del bulbo seco se observa en la figura D.2, La línea de temperatura de bulbo seco constante, es las que une la escala.

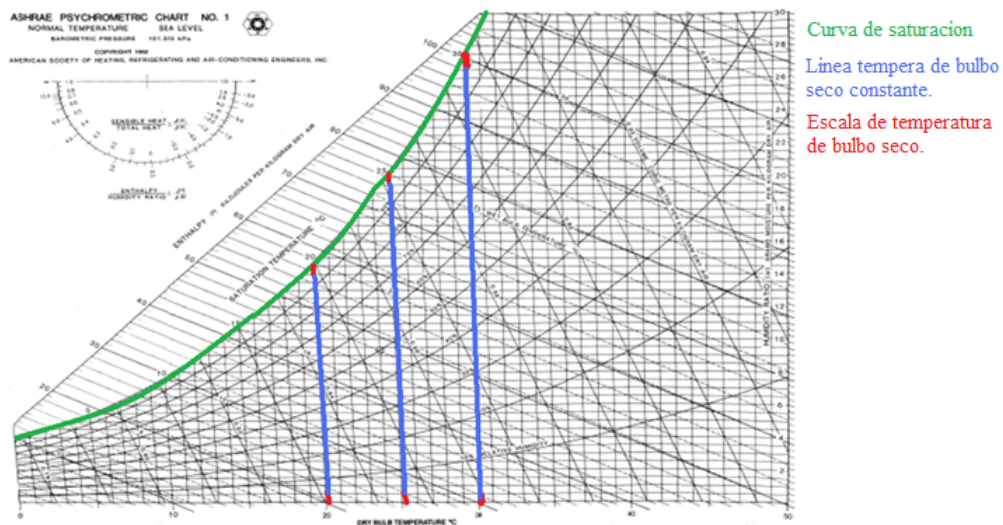


Figura D.2: Escala de temperatura bulbo seco

D.2.2. TEMPERATURA DEL BULBO HÚMEDO (T_H)

Es la temperatura medida en un termómetro normal en cuyo bulbo se ha enrollado una gasa de algodón, impregnada en agua destilada y se le expone a una corriente de aire, con una velocidad comprendida entre $2,5 \text{ m/s}$ y 5 m/s . Como se observa en la Figura D.3, la que varia es la forma de medición, se mide en el cruce de esta escala con las líneas inclinadas que se salen por la parte superior del diagrama.

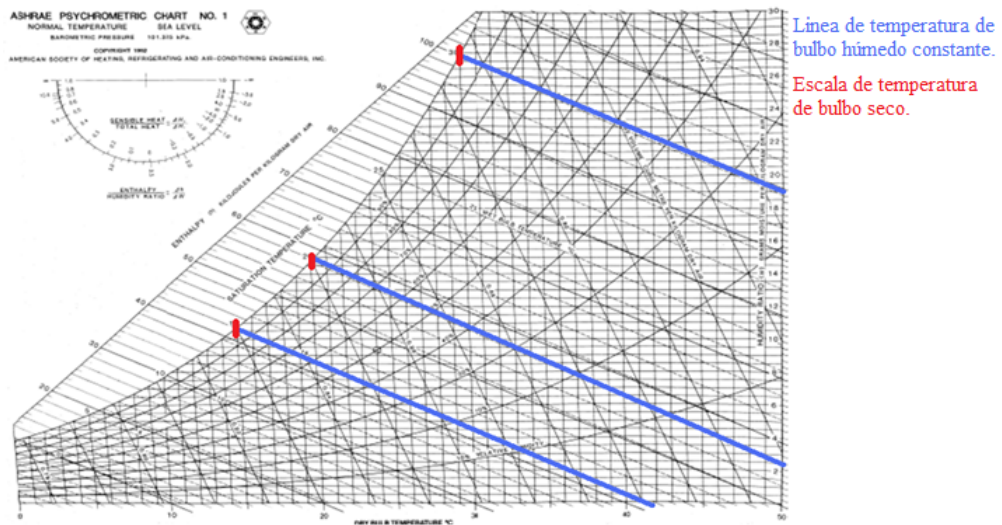


Figura D.3: Escala de temperatura bulbo húmedo

D.2.3. HUMEDAD ESPECÍFICA (W_s)

Representa la cantidad de vapor de agua contenido en un kg de aire, se mide en gramos de vapor por Kilogramos de aire seco [g_{va}/kg_{as}].

La escala húmeda específica, está situada en la parte derecha del diagrama (línea de ordenadas) de la Figura D.4.

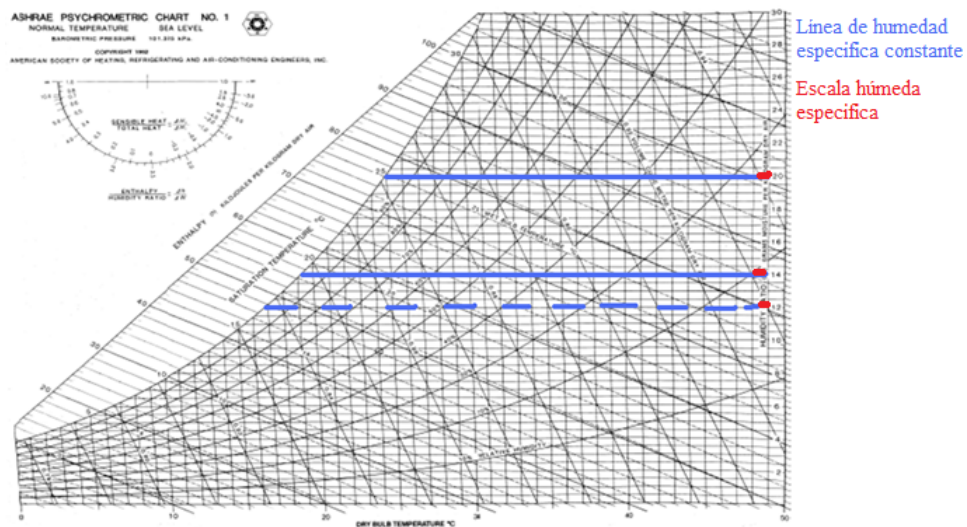


Figura D.4: Escala de humedad específica

D.2.4. HUMEDAD RELATIVA (HR)

Representa la cantidad de vapor de agua contenida en el aire en unas condiciones dadas, respecto a la máxima humedad específica que pudiera contener, para esa misma temperatura seca.

$$HR = \frac{W_{-s}}{W_{-max}} \times 100 \quad (D.1)$$

Donde:

W_{-s} = Humedad específica.

W_{-max} = Humedad específica máxima a una temperatura seca determinada.

En el diagrama psicrométrico no existe escala de humedad relativa, solo existe dentro del mismo, unas curvas de tipo logarítmico, con los valores de 10 en 10 por ciento, correspondiendo el 100 % de humedad relativa a la curva de saturación tal como se observa en la Figura D.5.

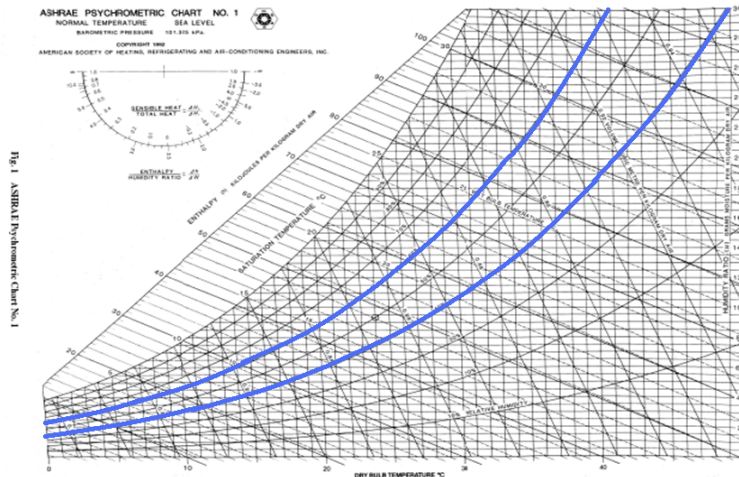


Figura D.5: Escala humedad relativa

D.2.5. TEMPERATURA DE PUNTO DE ROCÍO (TR)

Se denomina temperatura de punto de rocío, a la temperatura a la cual se debe enfriar el aire, para que se produzca la condensación del vapor de agua contenido en el mismo. Las líneas de temperaturas de rocío son las mismas que la humedad específica, pero la escala es la de temperatura seca que se encuentra en la curva de saturación mostrada en la Figura D.6.

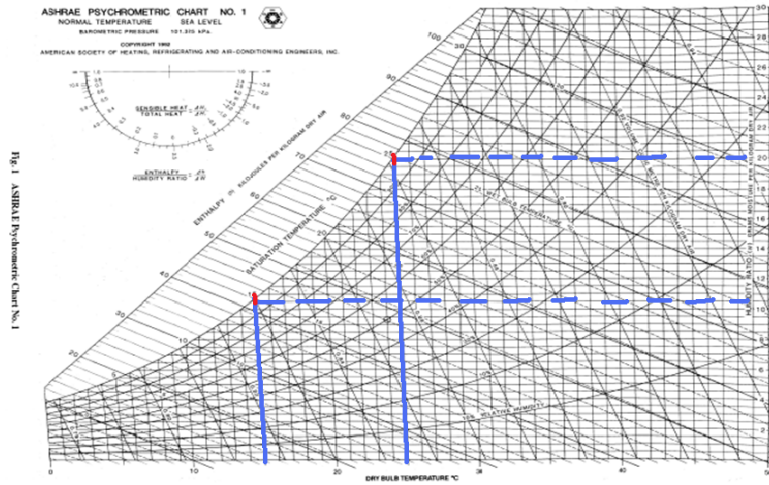


Figura D.6: Escala temperatura de rocío

D.2.6. ENTALPÍA (i)

Representa el calor total contenido en el aire, que depende de la temperatura del mismo y de la cantidad de humedad que contenga. Las líneas de entalpía constante son las mismas que las de temperatura de bulbo húmedo y la escala de medidas esta situada fuera del diagrama, en la parte superior del mismo, como lo muestra la Figura D.7.

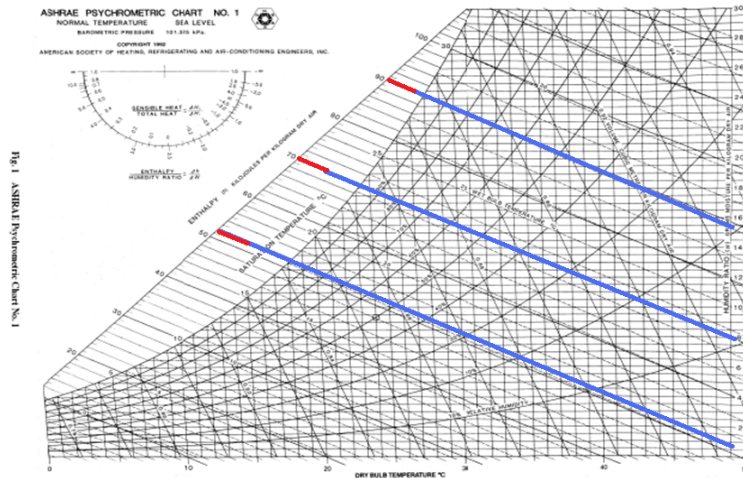


Figura D.7: Escala de entalpía

D.2.7. VOLUMEN ESPECÍFICO (V_e)

Representa el volumen ocupado por un kg de aire que se encuentra en unas condiciones determinadas, se mide en m^3/kg , no existe escala de volumen específico, existen unas líneas

de referencia paralelas como se observa en la Figura D.8, las de mayor inclinación, que salen por la parte inferior (por abajo) y que están valoradas a saltos de $+0,025 \text{ m}^3/\text{kg}$. La ultima vale $0,9 \text{ m}^3/\text{kg}$.

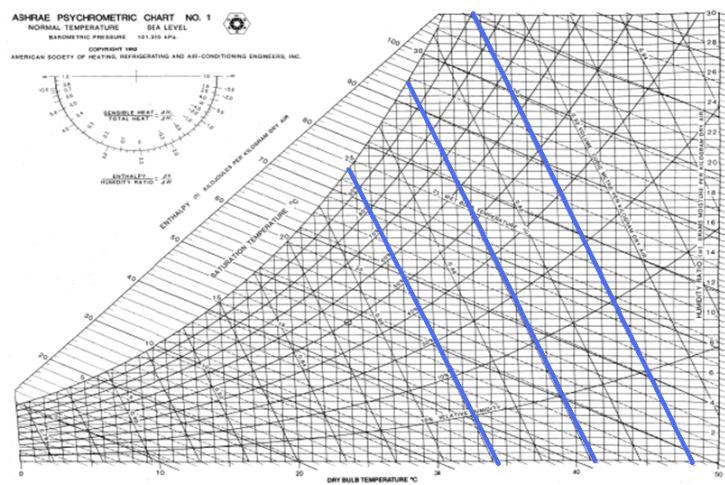


Figura D.8: Escala de volumen específico

Anexo E

EL MÉTODO DE FANGER. NORMA UNE-EN ISO 7730

Los desarrollos ofrecidos por Fanger se basan en un muestreo sobre 1300 sujetos, y demuestran que el mejor resultado posible conlleva la insatisfacción del 5 % del grupo, es decir, es imposible conseguir unas condiciones ideales en el mismo recinto para la totalidad de las personas[10].

Para cuantificar todo esto, Fanger establece un índice de valoración medio denominado “Voto Medio Estimado” (PMV), el cual refleja la opinión de un grupo numeroso de personas sobre su sensación térmica, valorada según una escala con los 7 niveles mostrados en la Tabla E.2.

El PMV que manifiesta un grupo de personas puede expresarse mediante la siguiente ecuación:

$$PMV = t_{s} \cdot (M - W - E_{d} - E - E_{res} - C_{res} - R - C) \quad (E.1)$$

Donde:

t_{s} = Coeficiente de transferencia de sensación térmica = $0,303 \cdot e^{-0,036M} + 0,028m^2/W$

W = Energía metabólica producida por el organismo W/m^2 .

M = Trabajo mecánico externo W/m^2 .

E_{d} = Pérdida de calor por difusión de agua por la piel = $3,05x10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W)p_{a}]W/m^2$.

E = Pérdida de calor por evaporación del sudor = $0,42 \cdot [(M - W) - 58,15]W/m^2$.

E_{res} = Pérdida de calor latente por respiración = $1,7x10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_{a})W/m^2$

C_{res} = Pérdida de calor sensible por respiración = $0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_{a})W/m^2$

R = Pérdida de calor por radiación = $3,96x10^{-8} \cdot f_{clo} \cdot [(t_{clo} + 273)^4 - (TRM + 273)^4]W/m^2$

C = Pérdida de calor por convección = $f_{clo} \cdot h_{c} \cdot (t_{clo} - t_{a})W/m^2$

reemplazando todos estos parámetros a la ecuación inicial, se obtiene:

$$\begin{aligned}
PMV = & (0,303 e^{-0,036M} + 0,028)[(M - W) - 3,05 * 10^{-3}[5733 - 6,99(M - W) - p_a] - \\
& 0,42[(M - W) - 58,15] - 1,7 * 10^{-5}M(5867 - p_a) - \\
& 0,0014M(34 - t_a) - 3,96 * 10^{-8} \\
& f_{clo}[(t_{clo} + 273)^4 - (TRM + 273)^4] - \\
& f_{clo} h_c(t_{clo} - t_a)]
\end{aligned}
\tag{E.2}$$

Donde:

PMV = índice de valoración medio o voto medio estimado

M = producción de energía metabólica [W/m^2]

W = trabajo externo, nulo en la mayoría de los casos [W/m^2]

I_{clo} = resistencia térmica de la ropa [clo]

f_{clo} = relación entre el área del cuerpo vestido y el área del cuerpo desnudo [%]

t_a = temperatura del aire [$^{\circ}C$]

TRM = temperatura radiante media [$^{\circ}C$]

var = velocidad relativa del aire (relativa al cuerpo humano) [m/seg]

p_a = presión parcial del vapor de agua [Pa]

h_c = coeficiente de convección [$W/(m^2.K)$]

t_{clo} = temperatura superficial de la ropa [$^{\circ}C$]

La manera de obtener estos parámetros se describe a continuación:

Temperatura superficial de la ropa.

$$t_{clo} = 35,7 - 0,028(M - W) - 0,155I_{clo}[3,96 * 10^{-8} f_{clo}(t_{clo} + 273)^4 - (TRM + 273)^4] + f_{clo} h_c(t_{clo} - t_a)
\tag{E.3}$$

Coficiente de convección

$$\begin{aligned}
h_c &= 2,38 \sqrt[4]{(t_{clo} - t_a)} & si : 2,38 \sqrt[4]{(t_{clo} - t_a)} > 12,1 \sqrt{var} \\
h_c &= 12,1 \sqrt{var} & si : 2,38 \sqrt[4]{(t_{clo} - t_a)} < 12,1 \sqrt{var}
\end{aligned}
\tag{E.4}$$

Factor de vestimenta

$$\begin{aligned}
f_{clo} &= 1,00 + 1,290 I_{clo} & si : I_{clo} < 0,5 clo \\
f_{clo} &= 1,05 + 0,645 I_{clo} & si : I_{clo} > 0,5 clo
\end{aligned}
\tag{E.5}$$

Donde las ecuaciones para t_{clo} y h_c pueden resolverse por iteraciones sucesivas.

Hay que tener en cuenta una recomendación de la norma UNE-EN ISO 7730, que limita el campo de actuación de las variables que intervienen en el uso de este método, para su correcto funcionamiento. Estas limitaciones se reflejan en los intervalos mostrados en la Tabla E.1.

Tabla E.1: Parámetros para la solución del método de Fanger

Límites recomendados s/ UNE-EN ISO 7730			
Parámetro	Unidad	Límite inferior	Límite superior
M	met	0,8	4
Iclo	Clo	0	2
ta	°C	10	30
TRM	°C	10	40
var	m/s	0	1
pa	Pa	0	2700
H.R.	%	30	70
PMW		-2	2

E.1. Porcentaje Estimado de Insatisfechos (PPD)

Como se puede apreciar anteriormente en el índice del voto medio estimado (PMV), este no es otra cosa que el valor medio de los votos emitidos por un grupo numeroso de personas expuestas al mismo ambiente. No obstante, los votos individuales presentan una dispersión alrededor de dicho valor medio, y es de gran utilidad el prever el porcentaje de personas que van a estar incómodas por frío o por calor. Esta previsión se consigue mediante el índice PPD , basado en la escala de sensación térmica. Si se incluye ahora este parámetro en la tabla E.2 de “escala de sensación térmica”, se obtiene el resultado mostrado en la Tabla E.2.

Tabla E.2: Escala de sensación térmica PMV y PPD

Escala de sensación térmica		
PMV	PPD	Sensación
3	99 %	Muy caluroso
2	77 %	Caluroso
1	26 %	Ligeramente caluroso
0	5 %	Confort (neutro)
-1	26 %	Ligeramente frío
-2	77 %	Frío
-3	99 %	Muy frío

Una vez determinado el índice PMV , se puede obtener el porcentaje estimado de personas térmicamente insatisfechas (PPD) mediante la siguiente expresión:

$$PPD = 100 - 95 e^{-(0,03353 PMV^4 + 0,2179 PMV^2)} \quad (E.6)$$

Metabolismo ligero

Sentado con comodidad: trabajo manual ligero (escritura, teclear un computador, dibujo, costura, contabilidad); trabajo con manos y brazos (pequeños útiles de mesa, inspección, ensamblaje o clasificación de materiales ligeros); trabajo de brazos y piernas (conducir un vehículo en condiciones normales, maniobrar un interruptor con el pie o con un pedal). De pie: taladradora (piezas pequeñas); fresadora (piezas pequeñas); bobinado, enrollado de

pequeños revestimientos, mecanizado con útiles de baja potencia; marcha ocasional (velocidad hasta $3,5 \text{ km/h}$).

Metabolismo moderado

Trabajo mantenido de manos y brazos (clavado de puntillas, llenado); trabajo con brazos y piernas (maniobras sobre camiones, tractores o máquinas); trabajo de brazos y tronco (trabajo con martillo neumático, acoplamiento de vehículos, enyesado, manipulación intermitente de materiales moderadamente pesados, recolección de frutos o de legumbres); empuje o tracción de carreteras ligeras o de carretillas; marcha a una velocidad de $3,5$ a $5,5 \text{ km/h}$.

Metabolismo elevado

Trabajo intenso con brazos y tronco; transporte de materiales pesados; trabajo con martillo; serrado; laminación acabadora o cincelado de madera dura; segar a mano; excavar; marcha a una velocidad de $5,5$ a 7 km/h . Empuje o tracción de carreteras o de carretillas muy cargadas, levantar las virutas de piezas moldeadas, colocación de bloques de hormigón.

Metabolismo muy elevado

Actividad muy intensa a marcha rápida cercana al máximo; trabajar con el hacha; acción de palear o de cavar intensamente; subir escaleras, una rampa o una escalera; andar rápidamente con pasos pequeños, correr, andar a una velocidad superior a 7 km/h .

Metabolismo basal. Es el consumo de energía de una persona acostada y en reposo. Representa el gasto energético necesario para mantener las funciones vegetativas (respiración, circulación, etc.). La tabla E.4 muestra su valor en función del sexo y la edad. Puede tomarse como una buena aproximación, 44 W/m^2 para los hombres y 41 W/m^2 para mujeres (corresponden aproximadamente al metabolismo basal de un hombre de $1,7$ metros de altura 70 kg de peso y 35 años de edad, y de una mujer de $1,6$ metros de altura, 60 kg de peso, y 35 años).

Tabla E.3: a) Metabolismo basal de las personas en función de la edad y sexo, b) Metabolismo para la postura corporal. Valores excluyendo el metabolismo basal

Hombres		Mujeres	
edad años	consumo W/m^2	edad años	consumo W/m^2
6	61.48	6	58.719
7	60.842	7	56.979
8	60.065	8	54.52
9	58.626	9-10	53.244
10	56.26	11	52.502
11	54.729	12	51.365
12	54.23	13	49.764
13-15	53.766	14	48.082
16	53.035	15	46.516
17	51.968	16	45.066
18	50.17	17	43.871
19	49.091	18-19	42.618
20-21	48.059	20-24	41.969
22-23	47.351	25-44	41.412
24-27	46.678	45-49	40.53
28-29	46.18	50-54	39.394
30-34	45.634	55-59	38.489
35-39	44.869	60-64	37.828
40-44	44.08	65-69	37.468
45-49	43.349		
50-54	42.607		
55-59	41.876		
60-64	41.157		
65-69	40.368		

posición del cuerpo	Metabolismo (W/m^2)
Sentado	10
arrodillado	20
agachado	20
de pie	25
de pie inclinado	30

Tabla E.4: a) Metabolismo basal de las personas en función de la edad y sexo, b) Metabolismo para la postura corporal. Valores excluyendo el metabolismo basal

Hombres		Mujeres	
edad años	consumo W/m^2	edad años	consumo W/m^2
6	61.48	6	58.719
7	60.842	7	56.979
8	60.065	8	54.52
9	58.626	9-10	53.244
10	56.26	11	52.502
11	54.729	12	51.365
12	54.23	13	49.764
13-15	53.766	14	48.082
16	53.035	15	46.516
17	51.968	16	45.066
18	50.17	17	43.871
19	49.091	18-19	42.618
20-21	48.059	20-24	41.969
22-23	47.351	25-44	41.412
24-27	46.678	45-49	40.53
28-29	46.18	50-54	39.394
30-34	45.634	55-59	38.489
35-39	44.869	60-64	37.828
40-44	44.08	65-69	37.468
45-49	43.349		
50-54	42.607		
55-59	41.876		
60-64	41.157		
65-69	40.368		

posición del cuerpo	Metabolismo (W/m^2)
Sentado	10
arrodillado	20
agachado	20
de pie	25
de pie inclinado	30

La Tabla E.4b muestra los valores correspondientes al componente postural (consumo de

energía que tiene una persona en función de su postura).

En la Tabla E.1 se observa el componente del tipo de trabajo, según la actividad que realiza la persona.

Tabla E.5: Metabolismo para distintos tipos de actividades. Valores excluyendo el metabolismo basal

Tipo de trabajo	Metabolismo (W/m^2)	
	valor medio	intervalo
Trabajo con las manos		
ligero	15	<20
medio	30	20-35
intenso	40	>35
trabajo con un brazo		
ligero	35	<45
medio	55	45-65
intenso	75	>65
Trabajo con dos brazos		
ligero	65	<75
medio	85	75-95
intenso	105	>95
Trabajo con el tronco		
ligero	125	<155
medio	190	155-230
intenso	280	230-330
muy intenso	390	>330

El uso de la Tabla E.6, figuran datos, los cuales implican multiplicar el valor del consumo metabólico, por la velocidad de desplazamiento para obtener el gasto energético correspondiente al desplazamiento.

Tabla E.6: Metabolismo del desplazamiento en función de la velocidad del mismo. Valores excluyendo el metabolismo basal

Tipo de trabajo	Metabolismo $((W/m^2)/(m/s))$
Velocidad de desplazamiento en función de la distancia Andar 2 a 5 km/h	110
Andar en subida, 2 a 5 km/h inclinación 5° Inclinación 10°	210 360
Andar en bajada, $5km/h$ Declinación 5° Declinación 10°	60 50
andar con carga en la espalda $4km/h$ carga de $10kg$ carga de $30kg$ carga de $50kg$	125 185 285
Velocidad de desplazamiento en función de la altura subir una escalera bajar una escalera	1725 480
subir una escalera de mano inclinada sin carga con carga de $10kg$ con carga de $50kg$	1660 1870 3320
subir una escalera de mano vertical sin carga con carga de $10kg$ con carga de $50kg$	2030 2335 4750

Aquí se describe con gran detalle el método Fanger, se trata seguramente del método más completo, práctico y operativo para la valoración del confort térmico en espacios interiores, y contempla todas las variables presentes en los intercambios térmicos persona-ambiente, siendo éstos, el nivel de actividad, características de la ropa, temperatura seca del aire, humedad relativa, temperatura radiante media y velocidad relativa del aire[40].

Las transferencias sensibles del cuerpo, (radiación, convección, y casualmente conducción) son menores según se eleva la temperatura (Figura E.1) Entonces, la disipación del calor metabólico, sólo se efectúa por medio de transferencias latentes, más difíciles de controlar cuanto más alta sea la humedad ambiente. Por encima de un cierto nivel de humedad, se produce un fenómeno de incomodidad fisiológica, que puede llegar a manifestarse en forma de sudor. Por lo tanto, en condiciones de intenso calor, el ambiente será más confortable, cuanto más seco sea el aire.

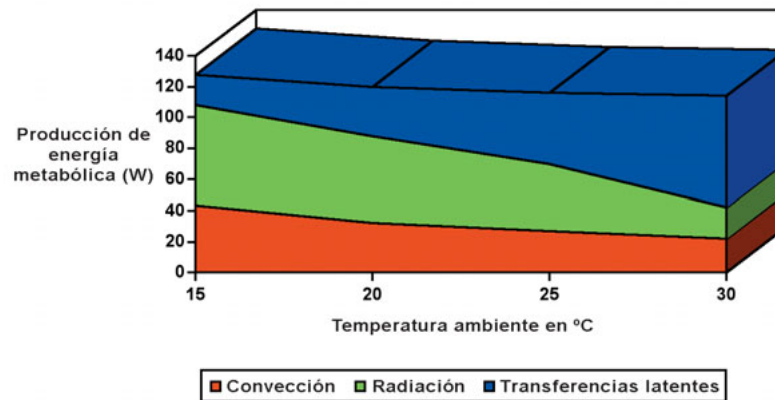


Figura E.1: Disipación de calor del cuerpo humano.

E.1.1. Aplicación del Método de Fanger

Para comenzar el cálculo de los índices de confort térmico, se supone un *valor máximo de insatisfacción del 10 %*, lo cual es un valor aceptable de personas insatisfechas respecto a un 90 % de personas que sienten confort térmico[39].

Si se aplica este valor en la Ecuación E.6, se puede observar que el valor del voto medio estimado (PMV) está en el rango de $-0,489199$ y $0,489199$. Valores tomados para los cálculos siguientes, por facilidad se va a tomar un *rango de $-0,5$ a $0,5$* para el valor del voto medio estimado, el cual corresponde a un *porcentaje de insatisfacción de 10,225 %*. En la Figura E.2 se puede observar la relación entre ambos índices:

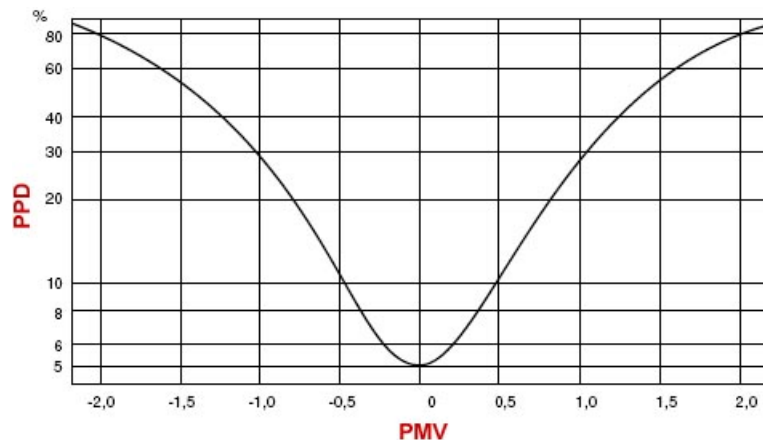


Figura E.2: Porcentaje estimado de insatisfechos y voto medio[10]

Luego de establecer estos parámetros, es necesario encontrar el valor para la energía metabólica de las personas que van a ocupar cada recinto del edificio.

La tasa metabólica mide el gasto energético muscular que experimenta una persona cuan-

do desarrolla una tarea, gran parte de dicha energía es transformada directamente en calor. Aproximadamente sólo el 25 % de la energía es aprovechada en realizar el trabajo, el resto se convierte en calor, circunstancia observada por Fanger e incluida en su análisis del confort térmico[41].

El valor de la tasa metabólica puede estimarse mediante la aplicación de los siguientes métodos, clasificados en 4 niveles según su precisión como se muestra en la Tabla E.7.

Tabla E.7: Métodos para la estimación de la tasa metabólica

NIVEL	Métodos de estimación del metabolismo
Nivel 1 TANTEO	1.A. Estimación de la tasa metabólica en función la profesión. (ISO 8996) 1.B. Estimación de la tasa metabólica en función del tipo de actividad. (ISO 8996 - ISO 7730)
Nivel 2 OBSERVACIÓN	2. A. Estimación de la tasa metabólica a partir de los componentes de la actividad (ISO 8996, INSHT- NTP 323) 2. B. Estimación de la tasa metabólica por tipo de actividad-tipo (ISO 8996, INSHT- NTP 323) .
Nivel 3 ANÁLISIS	Estimación de la tasa metabólica en función del ritmo cardíaco bajo condiciones determinadas ISO 8996.
Nivel 4 ACTUACIÓN EXPERTA	Medida del consumo de oxígeno. Método del agua doblemente marcada Calorimetría directa.

Si la tasa metabólica varía en el tiempo debe calcularse su valor medio ponderado durante la hora precedente.

Consumo metabólico según el tipo de actividad

Se puede clasificar el consumo metabólico en 5 niveles: reposo, ligero, moderado, pesado o muy pesado, en función del tipo de actividad desarrollada. Por su simplicidad es un método bastante utilizado. En la tabla E.8 se representa la mencionada clasificación por tipos de actividad.

Tabla E.8: Consumo metabólico según el tipo de actividad

Clase	W/m^2
Reposo	65
Metabolismo Ligero	100
Metabolismo Moderado	165
Metabolismo Elevado	230
Metabolismo muy Elevado	290

Si se utiliza este método para determinar el metabolismo a utilizar en este análisis, se puede tener en cuenta un valor intermedio entre metabolismo ligero y metabolismo moderado ($100 - 165W/m^2$), de acuerdo a esto, se puede establecer un valor de $165W/m^2$, aunque es una forma rápida de establecer este parámetro, es un valor aproximado pero no muy convincente.

Tabla E.9: Consumo metabólico según la profesión

Profesión	Metabolismo W/m^2	Profesión	Metabolismo W/m^2	Profesión	Metabolismo W/m^2
ARTESANOS		INDUSTRIA		IMPRENTA	
Albañil	110 a 160	SIDERÚRGICA		compositor manual	70 a 95
Carpintero	110 a 175	Obrero de alto	170 a 220	encuadernador	75 a 100
Vidriero	90 a 125	horno			
Pintor	100 a 130	Obrero de horno		AGRICULTURA	
Panadero	110 a 140	eléctrico	125 a 145	Jardinero	115 a 190
Carnicero	105 a 140	moldeador a mano	140 a 240	Conductor de Tractor	85 a 110
Relojero	55 a 70	moldeador a maquina	105 a 165		
		fundidor	140 a 240	CIRCULACIÓN	
MINERÍA		FERRETERÍA		Conductor de auto	70 a 90
empujador de		Y CERRAJERÍA		conductor de tranvía	80 a 115
vagonetas	70 a 85	Herrero forjador	90 a 200	conductor de bus	80 a 125
picador de hulla	140 a 240	soldador	75 a 125	conductor de grúa	65 a 145
obrero de horno		Tornero	75 a 125		
de coque	115 a 175	Fresador	80 a 140	OTRAS	
		Mecánico de presión	70 a 110	Profesor	85 a 100
				Vendedora	100 a 120
				Secretaria	70 a 85

Consumo metabólico según la profesión

Se obtiene el consumo metabólico a través de tablas que lo relacionan con diferentes profesiones. Hay que tener en cuenta que en los valores que figuran en dicha tabla (Tabla E.9) se incluye el metabolismo basal, que se define más adelante. El progreso tecnológico hace que la actividad física que conllevan las distintas profesiones varíe sustancialmente con el tiempo, por lo que este método puede ser muy impreciso.

Según este método, se puede considerar la profesión de profesor ($85 - 100W/m^2$), si se compara con la profesión de secretaria ($70 - 85W/m^2$), se puede calcular que un estudiante promedio de la Universidad Industrial de Santander tendría un metabolismo aproximado a los $100W/m^2$.

Consumo metabólico a partir de los componentes de la actividad

Mediante este tipo de tablas se dispone, por separado, de información sobre posturas, desplazamientos, etc., de forma que la suma del gasto energético que suponen esos componentes, que en conjunto integran la actividad, es el consumo metabólico de esa actividad. Es posiblemente el sistema más utilizado para determinar el consumo metabólico. Los términos a sumar son los siguientes:

- Metabolismo Basal.
- Componente Postural.
- Componente del tipo de trabajo.
- Componente de desplazamiento.

Metabolismo basal. Es el consumo de energía de una persona acostada y en reposo. Representa el gasto energético necesario para mantener las funciones vegetativas (respiración, circulación, etc.). La tabla E.4a, muestra su valor en función del sexo y la edad.

Puede tomarse como una buena aproximación, 44 W/m^2 para los hombres y 41 W/m^2 para mujeres (corresponden aproximadamente al metabolismo basal de un hombre de 1,7 metros de altura 70 kg de peso y 35 años de edad, y de una mujer de 1,6 metros de altura, 60 kg de peso, y 35 años).

Componente postural. Es el consumo de energía que tiene una persona en función de la postura que mantiene (de pie, sentado, etc.). La tabla E.4b muestra los valores correspondientes.

Componente del tipo de trabajo. Es el gasto energético que se produce en función del tipo de trabajo (manual, con un brazo, con el tronco, etc.) y de la intensidad de éste (ligero, moderado, pesado, etc.) (Ver tabla E.1).

Componente de desplazamiento. Se refiere al consumo de energía que supone el hecho de desplazarse, horizontal o verticalmente a una determinada velocidad. El uso de la Tabla E.6, donde figuran estos datos, implica multiplicar el valor del consumo metabólico, por la velocidad de desplazamiento.

E.1.2. Consumo metabólico de los miembros de la comunidad E3T

El cálculo del consumo metabólico medio de un estudiante de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones se puede calcular de la siguiente forma, utilizando las tablas normalizadas del método de Fanger.

Se parte del supuesto que un estudiante promedio de ingeniería esta entre los 17 y 25 años, utilizando la Tabla E.4a se puede decir que el consumo metabólico de un hombre de 17 años es de $51,968 \text{ W/m}^2$ mientras que un hombre entre 24 y 27 años tiene un consumo metabólico de $46,678 \text{ W/m}^2$.

Para una mujer de 17 años el consumo sería de $43,871 \text{ W/m}^2$ mientras que para una mujer entre 20 y 24 años el consumo metabólico sería de $41,969 \text{ W/m}^2$.

Para los cálculos de ventilación natural forzada se va a tener en cuenta el caso menos favorable, por lo cual se va a utilizar el valor de $51,968 \text{ W/m}^2$.

El componente postural para un estudiante es el 95 % del tiempo sentado, por lo cual el consumo metabólico sería de 10 W/m^2 .

El trabajo que realiza un estudiante se puede considerar como trabajo intenso con las manos el cual corresponde a un valor de 40 W/m^2 .

Como estudiante en un aula de clase el desplazamiento es prácticamente nulo, por lo cual no se va a considerar un consumo metabólico por desplazamiento.

si se realiza la suma de los componentes da un valor de $101,968 \text{ W/m}^2$, el cual podemos

considerar como el consumo promedio de un estudiante en la escuela.

Para una persona que trabaja en oficina, se pueden establecer los siguientes parámetros de consumo metabólico:

- edad promedio: 30 años ($45,634 \text{ W/m}^2$).
- Postura: Sentado, de pie (30 W/m^2).
- Trabajo ligero con dos brazos (65 W/m^2).
- Desplazamiento: Prácticamente nulo.

El consumo metabólico de una persona que trabaja en oficina es aproximado a $140,634 \text{ W/m}^2$.

Anexo F

TIPO DE MATERIAL DE LOS DUCTOS

El tubo debe satisfacer ciertas restricciones impuestas por el medio ambiente:

- Resistir la corrosión, pues estará en contacto permanente con el aire y el agua.
- Resistir el aplastamiento debido al hecho de estar enterrado, inmerso o del eventual tráfico automotriz sobre la superficie.
- Resistir ligeras deformaciones para soportar movimientos del terreno sin romperse.
- No ser poroso ni permeable para evitar cualquier tipo de contaminación.
- Resistir un tratamiento químico o térmico destinado a remediar una contaminación accidental o una contaminación del flujo aéreo debida a un agente presente en el tubo.
- Tener el interior liso para facilitar la evacuación de condensados.
- Si el tubo está compuesto por varias piezas las uniones deben de cumplir también con estas características.

Según las características mencionadas anteriormente, es recomendable el uso de los siguientes tipos de tubos para la solución planteada del sistema.

Policloruro de vinilo (PVC): es el más económico, aunque no demasiado ecológico. Puede liberar vapores nocivos debidos al modo de fabricación. No se conocen estudios a día de hoy sobre este tema en referencia a los pozos canadienses.

Polietileno (PE): Es el más ecológico, de precio equivalente al del PVC.

Polipropileno (PP): ligeramente peor conductor térmico, pero mucho más rígido que el PE, el escaso espesor del tubo de PP, permite un buen intercambio térmico al tiempo que

da una rigidez longitudinal elevada. Esto evita la creación de puntos bajos en los conductos, evitando el estancamiento de agua condensada.

Tubo estriado de protección de cables eléctricos (TPC): muy económico en pequeños diámetros. Estriado exteriormente pero liso internamente. Se pueden disponer en paralelo. Este tipo de tubo no ha sido diseñado originalmente para ser enterrado a gran profundidad, por lo que puede dañarse al cabo del tiempo. Si es muy rugoso, al formar una capa de aire entre las dos paredes, es más bien un aislante que un conductor.

Tubo de cemento o terracota: Utilizado para diámetros superiores a los 30cm. La capacidad de intercambio térmico es más importante (la conductividad del cemento es más elevada que la de los tubos de plástico, relativamente aislantes). El principal problema de este tipo de tubo (a parte de la construcción compleja), es que no garantiza una verdadera estanqueidad a no ser que se haya hecho con particular cuidado. El Radón del suelo puede por lo tanto infiltrarse en el tubo y contaminar luego el edificio.

Tubo de hierro: Su rigidez, su resistencia mecánica y su conductividad térmica elevada hacen de este material una solución muy compatible con el pozo canadiense. Hay que cuidar que el revestimiento exterior del tubo resista a la corrosión, y la utilización de juntas de elastómeros que aseguren una estanqueidad excelente de las uniones. Es un material duradero, sin embargo su precio es demasiado alto en comparación con los mencionados anteriormente.

En la Tabla F.1 se observa una comparación de las características mas relevantes de cada tipo de tubo, en este caso solo se presenta los tubos de material plástico.

Tabla F.1: Características de diferentes tubos plásticos.

Material	Densidad kg/m^3	Tracción MPa	Alargamiento a la rotura	Módulo de elasticidad MPa	Coefficiente de dilatación $^{\circ}C^{-1}$	Conductividad térmica $W/m^{\circ}C$
PE32	920	10	500	600	$2x10^{-4}$	0,42
PE50	960	20	300	1000	$2x10^{-4}$	0,32
PE-X	935	20	200	470	$2x10^{-4}$	0,38
PVC-C	1420	55	80	3600	$1x10^{-4}$	0,14
PP	910	25	500	850	$2x10^{-4}$	0,24
PB	925	16	150	350	$1x10^{-4}$	0,23

Para efectos del diseño, se puede observar que la mejor conductividad térmica la tiene el tubo de polietileno de baja densidad PE32, mientras que la mayor densidad la tiene el tubo de PVC. El menor coeficiente de dilatación lo tiene el tubo de polibutano y el de PVC. Con respecto al modulo de elasticidad, los que tienen mayor valor, son el tubo de PVC y de polibutano. Los más resistentes a la rotura, son PVC y polipropileno.

Si se considera además de estas características, el precio comparativo, se puede establecer que el tubo de PVC es el más indicado para el diseño del sistema de ventilación natural forzada.

Es necesario realizar la comparación entre el tubo de PVC y otro tipo de materiales no plásticos, con el fin de establecer que material se acomoda mejor al diseño propuesto.

Debido a los problemas de corrosión, condensación de agua dentro de los tubos y acumulación de hongos y bacterias, se estableció que los tubos plásticos son la mejor opción en cuanto a características técnicas, propiedades de higiene y mantenimiento del sistema. De la Tabla F.1 se puede establecer el tubo PVC el más apto a utilizar para el diseño del sistema de ventilación natural forzada utilizando tubos enterrados.

Anexo G

PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO

Las propiedades térmicas del suelo (capacidad calorífica, calor específico, conductividad térmica y difusividad térmica) varían con el contenido de agua, granulometría y agregación del suelo (Porta et al. 1994) y se relacionan con la actividad microbiana, la mineralización y la humificación de la materia orgánica. La conductividad térmica (λ) o habilidad del suelo para transferir calor por conducción molecular se expresa en calorías que fluyen por una placa de suelo con área y espesor unitarios, con una diferencia de $1^{\circ}C$ entre las dos caras (Honorato, 2000). Cuando la conductividad térmica de un suelo es alta, las variaciones de temperatura en la superficie son menores. La conductividad térmica se incrementa con el contenido de humedad, incidiendo a la vez en los cambios de temperatura del suelo; sin embargo, cuando hay saturación de poros no aumenta en las proporciones esperables. La conductividad térmica se considera como característica sensible a los cambios que operan en el suelo (Honorato, 2000; Jury et al.,1991).

Los principales parámetros que definen el comportamiento térmico del suelo son:

- Conductividad térmica.
- Capacidad calorífica.
- Difusividad térmica.

En la Tabla G.1 se describen algunos valores típicos de conductividad, calor específico, capacidad calorífica y difusividad de diversos tipos de suelo, los cuales son considerados para el cálculo del sistema.

Tabla G.1: Características Térmicas de diferentes tipos de suelo

Material	Conductividad Térmica ($J/^{\circ}C/cm/seg$)	Calor Específico ($J/gr/^{\circ}C$)	Capacidad Calórica ($J/cm3/^{\circ}C$)	Difusividad Térmica (cm^2/seg)
ARENA	0,003	0,71	1,26	0,0023
ARCILLA	0,0025	0,71	1,26	0,002
M.O.	0,00058	1,93	1,47	0,0004
AGUA	0,0059	4,19	4,19	0,0014
AIRE	0,00025	1	0,0012	0,21
CUARZO	0,084	0,71	1,89	0,044
Suelo arenoso húmedo	0,017	1,26	1,68	0,01
Suelo arenoso seco	0,0017	0,63	0,84	0,002
Humus	0,0126	1,84	2,39	0,005
Nieve compacta	0,0029	2,14	0,92	0,003
Suelo Turboso	0,00063	1,97	0,59	0,001

G.1. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL SUELO

la conductividad térmica del suelo se refiere a la cantidad de calor transferido por conductividad molecular (el calor se transfiere de la parte más caliente del suelo a la más fría). la conductividad térmica del suelo es mayor que la del agua y mucho mayor que la del aire, la cual va a depender de la humedad, el grado de empaquetamiento y la porosidad del suelo que se quiere analizar.

como se puede observar en la Figura G.1 si el suelo tiene una cierta cantidad de agua, la conductividad va a aumentar en función de la humedad, con respecto a un suelo seco, el cual tiene una conductividad menor, además se puede observar la curva de conductividad de diferentes tipos de suelo y como varia según el porcentaje de agua que contenga (hadas, 1974)[42].

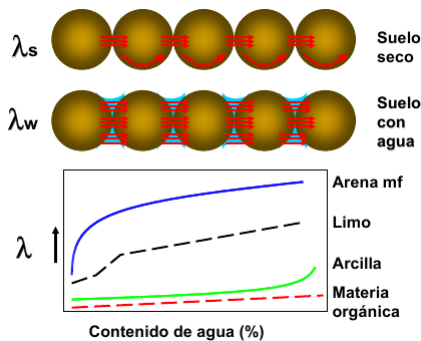


Figura G.1: Conductividad de diferentes tipos de suelo

La conductividad térmica (k), depende en el caso de los suelos, de su composición en materia mineral, textura, contenido en agua y forma de sus partículas, así como la disposición de espacio entre ellas. La aproximación de DeVries, 1963 permite establecer la conductividad

térmica con gran exactitud[5].

G.2. CAPACIDAD CALÓRICA DEL SUELO

El calor específico del suelo define la cantidad de calor necesario para que la unidad de masa del suelo aumente un grado su temperatura en condiciones isobáricas. Los componentes minerales del suelo tienen calores específicos muy semejantes, cercanos a $1,9 MJ.m^{-3}.^{\circ}C^{-1}$, que se diferencian claramente del calor específico del agua ($4,19 MJ.m^{-3}.^{\circ}C^{-1}$). Los suelos húmedos se calentarán más lentamente que los secos, pero mantendrán más el calor, reduciendo las variaciones de temperatura en el suelo[43].

Los valores típicos del calor específico del suelo varían en función de la textura, la estructura y el contenido de materia orgánica.

Anexo H

RUIDO

Para la calidad del aire; el ruido tiene límites que permitirá que no se llegue a producir una sensación de incomodidad o no confort en las personas que se encuentren dentro del recinto.

Cuando deseamos valorar los riesgos derivados de la exposición al ruido de las personas, tendremos que conseguir que la medida del ruido sea, de algún modo, reflejo de la forma en que las personas percibe el ruido.

Esto dio lugar a la obtención de 4 escalas de ponderación denominadas A, B, C, D, que quedan especificadas en la Norma S1.4 de ASA, y han quedado internacionalmente aceptadas a través de la ISO. Estas escalas se encuentran introducidas en los aparatos de medida (sonómetros) para corregir sus lecturas adaptándolas a la respuesta del oído.

Estas cuatro escalas, se tienen en cuenta a la hora de la selección del sensor, tenemos que la escala A está pensada como atenuación al oído cuando soporta niveles de presión sonora bajos ($< 55 dB$) a las distintas frecuencias. La escala B representa la atenuación para niveles intermedios ($55 dB - 85 dB$) y la C para altos ($> 85 dB$). La D está pensada para muy altos niveles de presión sonora. La más utilizada es la escala A, por ello, los resultados de ruido industrial se dan en decibelios A [$dB(A)$].

Existen diferentes criterios para indicar límites permisibles al ruido. El criterio de la ACGIH¹[44] fija el límite o *TLV* (*Threshold Limit Values*) en $85 dB(A)$ para 8 horas de trabajo diario [45].

El criterio que establece la norma ISO² fija el límite en $90 dB(A)$ para semanas de 40 horas. La diferencia entre estos dos criterios se encuentra en el factor de equivalencia (ver Tabla H.1). En cada criterio, se establece que el ruido se reducirá a la mitad del tiempo de exposición, si el valor medido se excede con relación a la norma en 3 ó 5 dB , según corresponda (Factor de equivalencia).

¹ACGIH American Conference of Governmental Industrial Hygienists

²ISO, International Organization for Standardization.

Tabla H.1: Factor de equivalencia de tiempo de exposición a ruido
TIEMPOS DE EXPOSICIÓN AL RUIDO

Criterio ACGIH	Criterio ISO
Factor de equivalencia=5	Factor de equivalencia=3
$T = \frac{16}{2^{(N-80)/5}}$	$T = \frac{16}{2^{(N-87)/3}}$
N=nivel sonoro en $dB(A)$; T=tiempo en horas	

En Colombia, según la resolución 1792 de mayo 3 de 1990[46], se modifica los valores límites permisibles para la exposición ocupacional al ruido. Utiliza la tasa de intercambio de 5 db y el nivel de criterio de 85 $db(A)$.

Tabla H.2: tiempo de exposición a ruido según la resolución 1792 de mayo 3 de 1990

DURACIÓN POR DÍAS (HORAS)	DECIBELES
8	85
4	90
2	95
1	100
30MIN	105
15MIN	110
7MIN	115

Tabla H.3: Valores Límites permisibles para Ruido de Impacto.

NIVEL DE PRESIÓN SONORA (dB)	NÚMERO DE IMPULSOS O IMPACTOS PERMITIDOS POR DÍA
140	100
130	1000
120	10000

Aplicable a ruido continuo e intermitente, sin exceder la jornada máxima laboral vigente de ocho horas.

Anexo I

CALIDAD DE AIRE

El sistema no solo debe ser diseñado para mejorar el confort térmico, también debe estar diseñado para mantener una calidad aceptable de aire interior. Conseguir una calidad aceptable de aire interior no siempre implica garantizar confort térmico, al igual que alcanzar confort térmico no garantiza una calidad de aire interior aceptable.

I.1. CALIDAD DE AIRE INTERIOR

La norma ASHRAE 62-2001 trata los temas de ventilación para una calidad de aire interior aceptable y su propósito es especificar tasas de ventilación y calidades de aire interior mínimas que sean aceptables para los ocupantes e intenten minimizar los efectos potenciales adversos a la salud.

Entre los ítems que trata esta norma se encuentran: calidad de aire exterior para una ventilación aceptable; tratamiento del aire exterior; tasas de ventilación para espacios residenciales, comerciales, institucionales e industriales; criterios para reducir las cantidades de aire exterior cuando el aire recirculado es tratado por equipos que renueven contaminantes[47].

Estos son algunos de los contaminantes y sus respectivas concentraciones citados en la norma ASHRAE 2009[48]. (Ver Tabla I.1).

Concentraciones de Aire Exterior Típicas de Ciertos Contaminantes Gaseosos del Aire

Contaminantes	Concentración Típica, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Contaminantes	Concentración Típica, $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Acetaldehyde	20	Methylene chloride	2.4
Acetona	3	Nitric acid	6
Ammonia	1.2	Nitric oxide	10
Benzene	8	Nitrogen dioxide	51
2-Butanone (MEK)	0.3	Ozone	40
Carbon dioxide	612 000 ¹	Phenol	20
Carbon Monoxide	3 000	Propane	18
Carbon disulfide	310	Sulfur dioxide	240
Carbon tetrachloride	2	Sulfur acid	6
Chloroform	1	Tetrachloroethylene	2.5
Ethylene dichloride	10	Toluene	20
Formaldehyde	20	1,1,1-Trichloroethane	4
n-Heptane	29	Trichloroethylene	15
Mercury (vapor)	0.005	Vinyl chloride monomer	0.8
Methane	1 100		
Methyl chloride	9	Xylene	10

¹La concentración normal de dióxido de carbono en el aire. La concentración en espacios ocupados debe mantenerse a no más de tres tiempos de este nivel (1000 ppm).

El 4 de Abril de 2006 el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial expidió la Norma de referencia de Calidad del Aire para todo el territorio Nacional, en la cual se establece el máximo nivel permisible de concentración en el aire de cinco (5) contaminantes, criterio que podrían afectar significativamente la salud de la población general en Colombia[49].

El comportamiento de la calidad del aire representado por el IBUCA¹ está asociado directamente con el grado de afectación de la salud humana (ver Tabla I.1).

Normas Locales de Calidad de Aire utilizadas en el Cálculo del IBUCA

CONTAMINANTE	PERIODO	NORMA	UNIDAD
Partículas suspendidas PM10	24 horas	134	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
Óxidos de Azufre, SOx	24 horas	86	ppb
Óxidos de Nitrógeno, NO2	1 hora	95	ppb
Monóxido de Carbono, CO	1 hora	31	ppm
Oxidante Fotoquímico O3	1 hora	54	ppb

Así mismo, el Decreto 979 del 2006[50], establece los niveles de prevención, alerta y emergencia por contaminación del aire. En la Tabla I.1, se establecen los niveles de concentración de cada contaminante para determinar el nivel respectivo:

¹El IBUCA es un índice que reporta diariamente la calidad del aire, indicando el nivel de concentración de aire que se respira y su correlación con la salud en la ciudad de Bucaramanga.

Concentración y Tiempo de Exposición de los Contaminantes para los Niveles de Prevención, Alerta y Emergencia

CONTAMINANTE	TIEMPO DE EXPOSICIÓN	UNIDADES	PREVENCIÓN	ALERTA	EMERGENCIA
PST	24 horas	$\mu g/m^3$	375	625	875
PM10	24 horas	$\mu g/m^3$	300	400	500
SO2	24 horas	$ppm(\mu g/m^3)$	0.191 (500)	0.382 (1000)	0.612 (1600)
NO2	1 hora	$ppm(\mu g/m^3)$	0.212 (400)	0.425 (800)	1.064 (2000)
O3	1 hora	$ppm(\mu g/m^3)$	0.178 (350)	0.356 (700)	0.509 (1000)
CO	8 horas	$ppm(\mu g/m^3)$	14.9 (17)	29.7 (34)	40.2 (46)

Los datos de concentración se reduce a menudo a la temperatura estándar y la presión (por ejemplo, $25^\circ C$ y $101.325 KPa$), en cuyo caso $ppm = (24.45/M) (mg/m^3)$.

En la Tabla I.1 se presenta la categorización de los valores de IBUCA

Niveles de Clasificación Epidemiológica Utilizados por el IBUCA

IBUCA	DESCRIPTOR	CALIFICACIÓN EPIDEMIOLÓGICA	COLOR
0 - 1.25	Bueno	La calidad de aire es considerada como satisfactoria y la afectación en la contaminación del aire es pequeña y no evidencia ningún efecto en la salud humana.	verde
1.26 -2.5	Moderado	La calidad de aire es aceptable y no tiene ningún efecto sobre la población en general.	Amarillo
2.51 - 7.5	Regular	Aumento de molestias en personas con padecimientos respiratorios cardiovasculares; aparición de ligeras molestias en la población en general.	Naranja
7.51 - 10	Malo	Agravamiento significativo de la salud en personas con enfermedades cardiacas o respiratorias. Afectación de la población sana	Rojo
≥ 10	Peligroso	Alto riesgo para la salud de la población. Aparición de efectos al nivel de daño	Violeta

I.1.1. Cantidad Mínima de Aire de Ventilación

Se considera que la producción de CO_2 de una persona que está en situación de reposo absoluto (metabolismo basal = 1 met) es de 0,0042 litros por segundo. Para hallar el caudal de aire de ventilación (Q), se tiene en cuenta la tasa metabólica en función de la actividad desarrollada (Tabla E.8).

También es necesario determinar la cantidad de aire exterior requerido para cada recinto. Para esto el estándar provee de una tabla con las tasas de ventilación recomendadas según el uso de cada recinto. La Tabla I.1.1 es un extracto de dicha tabla.

TASAS DE VENTILACIÓN DEL ESTÁNDAR 62-2001

Aplicación	Ocupación máxima estimada (<i>personas/100m²</i>)	Requerimientos de aire externo	
		L/s personas	L/s m ²
OFICINAS			
Recinto de la oficina	8	9.4	
Áreas de recepción	65	7	
Áreas de Call centers y de cómputo de datos	65	9.4	
Salas de conferencias	22	9.4	
ESPACIOS PÚBLICOS			
Pasillos y corredores			0.25
sala de descanso		24	
vestuarios			2.5
Sala de fumadores	76	28	
Ascensores			5
Educación			
Salón de clase	50	8	
Auditorio	150	8	
Biblioteca	20	8	

Anexo J

METODOLOGÍA AHP

Es un proceso de multicriterio diseñado para cuantificar juicios u opiniones generacionales sobre la importancia relativa de cada uno de los criterios en conflicto empleados en el proceso de toma de decisión.

Consta de las siguientes 8 etapas:

1. Descomponer el problema de decisión en una jerarquía de elementos interrelacionados, identificando: (a) la meta general, (b) los criterios y (c) las alternativas posibles. Para este primer paso se colocan como meta general los criterios de selección nombrados anteriormente, teniendo en cuenta los siguientes esquemas:

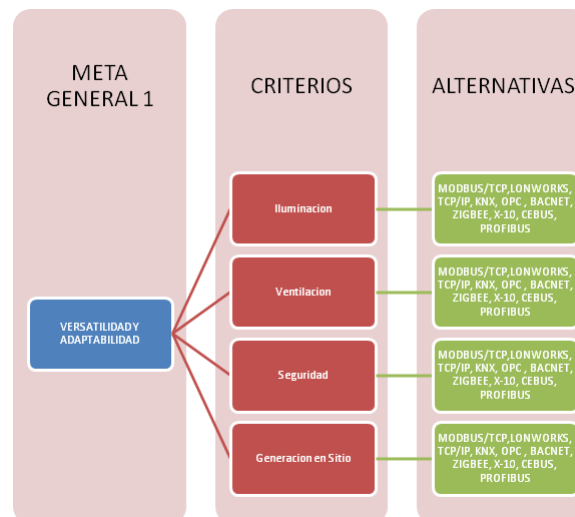


Figura J.1: Esquema Versatilidad y Adaptabilidad

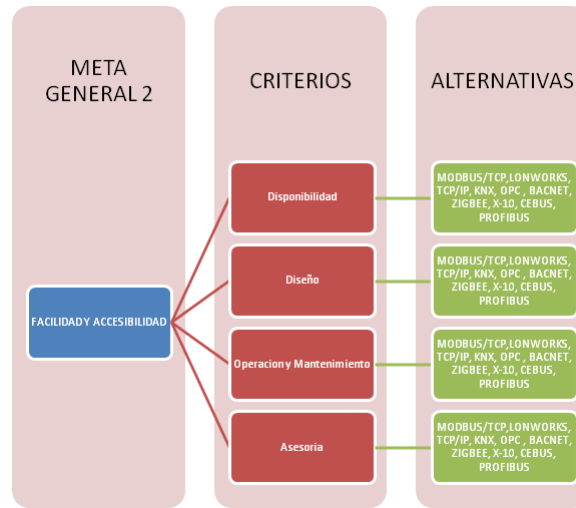


Figura J.2: Esquema de Facilidad y Accesibilidad

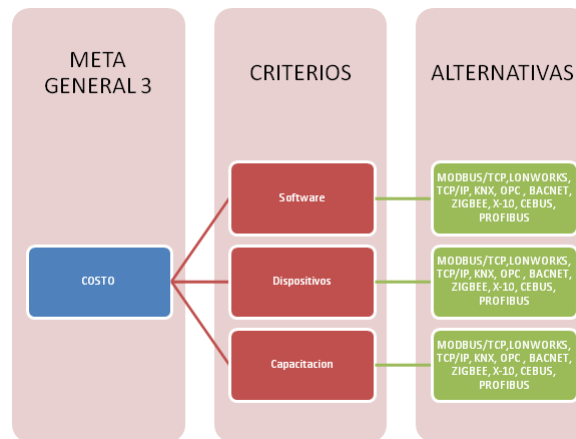


Figura J.3: Esquema de costo

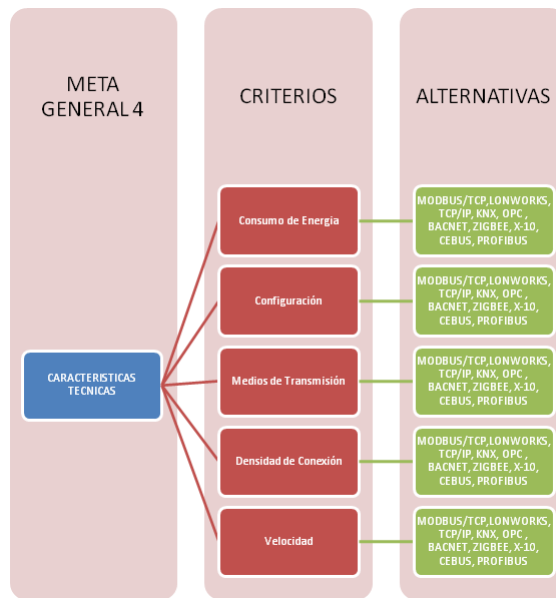


Figura J.4: Esquema de Características Técnicas

Al final para tener en cuenta todos los criterios se realizó el último análisis con el siguiente esquema.

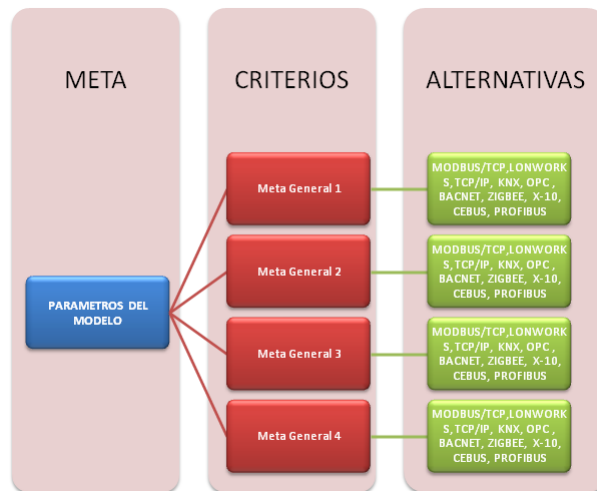


Figura J.5: Esquema de Parámetros del Modelo

2. Desarrollar la Matriz de Comparación por Pares (MCP) de alternativas para cada uno de los criterios establecidos en el rating de importancia relativa entre ambas alternativas consideradas. El rating se establece a partir de la escala de satty siguiente:

Tabla J.1: Tabla de Scatty para el protocolo de comunicación

Escala numérica	Escala Verbal	Explicación
1	Igual importancia	Los dos elementos contribuyen igualmente a la propiedad o criterio
3	Moderadamente más importante un elemento que el otro	El juicio y la experiencia previa favorecen a un elemento frente a otro
5	Fuertemente más importante un elemento que en otro	El juicio y la experiencia previa favorecen fuertemente a un elemento frente a otro
7	Mucho más fuerte la importancia de un elemento que la del otro	un elemento domina fuertemente. Su dominación está probada en práctica
9	Importancia extrema de un elemento frente al otro	un elemento domina al otro con el mayor orden de magnitud posible

Pueden asignarse los valores intermedios 2, 4, 6, 8. Un rating recíproco (ej. 1/9, 1/7, 1/5, 1/3, ...) se aplica cuando la segunda alternativa es preferida a la primera. El valor 1 es siempre asignado a la comparación de una alternativa con sí misma. Para cada criterio se realizó una matriz de asignación como se puede ver en el siguiente ejemplo para el criterio de Versatilidad y Adaptabilidad y para los siguientes.

Tabla J.2: Matriz de asignación

I	Iluminación			
V	Ventilación			
S	Seguridad			
GS	Generación en sitio			
Asignación para la matriz (R)				
R	I	V	S	GS
I	1	1/2	1	2
V	2	1	2	3
S	1	1/2	1	2
GS	1/2	1/3	1/2	1

3. Desarrollar la Matriz Normalizada (MNR) dividiendo cada número de una columna de la matriz de comparación por partes, entre la suma total de la columna, como se observa en la siguiente tabla.

Tabla J.3: Matriz Normalizada

Matriz normalizada R (MNR)				
MNR	I	V	S	GS
I	0,222	0,214	0,222	0,250
V	0,444	0,429	0,444	0,375
S	0,222	0,214	0,222	0,250
GS	0,111	0,143	0,111	0,125
Total	1,000	1,000	1,000	1,000

4. Desarrollar el vector de prioridad para el criterio calculando el promedio de cada fila de la Matriz Normalizada. Este promedio por fila representa el vector de prioridad de la Alternativa con respecto al criterio considerado, de la siguiente forma:
- Para cada línea de la matriz de comparación por pares, determinar una suma ponderada en base a la suma del producto de cada celda, por la prioridad de cada alternativa correspondiente.
 - Para cada línea, dividir su suma ponderada, entre la prioridad de su alternativa correspondiente.
 - Determinar la media del resultado de la etapa (b)
 - Calcular el índice de consistencia para cada alternativa CI
 - Determinar el cociente consistencia (CR): $CR=CI/RI$

Tabla J.4:

W		X	λ
Vector de pesos		R*W	X/W
I	0,227	0,911	4,010
V	0,423	1,699	4,016
S	0,227	0,911	4,010
GS	0,123	0,491	4,005
Total	1,000		

5. La consistencia de las opiniones utilizadas en la matriz de comparación por pares puede ser determinada a través del cociente de consistencia (CR). Un CR inferior a 0.10 es considerado aceptable. Para aquellos casos en que $CR > 0.10$, las opiniones y juicios deberán ser reconsiderados. Después de hacer los cálculos se obtuvieron los siguientes datos:

Tabla J.5: Cociente de consistencia

Lambda Máximo	λ_{max}	4,016
Índice de consistencia	IC	0,005
Índice de aleatoriedad	n	4
	IA	0,90
Razón de consistencia	RC	0,006

6. Luego de que la secuencia 2-3-4-5 ha sido ejecutada para todos los criterios, los resultados obtenidos en el punto 4 son resumidos en una matriz prioridad (MP), listando las alternativas por fila y los criterios por columna.
7. Desarrollar una Matriz de Comparación de Criterios por pares de manera similar a lo que se hizo para las alternativas 2-3-4.

Tabla J.6: Comparación entre los protocolos más comúnmente utilizados en domotica e inmotica

VERSATILIDAD & ADAPTABILIDAD (V&A)						
I	Iluminación	Ponderación 1,25				
V	Ventilación	1,5				
S	Seguridad	1,25				
GS	Generación en sitio	1				
	Total	5				
ANÁLISIS TÉCNICO						
1	Desarrollo limitado del parámetro en el diseño					
2	Desarrollo moderado del parámetro en el diseño					
3	Altísimo desarrollo del parámetro en el diseño					
Protocolo / Valor	I	V	S	GS	Subtotal Ponderado	
1	MODBUS/TCP	3	3	3	2	2,80
2	LONWORKS	3	3	3	3	3,00
3	TCP/IP	2	2	2	2	2,00
4	KNX	3	3	3	3	3,00
5	OPC	3	3	3	2	2,80
6	BACNET	3	2	3	2	2,50
7	ZIGBEE	2	2	2	2	2,00
8	X-10	3	3	3	3	3,00
9	CEBUS	2	2	3	2	2,25
10	PROFIBUS	2	2	3	2	2,25

8. Desarrollar un vector de prioridad global multiplicando el vector de prioridad de los criterios 7 por la matriz de prioridad de las alternativas 6.

Tabla J.7: Matriz de prioridad global

Protocolo	F&A	Puesto
MODBUS/TCP	0,959	4
LONWORKS	1,000	1
TCP/IP	0,667	9
KNX	1,000	1
OPC	0,959	4
BACNET	0,818	6
ZIGBEE	0,667	1
X-10	1,000	1
CEBUS	0,742	7
PROFIBUS	0,742	7

Para cada uno de los criterios fue asignado un puesto para cada protocolo, después de desarrollados los pasos nombrados, la asignación de puesto fue dada por la siguiente tabla de valores de aleatoriedad:

Tabla J.8: Valores de aleatoriedad

Valores de aleatoriedad	
n	ICA
1	-
2	-
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56
14	1,57
15	1,59

Tabla J.9: Valores de aleatoriedad

Tabla J.10: Valores de aleatoriedad