



# UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Ingeniería  
División de Ingeniería Mecánica e Industrial

## **Factores que deterioran el confort térmico en los vagones del Metro de la Ciudad de México.**

TESIS

Para obtener el título de:  
Ingeniero Mecánico

Presenta:

Gabriela Betancourt Santana

Director de Tesis:

Dr. José Luis Fernández Zayas



Ciudad Universitaria

México, D.F. 2011



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Dedicatoria.

Esta tesis la dedico a las personas **MÁS IMPORTANTES** en mi vida: **mi mamá, Clara, Lucha, Toño, Camila y Javier**, quienes me apoyaron no solo durante la carrera, sino toda la vida, y por ello les agradezco.

No puedo dejar de mencionar a **Rafael** y a **Impapá**, quienes se adelantaron pero de seguro estarán orgullosos de mí desde el cielo a lado de **Dios**, quien me permitió seguir aquí y terminar mi proyecto.

También dedico esta tesis a quien todas las noches esperaba a que dejara de trabajar y apagara la luz para poder ir a descansar, mi **Wendy**, quien no solo ha sido una mascota sino ha sido mi compañía.

En esta dedicatoria también agradezco a dos profesores que me apoyaron muchísimo: **José Luis Fernández Zayas** y **Raúl Gilberto Valdez Navarro**, y que espero que vayan a mi examen profesional y no pregunten cosas complicadas.

A mis mejores amigos que siempre me echaban porras: **Diana, Laura, Naty, Jenni, Lorena, Martha, Juan Carlos's y Norman**, que espero que lean mi tesis aunque no le entiendan y griten mucho en mi examen.

Una dedicatoria especial a alguien que conocí en el trayecto de la tesis: **Hugo Calabaza**, quien fue mi punto de comparación del avance de tesis y una distracción para mis desveladas, además que fue de los primeros en criticar mi tesis, aunque solo criticaba los dibujos.

A **Ángeles**, los operadores, ingenieros y trabajadores del metro, quienes me ayudaron a realizar los peligrosos experimentos en los vagones.

A todos mis familiares y amigos que pues por tener poco espacio no pude mencionar, pero saben que son muy importantes para mí.

Y por último **“Dedico esta tesis a todos aquellos que dedicaron un ratito de su vida en leerla”**.

# ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura.	Descripción.
Figura 1.	Configuración de los vagones para los trenes de 9 y 6 vagones de rodadura neumática.
Figura 2.	Configuración de los vagones para los trenes 6 vagones de rodadura de acero.
Figura 3.	Vagón motriz neumático.
Figura 4.	Vagón férreo.
Figura 5.	Los 3 métodos de transferencia de calor: a) conducción, b) convección y c) radiación.
Figura 6.	Convección de calor de una superficie a un fluido en movimiento.
Figura 7.	Transferencia de calor por radiación: a) en la superficie, b) de la superficie con sus alrededores.
Figura 8.	No todos sentimos la misma sensación de confort al estar en una misma condición de temperatura y humedad.
Figura 9.	Conversión de la energía eléctrica en calor y luz en las lámparas fluorescentes, donde $E$ representa a la potencia absorbida por la lámpara en $[W]$ y $(0.8E)$ representa la potencia efectiva en $[W]$ .
Figura 10.	Mapa del Sistema de Transporte Colectivo real e idealizado.
Figura 11.	Ganancia de calor en vidrios ordinarios a diferentes ángulos de incidencia.
Figura 12.	Ganancia de calor por radiación solar en un vidrio con coeficiente de absorción de 52%.
Figura 13.	Localización de las ventanas en la pared lateral de los vagones del metro, donde V1 indica las ventanas en la pared y V2 las ventanas en las puertas de ascenso y descenso.
Figura 14.	Localización de las ventanas en las puertas conectoras de los vagones del metro de la Ciudad de México indicados por V3.
Figura 15.	Plano de la ventana tipo V1.
Figura 16.	Plano de la ventana tipo V2.
Figura 17.	Plano de la ventana tipo V3.
Figura 18.	Estructura de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.
Figura 19.	Capas que conforman la estructura de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

- Figura 20. Capas que conforman el piso de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.
- Figura 21. Espesores de las diferentes capas que conforman a un vagón motriz sin cabina de la línea 3.
- Figura 22. Plano de la estructura de un vagón motriz sin cabina.
- Figura 23. Vagón motriz sin cabina de la línea 3.
- Figura 24. Boguie de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.
- Figura 25. Motor de c.d. (1) de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.
- Figura 26. Diagrama de conexiones de un motor de c.d. con excitación en serie.
- Figura 27. Balance de energía de un volumen de control.
- Figura 28. Balance de energía de un volumen de control.
- Figura 29. Rejillas del vagón.
- Figura 30. Flujo de aire al interior del vagón.
- Figura 31. Ventilador de la línea 3.
- Figura 32. Circuitos de la cabina de control y apertura y cierre de puertas.

## ÍNDICE DE TABLAS.

- | Tabla.        | Descripción.  |
|---------------|---|
| Tabla 1.      | Número de líneas, estaciones y longitud de la línea de la red del metro.                |
| Tabla 2.      | Distribución de los trenes en cada línea.   |
| Tabla 3.      | Capacidad de cada tren del Sistema de Transporte Colectivo metro.                       |
| Tabla 4.      | Temperaturas máximas extremas de la Ciudad de México en el año 2010.                    |
| Tabla 5.      | Humedad relativa de la Ciudad de México en el año 2010.                                 |
| Tabla 6.      | Temperaturas máximas de la Ciudad de México en el año 2010.                             |
| Tabla 7.      | Temperaturas mínimas de la Ciudad de México en el año 2010.                             |
| Tabla 8.      | Intervalo de variación diurna de la Ciudad de México en el año 2010.                    |
| Tabla 9 y 10. | Intervalo de variación diurna y oscilación anual de temperatura de la Ciudad de México. |
| Tabla 11.     | Condiciones normales de verano de la Ciudad de México.                                  |

- Tabla 12. Correcciones en las temperaturas de proyecto en función de la hora deseada.
- Tabla 13. Correcciones en las condiciones de proyecto en función del mes considerado.
- Tabla 14. Temperaturas de proyecto en función de la hora deseada para la Ciudad de México.
- Tabla 15. Temperaturas de proyecto en función del mes considerado para la Ciudad de México.
- Tabla 16. Temperatura de bulbo seco y humedad relativa censada en los andenes del metro de la Ciudad de México en la línea 3 en cada estación para el mes de julio del año 2010.
- Tabla 17 y 18. Intervalo de variación diurna y oscilación anual de temperatura en los andenes del metro de la Ciudad de México.
- Tabla 19. Condiciones normales de verano en los andenes del metro de la Ciudad de México.
- Tabla 20. Correcciones en las condiciones de proyecto en función de la hora deseada.
- Tabla 21. Correcciones en las condiciones de proyecto en función del mes considerado.
- Tabla 22. Temperaturas de proyecto en función de la hora deseada para la los andenes del metro de la Ciudad de México.
- Tabla 23. Temperaturas de proyecto en función del mes considerado para la los andenes del metro de la Ciudad de México.
- Tabla 24. Condiciones interiores de proyecto recomendables para los vagones del metro de la Ciudad de México.
- Tabla 25. Energía metabólica neta por unidad de tiempo producida por el hombre estándar en función de su actividad.
- Tabla 26. Potencia neta metabólica en condiciones de máxima afluencia en un vagón motriz sin cabina.
- Tabla 27. Potencia neta metabólica por vagón.
- Tabla 28. Potencia neta metabólica por tren.
- Tabla 29. Características de las lámparas de los vagones de la línea 3.
- Tabla 30. Potencia calorífica sensible disipada por las lámparas.
- Tabla 31. Tipo de estaciones para cada línea.
- Tabla 32. Orientación de las líneas del metro.
- Tabla 33. Aportaciones solares a través de vidrio ordinario para 20° latitud norte.

Tabla 34.	Factores de corrección para ganancia solar de la Ciudad de México.
Tabla 35.	Aportaciones solares a través de un vidrio ordinario para las condiciones de la Ciudad de México.
Tabla 36.	Factor total de ganancia solar a través del vidrio.
Tabla 37.	Dimensiones de las ventanas de los vagones del metro de la línea 3.
Tabla 38-a.	Máxima carga solar por infiltración de sol en las ventanas de 6[mm] en los vagones de la línea 3 para las estaciones superficiales en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
Tabla 38-b.	Máxima carga solar por infiltración de sol en las ventanas de 6[mm] en los vagones de la línea 3 para las estaciones superficiales en [W].
Tabla 39.	Dimensiones de las puertas, ventanas y muros de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.
Tabla 40.	Dimensiones del piso y el techo de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.
Tabla 41.	Propiedades y dimensiones de las capas de los muros.
Tabla 42.	Propiedades y dimensiones del techo (renglón superior) y del piso (renglón inferior).
Tabla 43.	Peso de la estructura de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.
Tabla 44.	Diferencia equivalente de temperatura para un muro con un peso de $144 \left[\frac{kg}{m^2}\right]$ .
Tabla 45.	Condiciones de proyecto del año 2010 de la Ciudad de México.
Tabla 46.	Corrección de la diferencia equivalente de temperatura para las condiciones de proyecto.
Tabla 47.	Propiedades del aire a condiciones de proyecto.
Tabla 48.	Coefficiente global de transmisión de calor de los muros.
Tabla 49.	Ganancia de calor en las paredes del vagón.
Tabla 50.	Diferencia equivalente de temperatura para techos color medio.
Tabla 51.	Diferencia equivalente de temperatura para techos corregida.
Tabla 52.	Coefficiente global de transferencia de calor del techo.
Tabla 53.	Ganancia de calor por radiación del sol en el techo del vagón.
Tabla 54.	Ganancia de calor solar en la estructura del vagón.
Tabla 55.	Datos de placa del motor de tracción de la línea 3.

Tabla 56.	Calor disipado por el motor de c.d.
Tabla 57.	Área del piso de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.
Tabla 58.	Propiedades de los espesores del piso de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.
Tabla 59.	Coefficiente global de transmisión de calor del piso.
Tabla 60.	Condiciones de proyecto del metro.
Tabla 61.	Potencia calorífica disipada por los motores y transmitida al interior del vagón por conducción.
Tabla 62.	Características de las lámparas de las estaciones de la línea 3.
Tabla 63.	Potencia calorífica sensible disipada por las lámparas de las estaciones subterráneas de la línea 3.
Tabla 64.	Potencia calorífica emitida por las personas en cada estación de la línea 3.
Tabla 65.	Calor disipado por el motor de c.d.
Tabla 66.	Condiciones de proyecto del metro para el subterráneo.
Tabla 67.	Coefficiente global de transmisión de calor del piso, techo, puertas, ventanas y paredes y potencia calorífica emitida por el cambio de temperatura al interior del vagón.
Tabla 68.	Potencia calorífica generada por lámparas, personas y motores.
Tabla 69.	Potencia calorífica que afecta al interior del vagón en las estaciones subterráneas.
Tabla 70.	Cargas interiores y exteriores que actúan sobre el vagón.
Tabla 71.	Suma de las cargas interiores y exteriores que actúan sobre el vagón para la condición de estaciones subterráneas y superficiales.
Tabla 72.	Potencia calorífica que afecta al interior del vagón en las estaciones subterráneas.
Tabla 73.	Cargas para estaciones superficiales y subterráneas.

## ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica.	Descripción.
Gráfica 1.	Calor latente y calor sensible del agua. En el calor latente coexisten 2 fases del agua. En el calor sensible existe una sola fase del agua.

- Gráfica 2. Transferencia de calor a través de un muro plano.
- Gráfica 3. Carta psicrométrica.
- Gráfica 4. Gráfica de zona de confort que relaciona la temperatura efectiva con la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, así como con la humedad relativa. Esta gráfica sirve para una velocidad de  $25 \left[ \frac{pie}{min} \right]$  que se considera un aire quieto, para velocidades de aire mayor de  $100 \left[ \frac{pie}{min} \right]$  la temperatura efectiva disminuye 2 [°F].
- Gráfica 5. Condiciones climatológicas de la Ciudad de México en el año 2010. (CONAGUA)
- Gráfica 6. Temperatura de bulbo seco y humedad relativa censada a través de los andenes de la línea 3, del metro de la Ciudad de México en el mes de julio.
- Gráfica 7. Diagrama de distribución en porcentaje de usuarios por vagón.
- Gráfica 8. Velocidad del metro y el aire en las paredes del vagón.
- Gráfica 9. Carga total para estaciones subterráneas y superficiales.
- Gráfica 10. Comparación de la carga exterior e interior para estaciones a) superficiales y b) subterráneas.
- Gráfica 11. Carga de calor para estaciones superficiales y subterráneas.
- Gráfica 12. Porcentaje de aportación de calor para estaciones a) superficiales y b) subterráneas.

## ÍNDICE DE SÍMBOLOS.

Símbolo.	Definición.
$a$	<i>corrección de diferencia equivalente de temperatura respecto a <math>\Delta T_{real}</math> en [°C].</i>
$A$	<i>área superficial en [<math>pie^2</math>] ó [<math>m^2</math>].</i>
$A_n$	<i>área normal de flujo de calor en [<math>pie^2</math>] ó [<math>m^2</math>].</i>
$A_{ventana}$	<i>área de la ventana en [<math>m^2</math>].</i>
<i>altitud</i>	<i>altura sobre el nivel del mar en [m].</i>
$b$	<i>coeficiente de color de la pared, color medio 0.78.</i>
$C_{altitud}$	<i>corrección por altitud.</i>
$c_p$	<i>calor específico a presión constante en <math>\left[ \frac{BTU}{lbm \text{ } ^\circ F} \right]</math> ó <math>\left[ \frac{J}{kg \text{ } ^\circ C} \right]</math>.</i>

$C_{pr}$	corrección por punto de rocío.
$\frac{dt}{dx}$	gradiente de temperatura en función de la distancia $\left[\frac{^{\circ}F}{pie}\right]$ ó $\left[\frac{^{\circ}C}{m}\right]$ .
$E$	potencia útil en [W].
$F$	factor de configuración, una función geométrica.
$fem$	fuerza electromotriz en [V].
$FGS$	factor total de ganancia solar a través de un vidrio.
$h$	coeficiente de convección, $\left[\frac{BTU}{hr\ pie^2 F}\right]$ ó $\left[\frac{W}{m^2 s}\right]$ .
$h_{ext}$	coeficiente de convección del aire al exterior en $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$ .
$h_{int}$	coeficiente de convección del aire al interior en $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$ .
$I$	corriente en [A].
$IVD$	intervalo de variación diurna en [ $^{\circ}C$ ].
$k$	conductividad térmica en $\left[\frac{BTU}{hr\ pie^{\circ}F}\right]$ ó $\left[\frac{W}{m^{\circ}C}\right]$ .
$k_i$	conductividad térmica de cada capa en $\left[\frac{m^2\ ^{\circ}C}{W}\right]$ .
$L_i$	espesor de la capa de cada material en [m].
$\dot{m}$	tasa másica del caudal en $\left[\frac{lbm}{hr}\right]$ ó $\left[\frac{kg}{s}\right]$ .
$OAT$	oscilación anual de temperaturas en [ $^{\circ}C$ ].
$P$	potencia demandada en [W].
$P_{des}$	potencia desarrollada en [W].
$P_{ent}$	potencia de entrada en [W].
$P_{pér}$	potencia de pérdidas en [W].
$P_{mar}$	número de usuarios en marcha a 5 $\left[\frac{km}{h}\right]$ .
$p_{par}$	número de usuarios de pie.
$p_{sent}$	número de usuarios sentados.
$\dot{Q}_{alumbrado}$	potencia calorífica debida al alumbrado en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

$\dot{q}_{\text{conducción}}$	transferencia de calor por conducción en $\left[\frac{BTU}{hr}\right]$ ó $[W]$ .
$\dot{q}_{\text{convección}}$	transferencia de calor por convección en $\left[\frac{BTU}{hr}\right]$ ó $[W]$ .
$\dot{q}_{\text{difusión}}$	potencia calorífica por difusión en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{latente}}$	tasa de adición de calor latente en $\left[\frac{BTU}{hr}\right]$ ó $[W]$ .
$\dot{q}_{\text{mar}}$	potencia calorífica de una persona marcha a 5 $\left[\frac{km}{h}\right]$ en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{par}}$	potencia calorífica de una persona parada en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{pared}}$	ganancia de calor en paredes en $[W]$ .
$\dot{q}_{\text{persona}}$	potencia calorífica de una persona en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{per vagón}}$	potencia calorífica por personas en el vagón en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{radiación}}$	potencia calorífica por radiación en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{resp lat}}$	potencia calorífica por respiración latente en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{resp sen}}$	potencia calorífica por respiración sensible en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{sensible}}$	tasa de transferencia de calor sensible en $\left[\frac{BTU}{hr}\right]$ ó $[W]$ .
$\dot{q}_{\text{sent}}$	potencia calorífica de una persona sentada en $[W]$ ó $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$\dot{q}_{\text{solar}}$	carga solar por infiltración del sol en las ventanas en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .
$Q_{\text{solar correg}}$	aportación solar a través del vidrio sencillo corregido en $\left[\frac{kcal}{h \cdot m^2}\right]$ .
$r_a$	resistencia de la armadura en $[\Omega]$ .
$r_s$	resistencia del devanado de campo en $[\Omega]$ .
$R_s$	máxima insolacion correspondiente al mes y latitud en $\left[\frac{kcal}{h \cdot m^2}\right]$ .
$R_m$	máxima insolacion correspondiente al mes de julio y latitud en $\left[\frac{kcal}{h \cdot m^2}\right]$ .
$Re_x$	número de Reynolds.
$T$	temperatura en $[^{\circ}F]$ ó $[^{\circ}C]$ .

$T_1$	temperatura inicial en [°F] ó [°C].
$T_2$	temperatura final en [°F] ó [°C].
$T_\infty$	temperatura global del fluido en [°F] ó [°C].
$T_{Bulbo\ Seco}$	temperatura de bulbo seco en [°C].
$T_{Cond\ de\ Proy}$	temperatura de condición de proyecto deseada en [°C].
$T_{Correc\ Hora}$	corrección de temperatura para cada hora en [°C].
$T_{Correc\ Mes}$	corrección de temperatura para cada mes en [°C].
$T_{int\ deseada}$	temperatura interior deseada en [°C].
$T_{Máx\ Prom}$	temperatura máxima promedio anual en [°C].
$T_{med\ inv}$	temperatura bulbo seco en invierno en [°C].
$T_{med\ ver}$	temperatura bulbo seco en verano en [°C].
$T_{Mín\ Prom}$	temperatura mínima promedio anual en [°C].
$T_{pr}$	temperatura de punto de rocío en [°C].
$T_s$	temperatura de la superficie en [°F] ó [°C].
$U$	coeficiente global de transmisión de calor en $\left[\frac{W}{m^2\ ^\circ C}\right]$ .
$u_\infty$	velocidad del fluido para un flujo libre.
$V$	voltaje en [V].
$x$	longitud característica .
$\lambda_{fg}$	entalpía de vaporización o de fusión en $\left[\frac{BTU}{lbm}\right]$ ó $\left[\frac{J}{kg}\right]$ .
$\sigma$	constante de Boltzman que es igual a $0.1713 \times 10^{-8} \left[\frac{BTU}{hr\ pie^2\ R^4}\right]$ $5.673 \times 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 K^4}\right]$ .
$\epsilon$	emitancia de cada superficie.
$\mu$	viscosidad dinámica del fluido de trabajo.
$\rho$	densidad del fluido en $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$ .
$\Delta t_e$	diferencia equivalente de temperatura en [°C].
$\Delta T_{em}$	dif. eq. temp a la hora considerada para muros al sol en [°C].

$\Delta T_{es}$  *dif. eq. tem a la hora considerada para los muros a la sombra en [°C].*

$\Delta T_{real}$  *diferencia de temperatura real en [°C].*

# ÍNDICE

<b>CAPÍTULO</b>	<b>PÁGINA</b>
<b>1. OBJETIVO</b>	<b>14</b>
1.1 Introducción	14
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	<b>15</b>
2.1 Historia del Sistema de Transporte Colectivo, Metro	15
2.2 Línea 12: Ampliación del Metro.	16
2.3 Red del Metro.	16
2.4 Costo y horario de servicio del Metro.	17
2.5 Parque vehicular.	17
2.5.1 Distribución de trenes.	17
2.5.2 Capacidad de pasajeros por tren.	18
2.6 Trenes del Metro.	18
2.6.1 Rodadura neumática.	18
2.6.1.1 Cuerpo del vagón del metro.	19
2.6.2 Trenes ferroviarios.	19
2.7 Funcionamiento de los vagones del Metro.	19
2.7.1 Motriz neumático.	20
2.7.2 Férreo.	20
2.8 Calor y transmisión de calor.	21
2.9 Confort térmico y los parámetros para su diseño.	23
<b>3. CONDICIONES DE PROYECTO</b>	<b>32</b>
3.1 Condiciones de proyecto exteriores para estaciones superficiales.	32
3.2 Condiciones de proyecto exteriores para estaciones subterráneas.	35
3.3 Condiciones de proyecto interiores para los vagones.	38
<b>4. CARGAS INTERIORES</b>	<b>39</b>
4.1 Intercambio de calor entre personas y su entorno.	39
4.2 Alumbrado.	42
<b>5. CARGAS EXTERIORES</b>	<b>44</b>
5.1 Estaciones superficiales.	46
5.1.1 Radiación solar directa y difusa.	46
5.1.2 Vidrio ordinario.	46
5.1.3 Ganancias por insolación de las superficies de vidrio.	47
5.1.4 Cristales.	51
5.1.5.1. Carga térmica a través de paredes y techos por influencia de la radiación solar.	56
5.1.6.2. Motores eléctricos.	71

5.2	Estaciones subterráneas.	77
6.	CARGA TOTAL	82
7.	VENTILACIÓN	85
8.	CONCLUSIONES	87
5.2	Recomendaciones.	91
9.	BIBLIOGRAFÍA	93

# Factores que deterioran el confort térmico en los vagones del Metro de la Ciudad de México.

## 1. OBJETIVO

Realizar un estudio térmico de un vagón en operación del Metro de la Ciudad de México con la finalidad de obtener los factores que deterioran el confort térmico.

### 1.1 Introducción.

El Metro de la Ciudad de México es uno de los sistemas de transporte más importantes y utilizados, transporta a más de 1,400 millones de pasajeros por 177 Km cada año.

Une a toda la Ciudad de México, permitiendo que personas que viven en los extremos puedan transportarse para realizar todas sus actividades.

Sin embargo, la gran demanda de transporte de pasajeros a través de la red provoca que las condiciones de confort térmico al interior de los vagones y los andenes no sea la deseable, la gran afluencia de pasajeros dentro de los vagones provoca un incremento en la temperatura del sitio y añadiendo que el flujo del aire dentro de los vagones no es suficiente, se provoca una sensación de incomodidad al viajar por la red, junto a esta falta de aire viene problemas de sofocación y desmayos en la cual, pasajeros ponen su vida en peligro.

Por lo que es importante encontrar los principales factores que deterioran las condiciones de confort térmico para después proponer sistemas para resolver el problema de la falta de aire en el metro y del aumento de temperatura en los vagones.

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1 Historia del Sistema de Transporte Colectivo, Metro.

El problema del transporte público y congestionamiento vial en el centro de la Ciudad de México a mitad del siglo XX, provocaba que en las horas pico la velocidad de la circulación de los transportes fuera menor a la de una persona caminando. Por lo cual, el Ingeniero Bernardo Quintana líder de la empresa Constructores Civiles y Asociados (ICA) presentó el proyecto de la construcción del Metro de la Ciudad de México, el decreto creó el Sistema de Transporte Colectivo con el propósito de construir, operar y explotar un tren rápido subterráneo para el transporte público del Distrito Federal.

Después de 33 años de desarrollo se obtiene un total de 201.3 [km] de vías dobles, 11 líneas en operación, 175 estaciones, 7 talleres de mantenimiento, más de 14 mil trabajadores y un promedio de 4.2 millones de usuarios transportados diariamente.

La construcción del Metro de la Ciudad de México Actual se realizó en 6 etapas:

- 1) Primera Etapa (19 de junio de 1967 al 10 de junio de 1972).

La primera etapa de construcción del Metro fue coordinada por el arquitecto Ángel Borja, dirigiendo entre 1,200 y 4,000 especialistas incluyendo el personal de asesoría técnica francesa, 48 mil obreros y 3 mil administradores, logrando terminar un kilómetro de vía del Metro por mes. En la primera etapa se logran construir 3 líneas con una longitud de 42.4 [km] y 48 estaciones.

- 2) Segunda etapa (7 de septiembre 1977 a finales de 1982).

En esta etapa se prolonga la línea 3 y se construyen las líneas 4 y 5 aumentando a 80 estaciones y 79.5 [km] de vías en 1982. La línea 4 es construida a 7.5 [m] sobre el nivel del suelo debido a la menor densidad de construcciones altas en la zona por lo que tuvo un costo mucho menor y la línea 5 se construye en 3 tramos combinando la edificación como de superficie y subterránea de tipo cajón.

- 3) Tercera etapa (Principios de 1983 a finales de 1985).

En esta etapa se amplían las líneas 1, 2 y 3, y se crean las líneas 6 y 7. La longitud de la red se incrementa en 35.2 [km] y el número de estaciones aumenta a 105 [km]. La línea 6 se construyó combinando la estructura tipo cajón y superficial, y la línea 7 por ser construida en la Sierra de las Cruces, a una altitud mayor, la construcción fue de tipo túnel profundo y se entregó en 3 tramos, su conclusión significó un incremento a la red de 13.1 [km] y 10 estaciones.

- 4) Cuarta Etapa (Inicia en 1985 y concluye en 1987).

En esta etapa se ampliaron las líneas 6 y 7, y se crea la línea 9. La ampliación de la línea 6 agregó 4.7 [km] y 4 estaciones a la red, la ampliación de la línea 7 incrementó la red con 5.7 [km] y 4 estaciones más. La línea 9, creada en 2 partes con construcciones de túneles tipo

circular profundo y tipo cajón, incorporó a la red 12 estaciones y 15.3 [km]; y tiene un trazo paralelo a la línea 1, con el propósito de descongestionarla, en las horas punta.

5) Quinta Etapa (Inició en 1988 y se terminó en 1994).

En esta etapa se construye la línea A, la cual es la primera extensión del Metro al Estado de México, es una red de superficie y trenes de ruedas férreas en lugar de neumáticos, ya que reducen los costos de construcción y mantenimiento, agregó diez estaciones y 17 [km] de longitud a la red. Al finalizar 1994, la red del Metro contaba ya con 178.1 [km] de longitud, 154 estaciones y diez líneas.

6) Sexta Etapa (Inicio en 1994 y se terminó en el año 2000).

En esta etapa se construye la línea B, cuenta con 23.7 [km] de longitud, donde 13.5 [km] están en el Distrito Federal y 10.2 [km] están en el Estado de México, tiene 21 estaciones: 13 en la capital y ocho en el Estado de México. La línea B está proyectada para movilizar diariamente a 600 mil usuarios. Al entrar en operación la línea B, la red en su conjunto se incrementó 13% para alcanzar 201.7 [km].

## 2.2 Línea 12: Ampliación del Metro.

El nuevo proyecto de ampliación del metro será la Línea 12, irá de Mixcoac a Tláhuac y cuenta con una inversión de 17 mil 583 millones de pesos. Beneficiará a más de 400 mil personas, reduciendo los viajes de 2 horas a 45 minutos y generará más de 25 mil empleos directos y 60 mil indirectos.

Como objetivo está la reducción de transportes contaminantes, ya que se dejaron de emitir 400 mil toneladas de dióxido de carbono al año, y un servicio de transporte rápido, eficiente, económico y seguro.

Se estima una demanda de más de 367,000 pasajeros en un día laborable.

Las características técnicas y operativas de la Línea 12 proyectadas son:

- 1) 24.5 kilómetros de línea.
- 2) 20 Estaciones.
- 3) Trenes:
  - a) Rodadura férrea.
  - b) 8 vagones.
  - c) 28 Trenes (al inicio de la operación intervalo de 3.9 minutos).
  - d) 35 Trenes (intervalo mínimo de 2.5 minutos en horas pico).
- 4) Alimentación de energía eléctrica:
  - a) Alta tensión 230 [kVA] (tarifa HT).

## 2.3 Red del Metro.

La red del Sistema de Transporte Colectivo Metro consta de 11 líneas con 175 estaciones.

Tabla 1. Número de líneas, estaciones y longitud de la línea de la red del Metro.

Línea	Número de estaciones	Longitud de la línea en [km]
1	20	18.828
2	24	23.431
3	21	23.609
4	10	10.747
5	13	15.675
6	11	13.947
7	14	18.784
8	19	20.078
9	12	15.375
A	10	17.192
B	21	23.722

## 2.4 Costo y horario de servicio del Metro.

El horario de servicio es clasificado por el tipo de día, los días laborales el servicio es de las 5:00 a las 24:00 horas, los sábados de las 6:00 a las 24:00 horas y los domingos y días festivos de las 7:00 a las 24:00 horas.

El costo del boleto es de \$3.00, con excepción de las personas mayores de 60 años y capacidades diferentes para las cuales el servicio es gratuito.

## 2.5 Parque vehicular.

El Sistema de Transporte Colectivo Metro tiene un parque vehicular de 355 trenes, donde 322 son de rodadura neumática de los cuales 291 son de 9 vagones y 31 son de 6 vagones, además se tiene 33 trenes de rodadura férrea de 6 vagones y 39 vagones libres.

El parque vehicular está integrado por 13 modelos: 2 férreos y 11 neumáticos. Se distinguen 2 tipos de tecnología en su fabricación: 30% cuenta con frenado de tipo electromecánico JH (árbol de levas) y el 70% de frenado con semiconductores y control electrónico, lo que permite aumentar la fiabilidad y reducir los costos de operación y mantenimiento, debido a que tienen mayor eficiencia en la recuperación de energía durante la etapa de frenado eléctrico.

### 2.5.1 Distribución de trenes.

Para cubrir la demanda del servicio en horas punta se ponen en operación 253 trenes, 14 trenes son enviados a mantenimiento sistemático, 8 trenes en mantenimiento mayor, 4 en rehabilitación, 5 en proyectos especiales y los restantes se dejan disponibles para su explotación.

Tabla 2. Distribución de los trenes en cada línea.

Línea	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	Total
Trenes	51	45	58	13	17	18	26	29	33	33	32	355

La redistribución del parque vehicular varía la cantidad de trenes por línea dependiendo de las necesidades del servicio.

### 2.5.2 Capacidad de pasajeros por tren.

La capacidad de pasajeros dependiendo de la configuración del tren es la siguiente:

Tabla 3. Capacidad de cada tren del Sistema de Transporte Colectivo Metro.

Vagones por tren	Capacidad pasajeros		Total pasajeros
	Sentados	Parados	
6	240	780	1020
9	360	1170	1530

## 2.6 Trenes del Metro.

Los trenes del Sistema de Transporte Colectivo pueden ser clasificados por el tipo de su rodadura, los de rodadura neumática y los de rodadura férrea.

### 2.6.1 Rodadura neumática.

Los trenes de rodadura neumática del Sistema de Transporte Colectivo tienen una configuración 6 y 9 vagones.

Los trenes de 9 vagones se conforman por:

- 1) 6 Vagones motrices, es decir, con tracción propia, son estos 6 vagones los que arrastran al tren.
- 2) 3 Vagones remolques, no tienen tracción propia.

Los trenes de 6 vagones se conforman por:

- 1) 4 Vagones motrices.
- 2) 2 Vagones remolque.

La configuración de los trenes de 6 a 9 vagones cambia dependiendo la demanda.



Dónde:

M: Carros motrices con cabina de conducción y tracción propia.

N: Carros motrices con tracción propia y sin cabina de conducción.

R: Carros remolques.

PR: Carro remolque central con equipo de sistema de pilotaje automático.

Figura 1. Configuración de los vagones para los trenes de 9 y 6 vagones de rodadura neumática.

### 2.6.1.1 Cuerpo del vagón del metro.

El lugar donde viajan los pasajeros se llama caja y va montada sobre dos carretillas portadoras llamadas boguies. En los vagones motrices, cada boguie está equipado con dos motores de tracción. Los vagones motrices toman la corriente de la barra guía cargados con 750 [V] mediante las escobillas situadas entre las dos ruedas de cada boguie.

Bajo la caja de los vagones remolques está instalado:

- 1) El compresor: Produce aire a presión para el frenado neumático y cierre de puertas.
- 2) Motogenerador: Genera corriente a 250 [V] de Alterna, utilizada para el alumbrado de los carros.  
\*El compresor y el motogenerador trabajan con corriente de 750 [V] que es proporcionada por el carro motriz N.
- 3) Banco de Baterías: Genera corriente a 72 [V], utilizada para los circuitos de mando del tren.
- 4) En el remolque central está instalado el captor de pilotaje automático.

### 2.6.2 Trenes ferroviarios.

Los trenes ferroviarios, es decir, que no tiene llantas sino rodaduras de acero integrados al vagón, están integrados por 6 vagones de los cuales 4 son motrices y 2 son remolques. Uno de los remolques tiene el sistema de pilotaje automático.



Dónde:

M: Carros motrices con cabina de conducción y tracción propia.

N: Carros motrices con tracción propia y sin cabina de conducción.

R: Carros Remolques.

PR: Carro Remolque Central con equipo de sistema de pilotaje automático.

Figura 2. Configuración de los vagones para los trenes 6 vagones de rodadura de acero.

Las ruedas metálicas son de acero forjado y además de permitir el movimiento realizan la función de guiar al tren y permiten el frenado del tren.

## 2.7 Funcionamiento de los vagones del Metro.

El funcionamiento del vagón del metro se clasifica en 2:

- Motriz neumático
- Motriz férreo.

### 2.7.1 Motriz neumático.

Las llantas que portan a los vagones están fijas en los extremos de los ejes situados en los boguies. Al interior de cada llanta hay una rueda de acero de seguridad, para que en caso de pinchadura, haga contacto con un riel de seguridad, que está paralelo a la pista de rodamiento para los neumáticos que sirve como sostén del peso del vagón, asegurando que siga la trayectoria en las vías.

El boguie tiene además 4 ruedas pequeñas que están perpendiculares a las llantas portadoras, están fijas a las extremidades del chasis del boguie. Estas ruedas se apoyan sobre la barra guía para mantener el vagón en el centro del carril de rodamiento, amortiguando los movimientos laterales.

El sistema de frenado es para cada rueda, tiene zapatas de madera tratada, que al hacer presión sobre la banda de rodamiento de las ruedas provocan que pare. Esta presión es a través de aire comprimido.



Figura 3. Vagón motriz neumático.

### 2.7.2 Férreo.

En los trenes tipo férreos, cada vagón esta sobre dos carretillas que tiene dos ejes y en sus extremos están fijas dos ruedas metálicas que ruedan sobre rieles ferroviarios metálicos, las ruedas sirven de soporte para la carga del vehículo y para guiar los trenes y desplazarlos.

El sistema de frenado de las carretillas es por aire comprimido, a través de frenos de disco en cada eje.

La alimentación de los carros motrices es por el pantógrafo (montado en los techos de los carros) el cual se mantiene en contacto durante el movimiento de los trenes con el hilo de contacto de la catenaria, que es el sistema de alimentación, conformada por 7 hilos sujetos a péndulos y arneses que fijan a postes a lo largo de la línea.



Figura 4. Vagón férreo.

## 2.8 Calor y transmisión de calor.

El calor es una forma de energía que está contenida en cualquier porción de materia, dependiendo de la naturaleza de la materia la intensidad de calor puede variar y ser medida como temperatura.

Las unidades del calor pueden ser:

- 1) Una British Thermal Unit [BTU]: es la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1 [°F] la temperatura de 1 [lb] de agua a presión atmosférica.
- 2) Un Kilogramo Caloría [kcal]: es la cantidad de calor necesaria para aumentar en 1 [°C] la temperatura de 1 [kg] de agua.
- 3) Un Joule [J]: es la energía producida por la fuerza de un Newton al moverse a lo largo de una distancia de un metro.

El calor puede ser latente o sensible, el calor latente es la energía en forma de calor que se necesita para producir un cambio de estado en la sustancia.

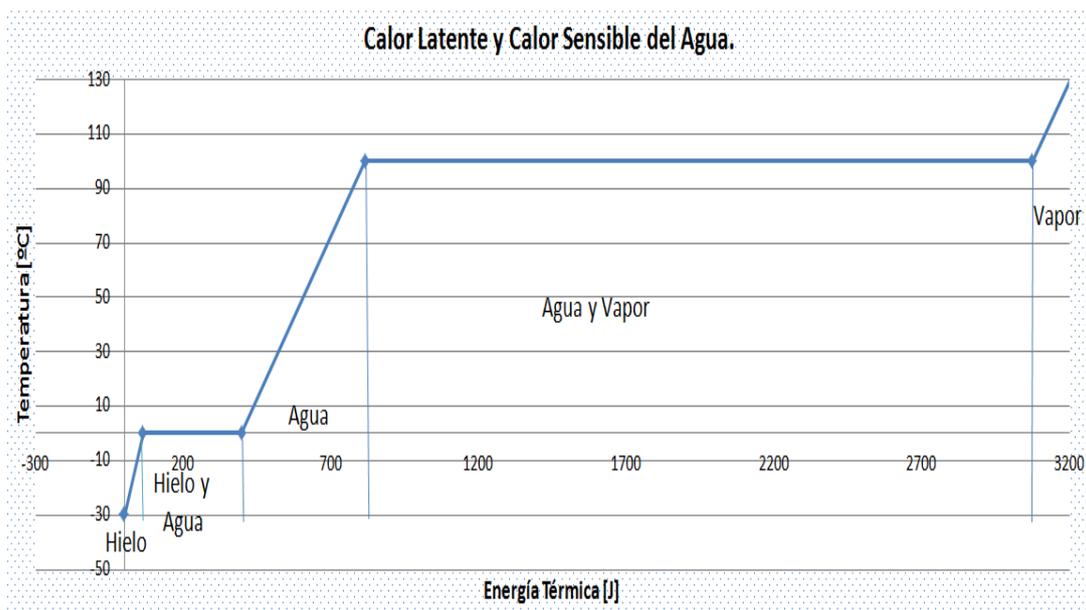
Y se calcula como:

$$\dot{q}_{latente} = \dot{m}\lambda_{fg}$$

El calor sensible es el cambio de intensidad de energía en forma de calor que está presente en un solo estado físico de la sustancia y se puede sentir por un cambio de temperatura.

Y se calcula como:

$$\dot{q}_{sensible} = \dot{m}c_p(T_2 - T_1)$$



Gráfica 1. Calor latente y calor sensible del agua. En el calor latente coexisten 2 fases del agua. En el calor sensible existe una sola fase del agua.

El calor puede transmitirse por conducción, convección y radiación térmica.

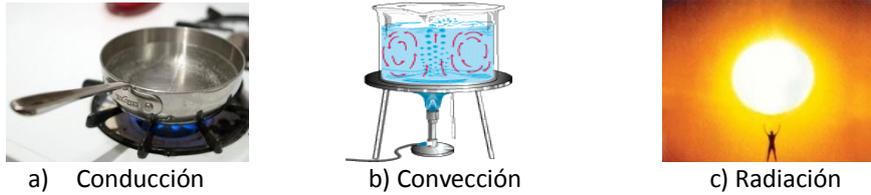


Figura 5. Los 3 métodos de transferencia de calor: a) conducción, b) convección y c) radiación.

La conducción térmica es la transferencia de calor por contacto de las moléculas de la sustancia, ya sea por el interior de un cuerpo, o de un cuerpo a otro.

La ecuación de Fourier expresa la conducción en régimen permanente en una dimensión:

$$\dot{q}_{\text{conducción}} = -kA_n \frac{dT}{dx}$$

Gráfica 2. Transferencia de calor a través de un muro plano.

La ecuación lleva un signo negativo debido a que mientras avanzamos en la dirección  $x$  el  $\frac{dT}{dx}$  es negativo.

Cada sustancia puede transmitir una cierta cantidad de calor a través de la misma, esta propiedad se llama conductividad térmica y se mide en una unidad de superficie y de espesor, en la unidad de tiempo y por grado de diferencia de temperatura.

La conductividad térmica en unidades del Sistema Internacional se mide en  $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$ , y en unidades Inglesas  $\left[\frac{BTU}{hr \cdot pie \cdot ^\circ F}\right]$ .

La resistencia térmica es numéricamente el valor recíproco de la conductancia térmica, coloquialmente podríamos decir que mientras la conductancia es la capacidad de transmitir energía en forma de calor, la resistencia térmica es la capacidad de la sustancia de oponerse al paso de energía en forma de calor.

La convección transmite el calor a través del flujo de corriente de un fluido. La cantidad de calor que se transmite por unidad de tiempo está afectada por la velocidad del fluido, por el área y forma de la superficie, y por el cambio de temperatura.

La transferencia de calor por convección se calcula como:

$$\dot{q}_{convección} = hA(T_{\infty} - T_s)$$

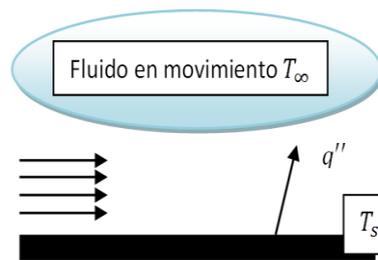


Figura 6. Convección de calor de una superficie a un fluido en movimiento.

La radiación transmite el calor de un cuerpo a otro mediante movimiento de ondas electromagnéticas.

La ecuación de la transferencia de calor por radiación es:

$$\dot{q}_{radiación} = \sigma \epsilon F A (T_1^4 - T_2^4)$$

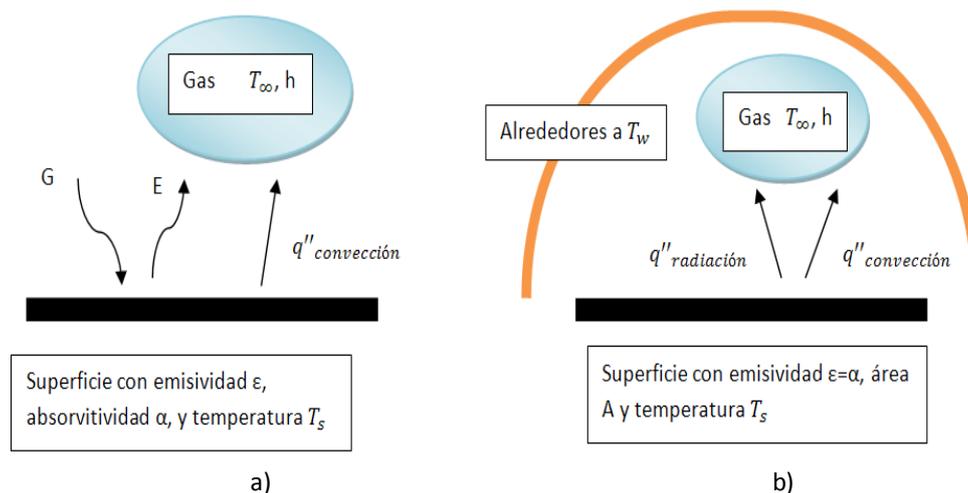


Figura 7. Transferencia de calor por radiación: a) en la superficie, b) de la superficie con sus alrededores.

Cuando los cuerpos presentan calentamiento y enfriamiento tienen una ganancia o pérdida de calor que es proporcional al cambio de temperatura entre el cuerpo y los alrededores, a este proceso se le llama Ley de Enfriamiento de Newton.

## 2.9 Confort térmico y los parámetros para su diseño.

Si esta transferencia de calor que está en permanente interacción con el cuerpo humano es muy alta provoca una sensación de incomodidad, es por eso que se crearon equipos que lleven las condiciones ambientales a unas condiciones de confort térmico.

El confort térmico según la Norma ISO 7730, se define como una condición mental que expresa la satisfacción del cuerpo con el ambiente térmico.

La experiencia a través del tiempo demostró que solo un conjunto de condiciones ambientales no proporcionan pleno confort a toda la gente que esté en un recinto.



Figura 8. No todos sentimos la misma sensación de confort al estar en una misma condición de temperatura y humedad.

Pero controlando 4 factores se puede dar confort a la mayoría de la gente, esos factores son:

- 1) La Temperatura.
- 2) La Humedad.
- 3) El Movimiento de aire.
- 4) Las fuentes radiantes que interactúan con los ocupantes del recinto.

El cuerpo humano genera calor y lo disipa, este flujo de calor depende de la actividad, edad, talla corporal y género de la persona.

El cuerpo humano disipa el calor ya que debe de mantenerse en promedio a una temperatura interna de  $36.9\text{ [}^{\circ}\text{C]}$  independientemente de las condiciones ambientales.

El medio donde se encuentran las personas está inmerso en una mezcla compuesta de aire y vapor de agua.

El vapor es una sustancia que se encuentra en estado gaseoso pero que no sigue las leyes de los gases. El vapor puede presentarse como:

- 1) Vapor saturado seco: vapor sin partículas líquidas.
- 2) Vapor saturado húmedo: vapor con partículas líquidas en suspensión.
- 3) Vapor recalentado: vapor con una temperatura mayor al punto de ebullición que corresponde a la presión con que está sometido.

El aire atmosférico es una mezcla de aire seco y vapor de agua. El aire seco está compuesto por oxígeno, nitrógeno, argón, dióxido de carbono, hidrógeno y gases inertes.

El aire atmosférico puede considerarse un gas ideal y sigue las leyes de los gases.

La cantidad de vapor de agua que tenemos en el aire se llama humedad y la podemos determinar como:

- 1) Humedad absoluta: es el peso real del vapor de agua en el aire atmosférico.
- 2) Humedad específica: es el peso real de vapor de agua por cada unidad de aire seco.

- 3) Humedad relativa: nos relaciona la presión parcial, el peso específico o la cantidad de humedad de un volumen real del vapor de agua, con la presión, el peso específico y la humedad de un volumen de vapor de saturación a la temperatura de bulbo seco.

El aire que puede retener la máxima cantidad posible de vapor de agua a una temperatura dada se llama aire saturado, si la temperatura del aire baja, el vapor se condensará.

Para medir la temperatura del aire atmosférico se toman como medidas:

- 1) Temperatura de bulbo seco que es la temperatura del aire medida por un termómetro al cual no le afecta la humedad de aire.
- 2) Temperatura de bulbo húmedo que es la temperatura que corresponde a la saturación adiabática, esta es la temperatura mínima que indica el termómetro de bulbo húmedo cuando se expone a una corriente de aire.
- 3) Temperatura de punto de rocío que es la temperatura la cual, el aire húmedo debe de alcanzar al enfriarse para llegar a la saturación y comenzar a condensarse.

La entalpía en una mezcla de aire y vapor de agua se compone por el calor sensible del aire y el calor latente de vaporización de la humedad del vapor del aire.

La entalpía es constante para cada temperatura de bulbo húmedo aunque se presenten cambios en la temperatura de bulbo seco.

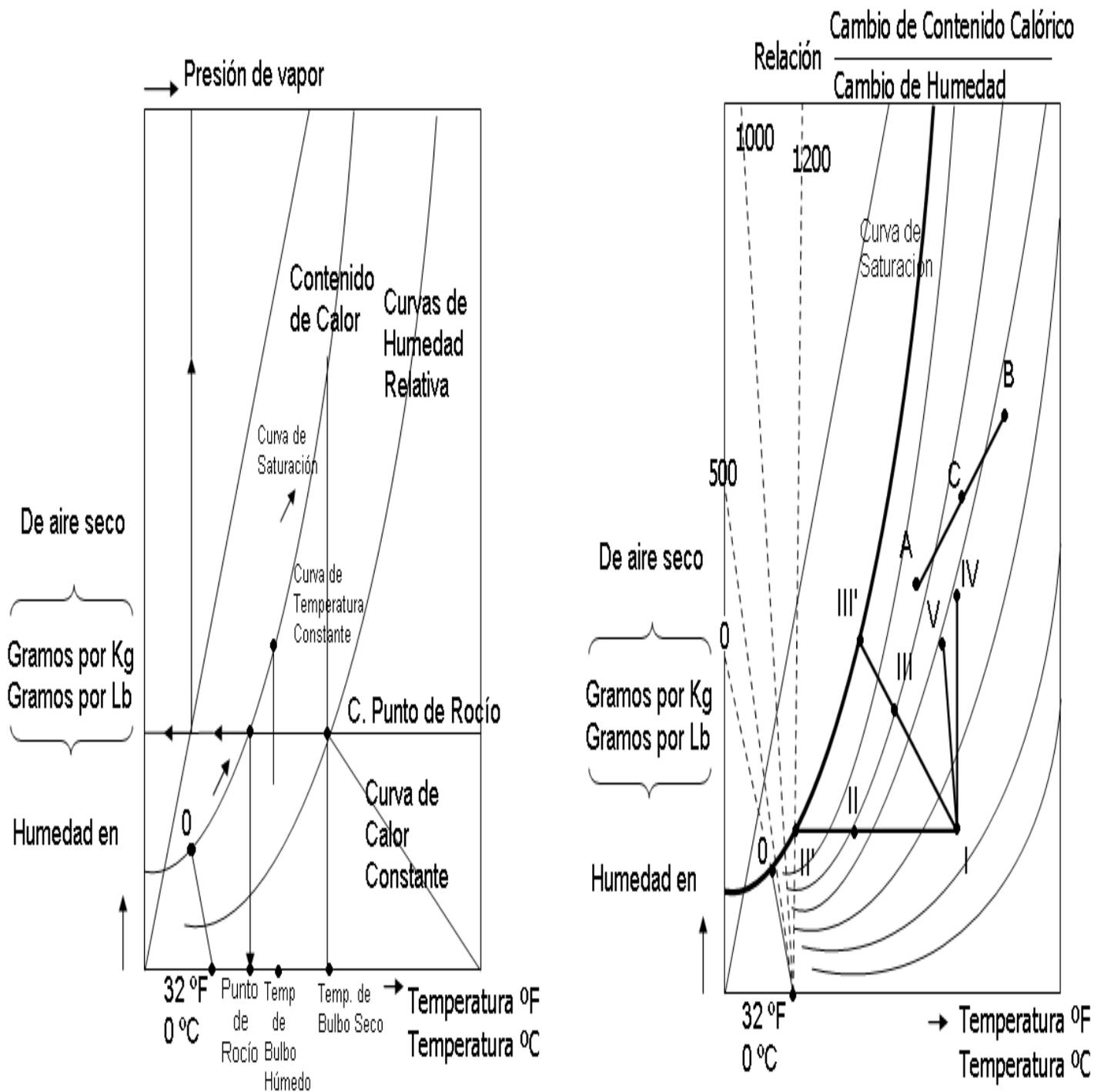
Para poder señalar y graficar los procesos de enfriamiento, calentamiento, humidificación o des-humidificación se usa la gráfica de humedad o carta psicrométrica.

Esta gráfica nos relaciona:

- 1) Temperatura de bulbo seco.
- 2) Temperatura de bulbo húmedo.
- 3) Punto de rocío.
- 4) Humedad relativa.
- 5) Humedad específica.
- 6) Presión de vapor.
- 7) Entalpía.

Conocidos estos factores se pueden hallar los restantes:

- 1) Curvas de temperatura.
- 2) Curvas de entalpía constante (con temperatura de bulbo húmedo constante).
- 3) Curvas de humedad relativa.
- 4) Curvas de punto de rocío (humedad constante)



Cambio de las condiciones de aire.	Representación en la carta psicrométrica.	Observaciones.
Enfriamiento a humedad constante.	De I a II.	Temperatura del punto de rocío en la intersección II', con la curva de saturación.
Cambio adiabático.	De I a III, saturación en III'.	No se añade ni quita calor.
Temperatura constante.	De I a IV.	-

Gráfica 3. Carta psicrométrica.

Es importante como condición de diseño analizar la interacción de los seres vivos con el sistema y su aportación en la transferencia de calor.

Una de las interacciones del ser humano con las condiciones del sistema importantes de analizar es la respiración. Un ser humano adulto que está descansando respira 16 veces por minuto, que equivale aproximadamente a  $0.5 \left[ \frac{m^3_{aire}}{hr} \right]$ , y si está activo consume 3 o 6 veces más.

La composición del aire que expira es:

- 1) Oxígeno: 16.5%.
- 2) Anhídrido carbónico: 4%.
- 3) Nitrógeno y Argón: 79.5%.

Durante 24 horas el adulto expira 1 kilogramo de anhídrido carbónico.

En cuanto al calor que proviene del interior del cuerpo humano es producido gracias a la combustión de los alimentos. Este calor del cuerpo se pierde por:

- 1) Conducción y convección: 25%.
- 2) Radiación: 43%.
- 3) Evaporación: 30%.
- 4) El aire expirado: 2%.

Si la temperatura en el interior del cuerpo humano es elevada, el proceso que prevalece es la evaporación, mientras si la temperatura es pequeña el proceso que prevalece es la conducción y convección.

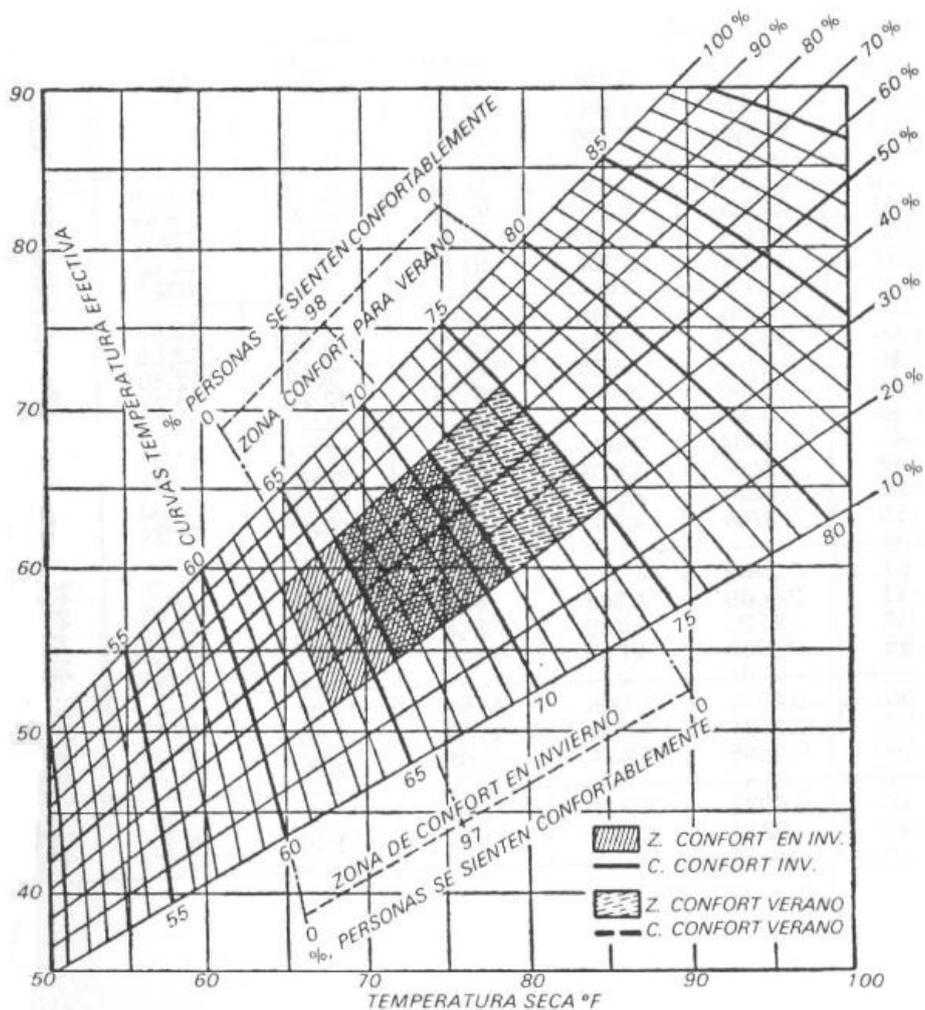
El cuerpo siempre debe de mantenerse a una temperatura promedio de  $36.9 [^{\circ}C]$  por lo que el cuerpo cede el calor al ambiente para poder mantenerse.

Cuando una persona adulta se encuentra a temperatura ambiente de  $18 [^{\circ}C]$  a  $30 [^{\circ}C]$  la pérdida de calor total (sensible y latente) es de  $117 [W]$ .

Las condiciones confortables del aire para el ser humano son:

- 1) Temperatura óptima en invierno:  $18 [^{\circ}C]$  a  $20 [^{\circ}C]$ .
- 2) Temperatura óptima en verano:  $20 [^{\circ}C]$  a  $22 [^{\circ}C]$ .
- 3) Humedad relativa óptima: 40% a 60%.

Pero existe condiciones termo-equivalentes las cuales son combinaciones de temperatura, humedad y movimiento del aire que producen la misma sensación de confort que las óptimas.



Esta gráfica sirve para velocidades del aire hasta  $25 \left[ \frac{pie}{min} \right]$  (e.d. prácticamente aire quieto). Para una velocidad de  $100 \left[ \frac{pie}{min} \right]$  la temperatura efectiva disminuye en  $2[^\circ F]$ .

Gráfica 4. Gráfica de zona de confort que relaciona la temperatura efectiva con la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, así como con la humedad relativa. Esta gráfica sirve para una velocidad de  $25 \left[ \frac{pie}{min} \right]$  que se considera un aire quieto, para velocidades de aire mayor de  $100 \left[ \frac{pie}{min} \right]$  la temperatura efectiva disminuye  $2 [^\circ F]$ .

Para medir la temperatura efectiva, la cual indica el grado de calor o frío que experimenta el cuerpo humano a una temperatura, humedad o movimiento del aire que es equivalente a una sensación con aire quieto, saturado que produce confort además de la velocidad de aire, se utiliza el termómetro de Kata, el cual es un termómetro de alcohol que esta graduado entre 95 y 100  $[^\circ F]$  y el cual debe ser calentado a más de 100  $[^\circ F]$  y medir el tiempo en que se enfría a 95  $[^\circ F]$ . El tiempo medido va en relación a una escala que estima el efecto que tiene el aire como refrigerante.

Otro instrumento que determina la humedad relativa y el punto de rocío con la medición de la temperatura de bulbo seco y la de bulbo húmedo al ponerse en contacto con una corriente de aire se llama psicrómetro.

El movimiento del aire provoca que las condiciones de temperatura y humedad provoquen un ambiente más frío. El aire se considera frío a una velocidad de 25 pies por minuto. El leve movimiento de aire elimina el aire caliente y húmedo que rodea el cuerpo humano. A mayor temperatura y humedad relativa se necesita mayor movimiento del aire.

Para mantener en un espacio determinado las condiciones de confort se debe instalar un equipo de confort de capacidad adecuada y que mantenga su control durante todo el año. Esta capacidad va de acuerdo con la máxima carga real o efectiva para un instante dado. Es imposible encontrar la carga máxima real por lo que se debe hacer una estimación de esta carga de acuerdo con lo siguiente:

1. La ganancia o pérdida de calor es el calor que sale o entra de nuestro espacio a acondicionador en un instante dado.
2. La carga real o efectiva es la cantidad de calor añadida o eliminada por el equipo en un instante dado.

Rara vez la ganancia y la carga real de calor serán iguales ya que en las estructuras de los edificios hay acumulación de calor.

Para una estimación apegada a la realidad de las cargas térmicas se debe hacer un estudio riguroso de todas las componentes de la carga en el espacio determinado. Este estudio debe ser completo y preciso basado en planos arquitectónicos y mecánicos. Se deben considerar:

- 1) Orientación del espacio respecto a puntos cardinales debido al efecto del sol y viento.
- 2) Estructuras próximas por efecto de sombra.
- 3) Superficies reflejantes, como el agua, arena y estacionamientos.
- 4) Destino del espacio para ver en que va a ser utilizado.
- 5) Dimensiones del espacio largo, ancho y alto.
- 6) Distancia de suelo a techo.
- 7) Materiales y espesor de paredes, techos y suelos.
- 8) Color exterior de las paredes y techos.
- 9) Sombra proyectada por estructuras próximas.
- 10) Luz solar.
- 11) Espacios ventilados.
- 12) Tipo de suelo, tierra, levantado o subterráneo.
- 13) Ventanas: sus dimensiones, los materiales de los marcos y el tipo de cristal.
- 14) Ocupantes: número de ocupantes, tiempo de ocupación, actividades que realizan.
- 15) Alumbrado: potencia del alumbrado en la hora punta, el tipo de alumbrado.
- 16) Motores: datos de placa de los motores, potencia nominal y empleo y frecuencia de uso. Potencia consumida.
- 17) Equipo electrónico: un equipo electrónico exige su propio acondicionamiento de aire, por lo que se deben exigir las instrucciones del fabricante en cuanto a variaciones de humedad y temperatura.
- 18) Ventilación: metros cúbicos por persona o por metro cuadrado que se está ventilando.
- 19) Humo y olores. Extractores de humo, tipo, tamaño, velocidad y caudal.
- 20) Almacenamiento térmico: horario de funcionamiento del espacio y variación de la temperatura en el espacio durante el día.

## 21) Funcionamiento continuo o intermitente del sitio.

La información para seleccionar y distribuir el sistema de confort y distribución de agua y aire debe de contener.

- 1) Espacios disponibles.
- 2) Posibles obstrucciones: conexiones eléctricas, cañerías y conductos.
- 3) Entrada de aire exterior: dirección del viento, suciedad y desvío de contaminantes nocivos y bloqueo de otras estructuras.
- 4) Suministro de energía eléctrica, capacidad, limitaciones de corriente, tensión, fases, frecuencias y formas de incrementar la energía.
- 5) Suministro de agua: tuberías, presión, temperatura máxima.
- 6) Salidas del aire que se va a impulsar.
- 7) Equipo y conductos de aire existentes para poder emplearlos.
- 8) Resistencia del espacio.

La estimación de la carga sirve de base para seleccionar el equipo de confort. Se toma en cuenta el calor procedente del exterior y el calor que se genera del interior en un día de proyecto.

En un día de proyecto se debe de tener que:

- 1) Temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo, alcanzan el valor de máximo simultáneamente.
- 2) Apenas exista niebla en el aire.
- 3) Todas las cargas internas trabajan normalmente.

Existen dos tipos de cargas, las interiores y las exteriores, las cargas exteriores abarcan:

- 1) Rayos del sol que entren por las ventanas. Carga solar a través del cristal.
- 2) Para reducir la ganancia solar se pueden usar pantallas en el interior o se pueden agregar salientes.
- 3) Rayos del sol que inciden sobre las paredes y el techo. Esto se debe a que la temperatura del exterior es mayor que la temperatura del interior provocando que haya un flujo de calor a través de las ventanas, techos y pisos.
- 4) Temperatura del aire exterior.
- 5) Viento que sopla contra las paredes del espacio. El viento provoca que el aire más caliente del exterior se infiltre al interior y hay una ganancia del calor sensible y latente.
- 6) Aire exterior necesario para la ventilación. Se necesita aire exterior para renovar el aire interior y quitar los olores.
- 7) A este aire se le necesita quitar el calor y la humedad.

Las cargas internas provienen de las siguientes fuentes:

- 1) Personas: el metabolismo del cuerpo humano genera calor en el interior y cede este calor por radiación, convección y evaporación. Este calor depende de la temperatura ambiente y la actividad que desarrolle la persona.

- 2) Alumbrado. La iluminación convierte la energía en calor y luz y el calor radiante se almacena en las estructuras de nuestro espacio.
- 3) Máquinas eléctricas: una carga muy importante proviene de los motores eléctricos, es por eso que se debe de hacer un análisis con respecto a las horas de trabajo y capacidades del motor.
- 4) Diversas fuentes de calor: son todas las fuentes de calor y humedad dentro del espacio.
- 5) Ganancia de calor del equipo de confort como bombas y ventiladores.

Los cálculos de la carga térmica se relaciona con los kilogramos de aire necesario es por eso que al ascender se reduce la densidad del aire y se debe aumentar el volumen necesario.

El peso de aire necesario para satisfacer la carga latente disminuye a causa de la mayor capacidad de carga latente del aire a grandes alturas.

A grandes alturas sobre el nivel del mar, la temperatura de bulbo húmedo desciende excepto en saturación pero la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa permanecen constantes.

Los cálculos a grandes altitudes se deben de hacer con correcciones. El contenido de la humedad del aire ambiente debe de ajustarse a la altura. Solo se afectan los cálculos referentes a volumen de aire o calor latente y sensible que deben multiplicarse por la densidad relativa del aire a la altura correspondiente. A mayor contenido de humedad del aire el factor de calor sensible debe ser corregido.

Después de la evaluación de la carga debe elegirse el equipo cuya capacidad sea suficiente para neutralizar esta carga.

# 3. CONDICIONES DE PROYECTO

Las condiciones de proyecto nos ayudan a determinar el contenido de calor del aire al interior y al exterior de nuestro recinto, están ligadas directamente a la capacidad del equipo de acondicionamiento y se calculan para verano e invierno dependiendo de la aplicación.

El Sistema de Transporte Colectivo metro, debido a la gran carga térmica que almacena en los vagones se debe analizar para obtener confort en verano ya que en la época de invierno las condiciones están dentro del rango de confort, y si aumenta la afluencia de personas se eleva la temperatura y humedad relativa provocando sensaciones de calor e incomodidad.

Las condiciones normales de proyecto para verano son condiciones recomendables para aplicaciones de confort y refrigeración industrial en las que es tolerable que se sobrepasen las condiciones ambientales de proyecto. Consisten en que:

1. Puede haber una simultaneidad de valores fijadas para temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo húmedo y humedad relativa.
2. Pueden sobrepasarse los valores en algunas temporadas del año pero en cortos periodos de tiempo.
3. Cuando la temperatura de bulbo húmedo es menor a la de proyecto, la temperatura de bulbo seco tiende a rebasarse más que la temperatura de bulbo húmedo.

Para el cálculo de las condiciones normales de proyecto se debe obtener el margen de variación diurna, el cual es la diferencia media entre las temperaturas máximas y mínimas de bulbo seco durante un periodo de 24 horas y depende de las condiciones climatológicas del lugar, y la oscilación anual de temperatura que representa la diferencia entre temperaturas de bulbo seco en verano e invierno, aplicándoles un factor de corrección podemos conocer nuestras condiciones normales de proyecto para cualquier hora y época de año.

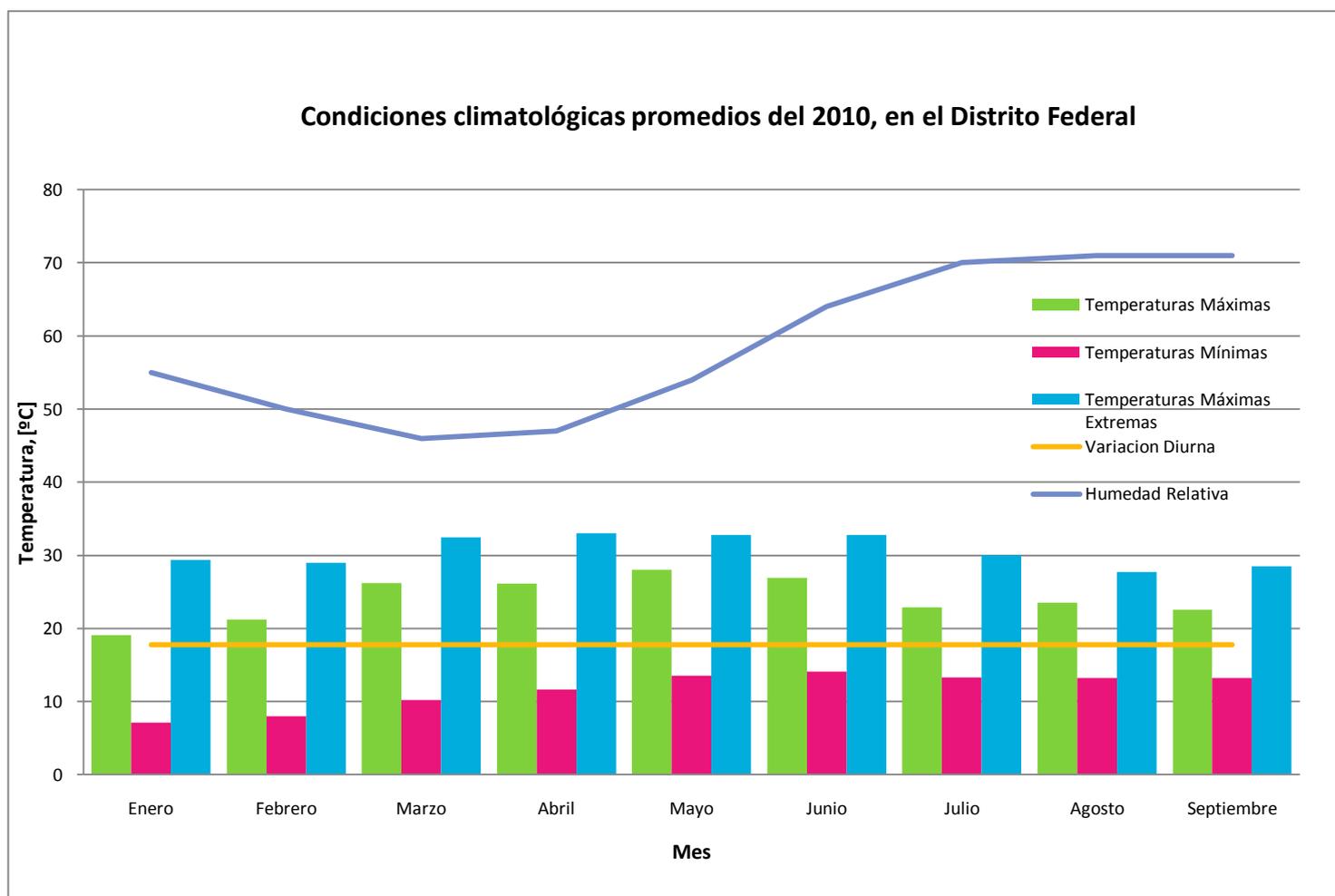
Para el cálculo de las condiciones de proyecto de la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo del metro se deben de clasificar en 2 tipos:

- I. Líneas superficiales: serán aquellas en las que los trenes viajen al aire libre.
- II. Subterráneas: serán aquellas estaciones en las que los trenes viajen dentro de un túnel por debajo del nivel del suelo.

## 3.1 Condiciones de proyecto exteriores para estaciones superficiales.

Para el cálculo de las condiciones de proyecto de las estaciones superficiales se tomaron datos de temperatura y humedad en el año 2010 en el Distrito Federal, que registró la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Datos climatológicos del 2010 para el Distrito Federal tomados de la CONAGUA.



Gráfica 5. Condiciones climatológicas de la Ciudad de México en el año 2010. (CONAGUA)

Tabla 4. Temperaturas máximas extremas de la Ciudad de México en el año 2010.

Temperaturas máximas extremas promedios 2010										Promedio
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	
[°C]	29.4	29	32.5	33	32.8	32.8	30	27.7	28.5	30.6

Tabla 5. Humedad relativa de la Ciudad de México en el año 2010.

Humedad relativa										Promedio
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	
[%]	55	50	46	47	54	64	70	71	71	58.7

Tabla 6. Temperaturas máximas de la Ciudad de México en el año 2010.

Temperaturas máximas promedios 2010										Promedio
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	
[°C]	19.1	21.2	26.2	26.1	28	26.9	22.9	23.5	22.6	24.1

Tabla 7. Temperaturas mínimas de la Ciudad de México en el año 2010.

Temperaturas mínimas promedios 2010										Promedio
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	
[°C]	7.1	8	10.2	11.6	13.5	14.1	13.3	13.2	13.2	11.6

El intervalo de variación diurna se obtiene de la diferencia entre las temperaturas máximas y mínimas promedios para el año 2010.

$$IVD = (T_{M\acute{a}x \text{ Promedio}} - T_{M\acute{i}n \text{ Promedio}})$$

Tabla 8. Intervalo de variación diurna de la Ciudad de México en el año 2010.

Intervalo de variación diurna										Promedio
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	
[°C]	12	13.2	16	14.5	14.5	12.8	9.6	10.3	9.4	12.5

La oscilación anual de temperaturas se calculó con los datos de las temperaturas para verano e invierno.

$$OAT = (T_{media \text{ verano}} - T_{media \text{ invierno}})$$

Obteniendo como datos promedio:

Tabla 9 y 10. Intervalo de variación diurna y oscilación anual de temperatura de la Ciudad de México.

Intervalo de variación diurna, [°C]
12.5

Oscilación anual de temperatura, [°C]
24.0

Tabla 11. Condiciones normales de verano de la Ciudad de México.

Condiciones normales verano					
Temperatura de bulbo seco [°C]	Humedad relativa %	Variación diurna	Temperatura de bulbo húmedo [°C]	Oscilación anual de temperatura [°C]	Temperatura promedio máxima exterior [°C]
24.1	58.7	12.5	17.8	24	30.6

Correcciones en las condiciones de proyecto en función de las horas del día y del mes del año.

Tabla 12. Correcciones en las temperaturas de proyecto en función de la hora deseada.

Correcciones en las temperaturas de proyecto en función de la hora deseada (para el cálculo de la carga de refrigeración)												
Intervalo de variación diaria de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Hora solar										
		6	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24
12,5	Bulbo seco	-11.3	-8.4	-5.5	-2.8	-0.5	0	-0.5	-1.7	-4.1	-6.5	-9.5
	Bulbo húmedo	-2.8	-2.2	-1.6	-0.5	0	0	0	-0.5	-1.1	-1.7	-2.5

Tabla 13. Correcciones en las condiciones de proyecto en función del mes considerado.

Correcciones en las condiciones de proyecto en función del mes considerado (para el cálculo de la carga de refrigeración)										
Oscilación de variación anual de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Mes								
		Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Menor a 25	Bulbo seco o	-1.5	-1.1	-1	-0.5	0	0	-1.1	-1.9	-3.2
	Bulbo húmedo	-1.3	-1	-0.4	0	0	0	-0.5	-1	-1.2

Tabla 14. Temperaturas de proyecto en función de la hora deseada para la Ciudad de México.

Temperaturas de proyecto en función de la hora deseada (para el cálculo de la carga de refrigeración)												
Intervalo de variación diaria de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Hora solar										
		6	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24
12,5	Bulbo seco o	12.8	15.7	18.6	21.3	23.6	24.1	23.6	22.4	20.0	17.6	14.6
	Bulbo húmedo	15.0	15.6	16.2	17.3	17.8	17.8	17.8	17.3	16.7	16.1	15.3

\*Sin aplicar el factor de corrección por mes.

Tabla 15. Temperaturas de proyecto en función del mes considerado para la Ciudad de México.

Condiciones de proyecto en función del mes considerado (para el cálculo de la carga de refrigeración) para el Distrito Federal										
Oscilación de variación anual de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Mes								
		Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre
Menor a 25	Bulbo seco o	22.6	23.0	23.1	23.6	24.1	24.1	23.0	22.2	20.9
	Bulbo húmedo	16.5	16.8	17.4	17.8	17.8	17.8	17.3	16.8	16.6

\*Sin aplicar el factor de corrección por hora deseada.

Para cada hora del día en cualquier mes del año es necesario sumar la corrección de hora día, con las correcciones del mes a las condiciones normales de verano.

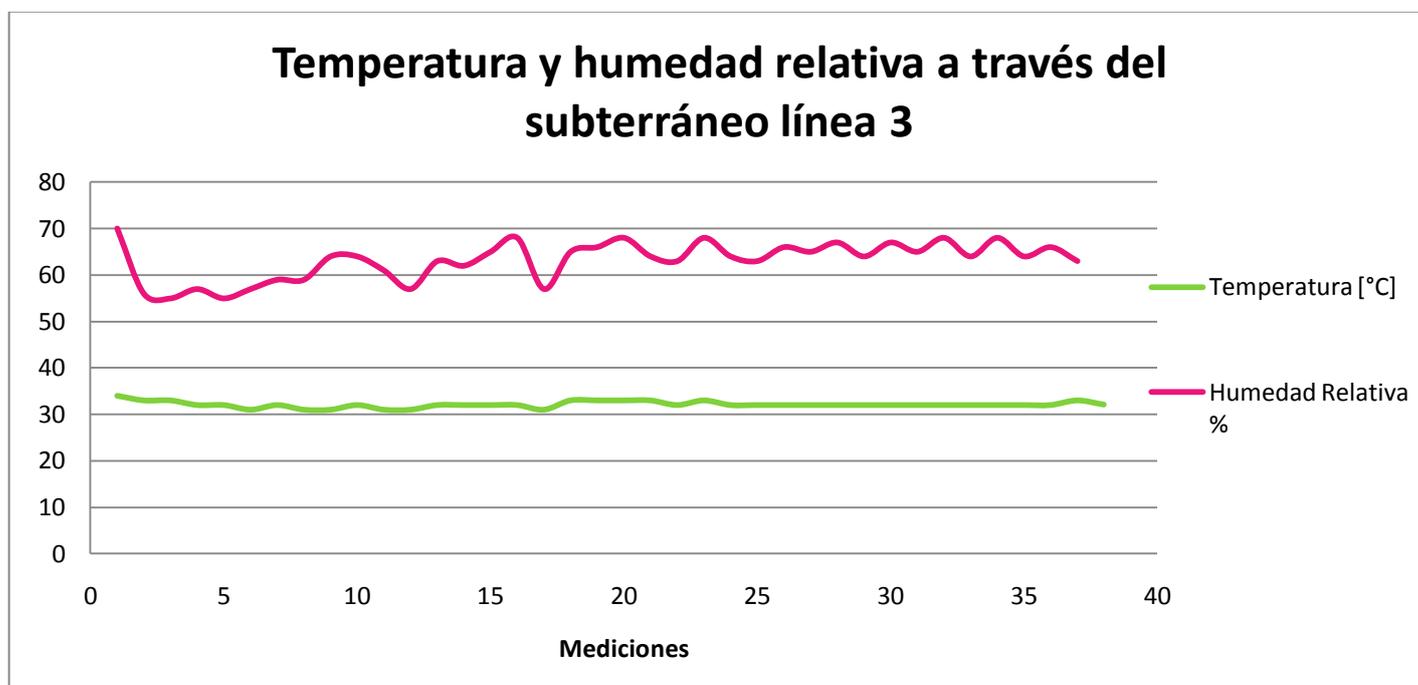
$$T_{\text{Condición de Proyecto}} = (T_{\text{Bulbo Seco}} + T_{\text{Corrección Mes}} + T_{\text{Corrección Hora}})$$

### 3.2 Condiciones de proyecto exteriores para estaciones subterráneas.

Para el cálculo de las condiciones de proyecto de las estaciones subterránea se tomaron datos de temperatura y humedad experimentalmente a diferentes horas del día en los andenes y en los vagones, lo que hace diferente el interior del subterráneo al exterior, es que el incremento de temperatura no varía solo con respecto a una hora solar, sino también va relacionado a la máxima demanda del servicio del metro. En horarios de demanda máxima se obtienen temperaturas más elevadas en los andenes del metro.

Tabla 16. Temperatura de bulbo seco y humedad relativa censada en los andenes del metro de la Ciudad de México en la línea 3 en cada estación para el mes de julio del año 2010.

	Estación	Temperatura, [°C]	Humedad Relativa, [%]
1	Indios Verdes	27	59
2	Deportivo 18 de Marzo	26	59
3	Potrero	27	60
4	La Raza	27	63
5	Tlatelolco	29	67
6	Guerrero	32	72
7	Hidalgo	32	75
8	Juárez	33	73
9	Balderas	36	72
10	Niños Héroe	33	72
11	Hospital General	34	74
12	Centro Médico	35	72
13	Etiopía / Plaza de la Transparencia	34	71
14	Eugenia	33	74
15	División del Norte	34	73
16	Zapata	34	73
17	Coyoacán	32	70
18	Viveros / Derechos Humanos	31	68
19	Miguel Ángel de Quevedo	33	62
20	Copilco	27	58
21	Universidad	25	51



Gráfica 6. Temperatura de bulbo seco y humedad relativa censada a través de los andenes de la línea 3, del metro de la Ciudad de México en el mes de julio.

El intervalo de variación diurna y oscilación anual de temperatura se tomarán con respecto a los datos climatológicos del 2010.

Obteniendo como datos promedio:

Tabla 17 y 18. Intervalo de variación diurna y oscilación anual de temperatura en los andenes del metro de la Ciudad de México.

Intervalo de variación diurna, [°C]	Oscilación anual de temperatura, [°C]
12.5	74.0

Pero las condiciones se calcularán con los datos obtenidos dentro del subterráneo.

Tabla 19. Condiciones normales de verano en los andenes del metro de la Ciudad de México.

Condiciones normales verano					
Temperatura de bulbo seco [°C]	Humedad relativa %	Variación diurna	Temperatura de bulbo húmedo [°C]	Oscilación anual de temperatura [°C]	Temperatura promedio máxima exterior [°C]
32.0	70.0	12.5	28.0	24	36.0

Para cada hora del día en cualquier mes del año es necesario sumar la corrección de hora día, con las correcciones del mes a las condiciones normales de verano.

$$T_{\text{Condición de Proyecto}} = (T_{\text{Bulbo Seco}} + T_{\text{Corrección Mes}} + T_{\text{Corrección Hora}})$$

Tabla 20. Correcciones en las condiciones de proyecto en función de la hora deseada.

Correcciones en las temperaturas de proyecto en función de la hora deseada (para el cálculo de la carga de refrigeración)												
Intervalo de variación diaria de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Hora solar										
		6	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24
12.5	Bulbo seco	-11.3	-8.4	-5.5	-2.8	-0.5	0	-0.5	-1.7	-4.1	-6.5	-9.5
	Bulbo húmedo	-2.8	-2.2	-1.6	-0.5	0	0	0	-0.5	-1.1	-1.7	-2.5

Tabla 21. Correcciones en las condiciones de proyecto en función del mes considerado.

Correcciones en las condiciones de Proyecto en función del mes considerado (Para el cálculo de la carga de refrigeración)											
Oscilación de variación anual de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Mes									
		Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
Menor a 25	Bulbo seco	-1.5	-1.1	-1	-0.5	0	0	-1.1	-1.9	-3.2	
	Bulbo húmedo	-1.3	-1	-0.4	0	0	0	-0.5	-1	-1.2	

Tabla 22. Temperaturas de proyecto en función de la hora deseada para la los andenes del metro de la Ciudad de México.

Temperaturas de proyecto en función de la hora deseada (para el cálculo de la carga de refrigeración)												
Intervalo de variación diaria de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Hora solar										
		6	8	10	12	14	15	16	18	20	22	24
12.5	Bulbo seco	20.7	23.6	26.5	29.2	31.5	32.0	31.5	30.3	27.9	25.5	22.5
	Bulbo húmedo	25.2	25.8	26.4	27.5	28.0	28.0	28.0	27.5	26.9	26.3	25.5

\*Sin aplicar el factor de corrección por mes.

Tabla 23. Temperaturas de proyecto en función del mes considerado para la los andenes del metro de la Ciudad de México.

Condiciones de proyecto en función del mes considerado (para el cálculo de la carga de refrigeración) para el Distrito Federal											
Oscilación de variación anual de temperatura en [°C]	Temperatura de bulbo seco o húmedo en [°C]	Mes									
		Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	
Menor a 25	Bulbo seco	30.5	30.9	31.0	31.5	32.0	32.0	30.9	30.1	28.8	
	Bulbo húmedo	26.7	27.0	27.6	28.0	28.0	28.0	27.5	27.0	26.8	

\*Sin aplicar el factor de corrección por hora del día.

### 3.3 Condiciones de proyecto interiores para los vagones.

Las condiciones interiores de proyecto para confort en verano recomendadas, se basan en que la mayoría de las personas se encuentran plácidamente a los 24 [°C] de temperatura de bulbo seco con una humedad comprendida entre 45 y el 50%, pero estas condiciones se pueden variar dependiendo de la aplicación que se le dará al recinto.

Como nuestro sistema de estudio es un sistema de transporte, que llevará en su interior a una gran cantidad de personas que indican una carga latente elevada (sudoración) las condiciones de proyecto recomendadas serían las siguientes:

Condiciones de proyecto recomendadas para ambiente interior.

Tabla 24. Condiciones interiores de proyecto recomendables para los vagones del metro de la Ciudad de México.

Condiciones interiores de proyecto recomendadas.			
Tipo de aplicación	Verano		
	Práctica comercial		
	Temperatura de bulbo seco [°C]	Humedad relativa %	Variación de temperatura [°C]
Confort general	25 a 26	50 a 45	1 a 2
Bajo calor sensible Carga latente elevada	26 a 27	60 a 50	2 a 3

\* La variación de temperatura es por encima de la posición del termostato durante la carga térmica en verano.

## 4. CARGAS INTERIORES

La cantidad de calor latente y calor sensible que se producen en el interior de nuestro recinto se llaman cargas internas o interiores, son generadas por los ocupantes, las luces, aparatos, motores, tuberías, etc.

Las condiciones térmicas interiores están en función del confort que se desea conseguir y de las actividades que se van a desarrollar en el interior.

Es por eso que al saber la reacción de las personas en los diferentes ambientes térmicos se pueden definir las condiciones óptimas interiores.

### 4.1 Intercambio de calor entre personas y su entorno.

El cuerpo humano es una máquina térmica y se debe de mantener a 37 [°C] constante. El rendimiento en el cuerpo humano es de un 20% a un 25% para transformar la energía térmica a trabajo realizado, pero el resto de la energía se disipa al ambiente en forma de calor.

Una persona adulta estándar se considerará con un peso de 70 [kg] y una altura de 1.73 [m] con área superficial de 1.83 [m<sup>2</sup>] que se obtuvo mediante una regresión en función de la altura y peso, y la energía neta por unidad de tiempo producida por el metabolismo ( $Q_{persona}$ ) de un hombre estándar depende de su grado de actividad.

En el Sistema de Transporte Colectivo se tomarán tres actividades principales:

1. Sentado en reposo.
2. De pie con trabajo muy ligero sin movimiento o con marcha lenta.
3. De pie con movimiento o marcha intensa a 5  $\left[\frac{km}{h}\right]$ .

Tabla 25. Energía metabólica neta por unidad de tiempo producida por el hombre estándar en función de su actividad.

Ganancias debidas a los ocupantes.							
				Temperatura de bulbo seco			
Grado de actividad	Metabolismo medio, $\left[\frac{kcal}{h}\right]$	Metabolismo medio, [W]	10% 15 min, $\left[\frac{kcal}{h}\right]$	34 [°C]		26[°C]	
				Calor sensible	Calor latente	Calor sensible	Calor latente
Sentados	100	116	110	32	78	54	46
De pie, marcha lenta	126	147	139	24	115	55	71
Marcha, 5 $\left[\frac{km}{h}\right]$	252	293	277	31	246	83	169

El metabolismo medio corresponde a un grupo compuesto de adultos y niños de ambos sexos, en proporciones normales.

Cuando hay una renovación constante con una permanencia menor a los 15 minutos se debe de agregar un 10% a la carga debida a los ocupantes.

Donde el cuerpo humano intercambia calor con su entorno de las siguientes formas:

1. 32% por convección del cuerpo al ambiente ( $\dot{q}_{convección}$ ).
2. 9% por conducción de calor del contacto de los zapatos al suelo ( $\dot{q}_{conducción}$ ).
3. 32% por calor de radiación ( $\dot{q}_{radiación}$ )
4. 2% por calor intercambiado en la respiración, calor sensible debido a la diferencia de temperatura entre el aire inhalado y exhalado ( $\dot{q}_{resp\ sen}$ ), y 14% calor latente debido a la distinta cantidad de vapor existente entre el mismo aire inhalado y exhalado ( $\dot{q}_{resp\ lat}$ ).
5. 11% por calor latente debido a la evaporación por el sudor ( $\dot{q}_{difusión}$ ).

Por lo que el balance de energía en el cuerpo queda como:

$$\dot{q}_{persona} = \dot{q}_{convección} + \dot{q}_{resp\ sen} + \dot{q}_{resp\ lat} + \dot{q}_{radiación} + \dot{q}_{conducción} + \dot{q}_{difusión}$$

Al analizar los vagones de la Línea 3 podemos observar que a través de la trayectoria que realiza el metro, hay ascenso y descenso continuo de pasajeros, pero en el transcurso del recorrido se observa una acumulación de pasajeros desde la estación Coyoacán hasta la estación Guerrero, son en estas estaciones donde se encuentra la máxima demanda de pasajeros provocando elevadas temperaturas y humedad.

Tan grande es la acumulación de pasajeros que la capacidad de transporte se ve rebasada en un 20%, esto es de un vagón a 4/4 con 170 pasajeros llega alcanzar a 203 pasajeros.

Para el cálculo se estimó la carga térmica para un vagón con 5/4 de capacidad con todos los asientos ocupados un promedio de 10 personas que ingresan y salen del vagón y los demás parados.

$$\dot{q}_{per\ vagón} = (\dot{q}_{sent} * p_{sent}) + (\dot{q}_{par} * p_{par}) + (\dot{q}_{mar} * p_{mar})$$

Donde:

$$\dot{q}_{per\ vagón} = \text{Potencia calorífica por personas en el vagón en } [W] \text{ o } \left[ \frac{kcal}{h} \right]$$

$$\dot{q}_{sent} = \text{Potencia calorífica de una persona sentada en } [W] \text{ o } \left[ \frac{kcal}{h} \right]$$

$$\dot{q}_{par} = \text{Potencia calorífica de una persona parada en } [W] \text{ o } \left[ \frac{kcal}{h} \right]$$

$$\dot{q}_{mar} = \text{Potencia calorífica de una persona marcha a } 5 \left[ \frac{km}{h} \right] \text{ en } [W] \text{ o } \left[ \frac{kcal}{h} \right]$$

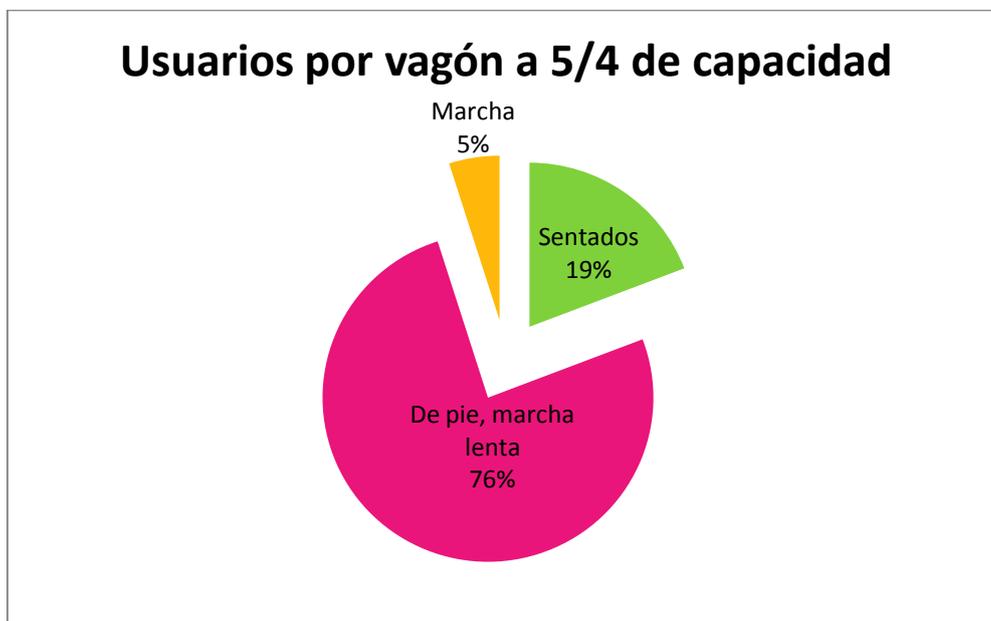
$$p_{sent} = \text{número de usuarios sentados}$$

$$p_{par} = \text{número de usuarios de pie}$$

$$p_{mar} = \text{número de usuarios en marcha a } 5 \left[ \frac{km}{h} \right]$$

Tabla 26. Potencia neta metabólica en condiciones de máxima afluencia en un vagón motriz sin cabina.

Línea 3	Vagón							
	Usuarios				Potencia neta $\left[\frac{kcal}{h}\right]$			
	Sentados	De pie, marcha lenta	Marcha	Total	Sentados	De pie, marcha lenta	Marcha	Total
Vagón a 4/4	39	121	10	170	4290	16771	2772	23833
Vagón a 5/4	39	154	10	203	4290	21344	2772	28406



Gráfica 7. Diagrama de distribución en porcentaje de usuarios por vagón.

Tabla 27. Potencia neta metabólica por vagón.

	Potencia total vagón en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$	Potencia total vagón en $[kW]$
	23833	28
	28406	33
Sobrecarga	1.19	

Tabla 28. Potencia neta metabólica por tren.

Número de vagones por tren	Potencia total tren en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$	Potencia total tren en $[kW]$
9	214493	249
9	255658	297

Se puede observar que el calor disipado por las personas dentro del vagón es de 33 [kW], lo que significa una fuente de calor considerable y una de las principales causas de que no haya sensación de confort dentro de los vagones. Pero es de importancia resaltar que aparte de la acumulación de calor debida a la acumulación de gente existen otros problemas a resolver

como lo es las grandes concentraciones de dióxido de carbono contaminando el aire, la incapacidad de transitar libremente por los vagones y si anexamos que los sistemas de ventilación no son puestos a funcionar y las ventanas pueden estar cerradas dichas condiciones pueden provocar sensaciones de asfixia, claustrofobia y hasta desmayos.

Para el análisis total para cada tren de la línea 3 solo se multiplicará la potencia disipada por cada vagón por el número de vagones por cada tren.

#### 4.2 Intercambio de calor entre personas y su entorno.

El alumbrado es una fuente de calor sensible que se emite por radiación, convección y conducción. Una parte del calor que se emite por la radiación es absorbido por los materiales de las paredes, otra parte produce estratificación debido al calor emitido por la convección y el otro lo gana el ambiente.

El Sistema de Transporte Colectivo Metro de la línea 3 cuenta con un arreglo de alumbrado de 24 lámparas fluorescentes de 38 [W] a lo largo de todo el vagón.

Las lámparas fluorescentes transforman un 25 % de la energía absorbida en luz, otro 25 % se irradia a las paredes y el restante se disipa por convección y conducción. Las lámparas cuentan con una resistencia limitadora el cual emite calor por reactancia que representa un 25 % de la energía absorbida por la lámpara.

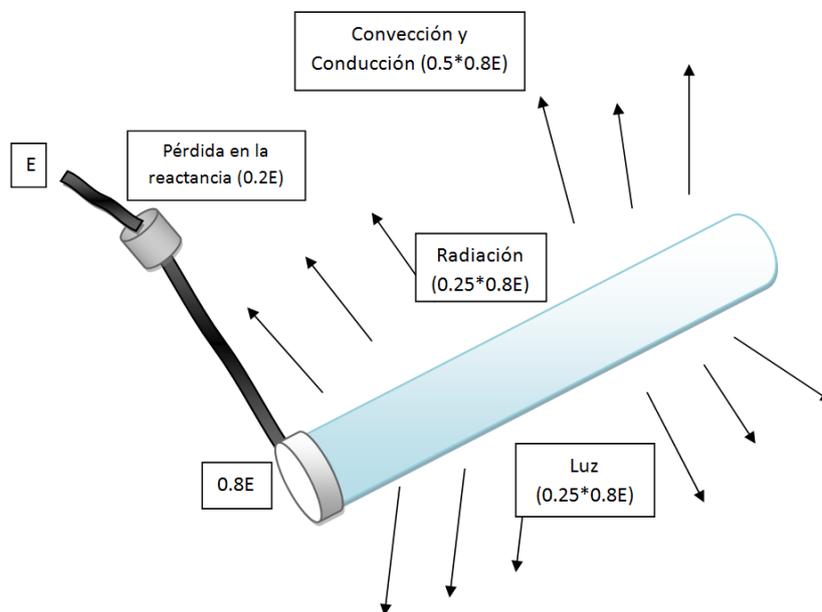


Figura 9. Conversión de la energía eléctrica en calor y luz en las lámparas fluorescentes, donde  $E$  representa a la potencia absorbida por la lámpara en [W] y  $(0.8E)$  representa la potencia efectiva en [W].

La ganancia de calor por alumbrado es:

$$\dot{q}_{alumbrado} = 0.8 E * 1.25 * 0.86$$

Donde:

$$\dot{q}_{\text{alumbrado}} = \text{potencia calorífica debida al alumbrado en } \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$$

$$E = \text{potencia útil en [W]}$$

1.25 = 25 [%] correspondiente a la potencia absorbida en la resistencia reguladora

$$0.86 = \text{factor de conversión de [W] a } \left[ \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$$

Tabla 29. Características de las lámparas de los vagones de la línea 3.

Línea 3	Lámparas		
	Tipo	Vagón	Potencia útil [W]
	Fluorescentes	24	38

Tabla 30. Potencia calorífica sensible disipada por las lámparas.

Vagón			
Lámparas fluorescentes	Ganancia sensible $\left[ \frac{\text{kcal}}{\text{h}} \right]$	Ganancia sensible [W]	[kW - h]
1	33	38	137
24	784	912	3283

Como se puede observar en la tabla las lámparas no representan una gran carga térmica instantánea a comparación de las otras cargas, pero si se hace un análisis tomando en cuenta que están funcionando en todo el horario de operación del metro puede provocarse un almacenamiento en las estructuras del vagón.

## 5. CARGAS EXTERIORES

La red de la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo se encuentra ubicada a 20° latitud norte, es una red que posee estaciones subterráneas y superficiales.

Las estaciones superficiales a través de la mayor parte de su recorrido no poseen estructuras que tengan un efecto de sombra sobre su recorrido, por lo cual se idealizarán como sin efecto de sombra, justificando esto con que la mayoría del trayecto el tren está en un lugar aislado de edificios, ya que va por una vía alejada de estructuras, solo existen estructuras al momento en que llega a las estaciones por un corto periodo de tiempo donde el usuario tiene ascenso y descenso. En cuanto a las estaciones subterráneas se consideraran con efecto de sombra porque van debajo de la tierra.

Como se puede observar en la línea 3 solo existirá la influencia del sol a través de las estructuras del vagón en 4 estaciones.

Tabla 31. Tipo de estaciones para cada línea.

Línea	Estación			Total
	Subterránea	Superficial	Elevada	
1	<b>19</b>	1	0	20
2	<b>14</b>	10	0	24
<b>3</b>	<b>17</b>	<b>4</b>	<b>0</b>	<b>21</b>
4	0	2	<b>8</b>	10
5	4	<b>9</b>	0	13
6	<b>10</b>	1	0	11
7	<b>13</b>	1	0	14
8	<b>14</b>	5	0	19
9	<b>8</b>	0	4	12
A	1	<b>9</b>	0	10
B	6	<b>11</b>	4	21

La red de la línea 3 es de forma irregular por lo cual es difícil orientar el vagón a través de su recorrido, es por ello que se idealizó en una red de forma de línea recta basándonos en que el metro está en constante movimiento a través de las líneas, las líneas tienen pocos grados de inclinación, en pocas ocasiones se queda parado en un solo lugar y siempre está siguiendo la misma trayectoria por lo que se puede orientar de la siguiente manera:

Tabla 32. Orientación de las líneas del metro.

Línea	Orientación
1	N E S O
2	N E S O
3	N E S O
4	N E S O
5	NE SE SO NO
6	N E S O
7	N E S O
8	NE SE SO NO
9	N E S O
A	NE SE SO NO
B	NE SE SO NO

Aproximándose con el siguiente mapa del Sistema de Transporte Colectivo de la siguiente manera:

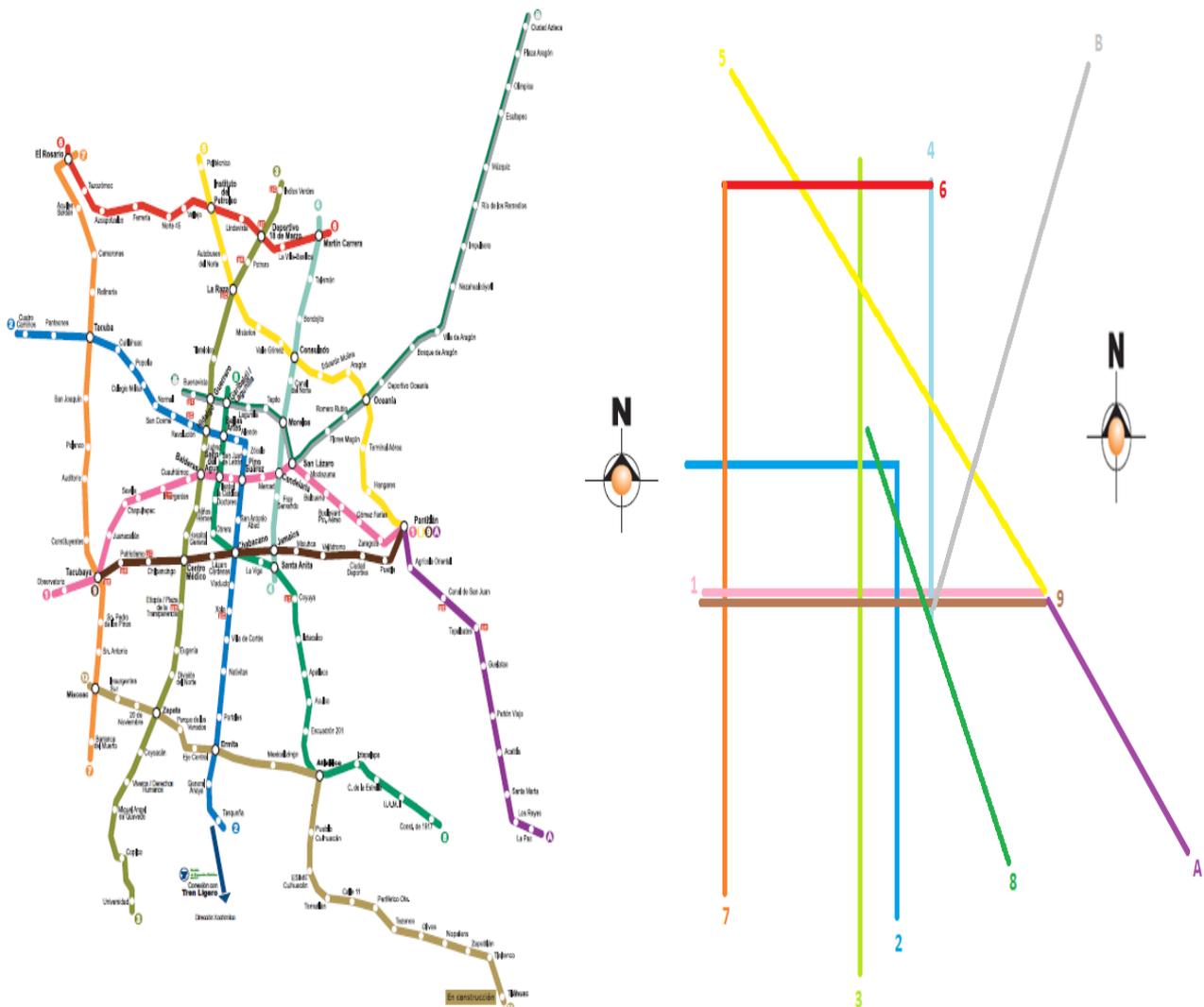


Figura 10. Mapa del Sistema de Transporte Colectivo real e idealizado.

Para realizar un análisis más profundo sobre las dos situaciones que presenta la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo se analizarán las cargas exteriores para las estaciones subterráneas y las estaciones superficiales.

## **5.1 Estaciones superficiales.**

### **5.1.1 Radiación solar directa y difusa.**

La intensidad de la radiación solar en la atmósfera varía entre  $1,209 \left[ \frac{kcal}{h m^2} \right]$  y  $1,125 \left[ \frac{kcal}{h m^2} \right]$  dependiendo de su posición en la órbita alrededor del sol. Al atravesar la atmósfera la intensidad de radiación solar disminuye, una parte se refleja al espacio y otra es absorbida por las partículas atmosféricas.

La radiación difusa es debida a la reflexión que se produce en las partículas de vapor de agua, ozono o polvo, donde una parte es entregada de manera sensible a la superficie de la tierra. La radiación directa es aquella que incide directamente en la superficie de la tierra.

Estos dos valores dependen de la distancia que recorren los rayos a través de la atmósfera para alcanzar la superficie y de la limpieza de la atmósfera. Cuando la distancia es muy grande o la atmósfera es opaca, disminuye la radiación directa y aumenta la difusa.

### **5.1.2 Vidrio ordinario.**

La ganancia de calor a través de un vidrio ordinario depende de:

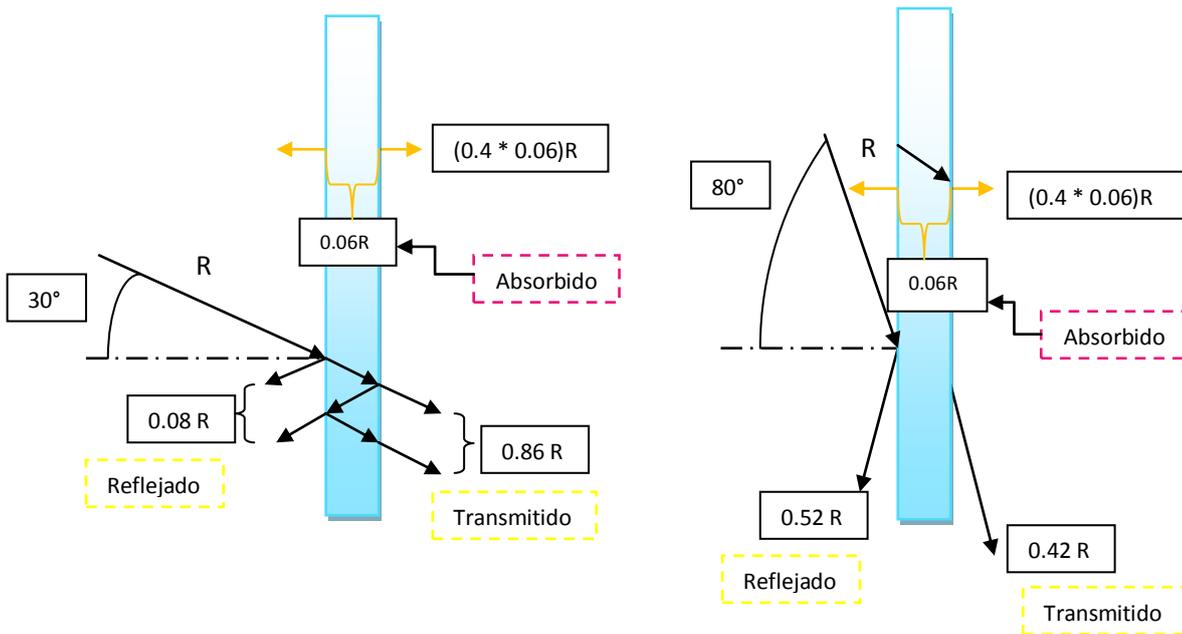
- Situación geográfica (latitud).
- Instante considerado.
- Orientación.

Solo existirá ganancia de calor en el recinto por radiación directa cuando los rayos solares atraviesan la ventana, pero la ganancia por radiación difusa existirá en cualquier posición de la ventana.

La magnitud de calor reflejada y transmitida depende del ángulo de incidencia de los rayos del sol en la ventana.

En un cristal ordinario absorbe de un 5 a 6 % de radiación solar y transmite el resto. La ganancia total por insolación comprenderá el calor transmitido más un 40% aproximadamente del calor absorbido por el cristal.

Cuando aumenta el ángulo de incidencia aumenta también el calor reflejado y disminuye el transmitido.



Ganancia de calor del local =  $(0.4 * 0.06 R) + (0.86 R) = 0.884 R$

Ganancia de calor del local =  $(0.4 * 0.06 R) + (0.42 R) = 0.444 R$

Figura 11. Ganancia de calor en vidrios ordinarios a diferentes ángulos de incidencia.

### 5.1.3 Ganancias por insolación de las superficies de vidrio.

Analizando la situación para las estaciones superficiales, se debe conocer la ganancia por insolación a través de los cristales de los vagones del metro para cada mes del año y cada hora del día.

La línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo está ubicada en la Ciudad de México, a 20° latitud norte, por lo que la ganancia por insolación correspondiente a esa latitud para cada mes del año y hora del día está representada en la siguiente tabla.

Tabla 33. Aportaciones solares a través de vidrio ordinario para 20° latitud norte.

Aportaciones solares a través de vidrio sencillo, $\frac{kcal}{h m^2}$														
20° Latitud norte		Hora solar												
Época	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 junio	N	76	111	90	68	51	46	40	46	51	67	90	111	75
	E	219	401	434	387	260	111	38	38	38	38	32	24	8
	S	8	24	32	38	38	38	38	38	38	38	32	24	8
	O	8	24	32	38	38	38	38	111	260	387	434	401	220
	Horizontal	30	162	328	447	585	629	40	629	585	477	328	162	30
22 julio y 21 mayo	N	54	75	62	46	40	38	678	38	40	46	62	75	54
	E	203	401	442	393	268	124	38	38	38	35	32	21	8
	S	8	21	32	35	38	38	38	38	38	35	32	21	8
	O	8	21	32	35	38	38	38	124	268	393	442	401	203
	Horizontal	8	149	320	474	585	650	680	650	585	474	320	149	8
24 agosto y 20 abril	N	16	27	29	35	38	38	38	38	38	35	29	27	16
	E	143	385	447	404	287	138	8	38	38	35	29	19	5
	S	5	19	29	38	54	65	70	65	54	38	29	19	5
	O	5	19	29	35	38	38	38	138	287	404	447	385	143
	Horizontal	13	130	290	452	569	637	669	637	569	452	290	130	13
22 septiembre y 22 marzo	N	0	10	6	29	35	38	38	38	38	35	29	16	0
	E	0	352	442	404	282	122	38	38	38	35	29	16	0
	S	0	21	59	103	141	170	176	172	141	103	59	21	0
	O	0	16	29	35	38	38	38	122	282	404	442	352	0
	Horizontal	0	81	252	414	537	610	631	610	537	414	252	81	0
22 octubre y 20 febrero	N	0	10	24	32	35	38	38	38	35	32	24	10	0
	E	0	268	398	382	271	132	38	38	35	32	24	10	0
	S	0	57	135	206	252	287	301	287	252	206	135	57	0
	O	0	10	24	32	35	38	38	132	271	382	398	268	0
	Horizontal	0	48	184	344	463	531	564	531	463	344	184	48	0
21 noviembre y 21 enero	N	0	8	21	29	35	35	35	35	35	29	21	8	0
	E	0	192	347	344	246	116	35	35	35	29	21	8	0
	S	0	75	187	271	333	368	382	368	333	271	187	75	0
	O	0	8	21	29	32	35	35	116	246	344	347	192	0
	Horizontal	0	13	130	273	396	466	488	466	396	278	130	13	0
22 diciembre	N	0	5	19	29	32	35	35	35	32	29	19	5	0
	E	0	151	320	328	230	92	35	35	32	29	19	5	0
	S	0	67	200	301	358	396	404	396	358	301	200	67	0
	O	0	5	19	29	32	35	35	92	230	328	320	151	0
	Horizontal	0	10	97	249	366	436	461	436	366	249	97	10	0

Estos valores se aplican para cualquier zona, y hora. Sin embargo estos valores fueron calculados para una atmósfera limpia, a nivel del mar y un punto de rocío de 19.5 [°C].

La Ciudad de México se localiza a 2240 [m] sobre el nivel del suelo, el cielo es considerado con un 10% de defecto de limpieza y tomando las condiciones extremas el punto de rocío es de 21 [°C].

Para poder complementar la tabla con las siguientes consideraciones se realizaron las siguientes correcciones:

- Corrección por marco metálico en las ventanas:  $\frac{1}{0.85} = 1.18$
- Corrección por altitud: por cada 300 [m] el valor de la ganancia solar aumentará un 0.7%.

$$C_{altitud} = \left( \frac{altitud [m]}{300 [m]} \right) * 0.007$$

- Corrección por defecto de limpieza: cuando la atmósfera se considera que no está totalmente limpia, el coeficiente de corrección es de 0.9.
- Corrección por punto de rocío: cuando el punto de rocío es superior a 19.5 [°C] se le aumentará un 14 % por cada 10 [°C] sobre la ganancia solar.

$$C_{pr} = 1 + \frac{T_{pr} [^{\circ}C] - 19.5 [^{\circ}]}{10 [^{\circ}C]} * 0.14$$

Tabla 34. Factores de corrección para ganancia solar de la Ciudad de México.

Correcciones para la Ciudad de México		
		Factor
Corrección por tener marco metálico		1.18
Altitud	2240 [m]	1.052
Punto de rocío	21 [°C]	0.979
Limpieza		0.9

Al aplicar estos valores característicos de la zona se encuentra el factor de corrección aplicado a las aportaciones solares a través de vidrio sencillo.

$$Factor_{corrección} = 1.18 * C_{altitud} * 0.9 * C_{pr}$$

Aplicando el factor de corrección encontramos la aportación solar a través de un vidrio sencillo en la Ciudad de México.

Tabla 35. Aportaciones solares a través de un vidrio ordinario para las condiciones de la Ciudad de México.

Aportaciones solares a través de vidrio sencillo con factor de corrección solar, $\left[ \frac{kcal}{h m^2} \right]$														
20° Latitud norte		Hora solar												
Época	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 junio	N	83	121	98	74	56	50	44	50	56	73	98	121	82
	E	239	437	473	422	284	121	41	41	41	41	35	26	9
	S	9	26	35	41	41	41	41	41	41	41	35	26	9
	O	9	26	35	41	41	41	41	121	284	422	473	437	240
	Horizontal	33	177	358	488	638	686	44	686	638	520	358	177	33
22 julio y 21 mayo	N	59	82	68	50	44	41	740	41	44	50	68	82	59
	E	221	437	482	429	292	135	41	41	41	38	35	23	9
	S	9	23	35	38	41	41	41	41	41	38	35	23	9
	O	9	23	35	38	41	41	41	135	292	429	482	437	221
	Horizontal	9	163	349	517	638	709	742	709	638	517	349	163	9
24 agosto y 20 abril	N	17	29	32	38	41	41	41	41	41	38	32	29	17
	E	156	420	488	441	313	151	9	41	41	38	32	21	5
	S	5	21	32	41	59	71	76	71	59	41	32	21	5
	O	5	21	32	38	41	41	41	151	313	441	488	420	156
	Horizontal	14	142	316	493	621	695	730	695	621	493	316	142	14
22 septiembre y 22 marzo	N	0	11	7	32	38	41	41	41	41	38	32	17	0
	E	0	384	482	441	308	133	41	41	41	38	32	17	0
	S	0	23	64	112	154	185	192	188	154	112	64	23	0
	O	0	17	32	38	41	41	41	133	308	441	482	384	0
	Horizontal	0	88	275	452	586	665	688	665	586	452	275	88	0
22 octubre y 20 febrero	N	0	11	26	35	38	41	41	41	38	35	26	11	0
	E	0	292	434	417	296	144	41	41	38	35	26	11	0
	S	0	62	147	225	275	313	328	313	275	225	147	62	0
	O	0	11	26	35	38	41	41	144	296	417	434	292	0
	Horizontal	0	52	201	375	505	579	615	579	505	375	201	52	0
21 noviembre y 21 enero	N	0	9	23	32	38	38	38	38	38	32	23	9	0
	E	0	209	378	375	268	127	38	38	38	32	23	9	0
	S	0	82	204	296	363	401	417	401	363	296	204	82	0
	O	0	9	23	32	35	38	38	127	268	375	378	209	0
	Horizontal	0	14	142	298	432	508	532	508	432	303	142	14	0
22 diciembre	N	0	5	21	32	35	38	38	38	35	32	21	5	0
	E	0	165	349	358	251	100	38	38	35	32	21	5	0
	S	0	73	218	328	390	432	441	432	390	328	218	73	0
	O	0	5	21	32	35	38	38	100	251	358	349	165	0
	Horizontal	0	11	106	272	399	476	503	476	399	272	106	11	0

### 5.1.4 Cristales.

Las diferentes características especiales de los cristales provocan que estos absorban diferentes cantidades de radiación solar, esto se debe a su grosor, o su método de fabricación para aumentar su coeficiente de absorción.

Este tipo de cristales disminuyen las ganancias por insolación directa pero aumentan la ganancia difusa, ya que absorben mayor cantidad de calor, lo que los hace tan usados por disminuir las ganancias de insolación.

Estos cristales tienen un coeficiente de reflexión ligeramente menor al de un cristal ordinario, ya que absorben el calor reflejado por su cara interna y como consecuencia disminuye la ganancia de por insolación.

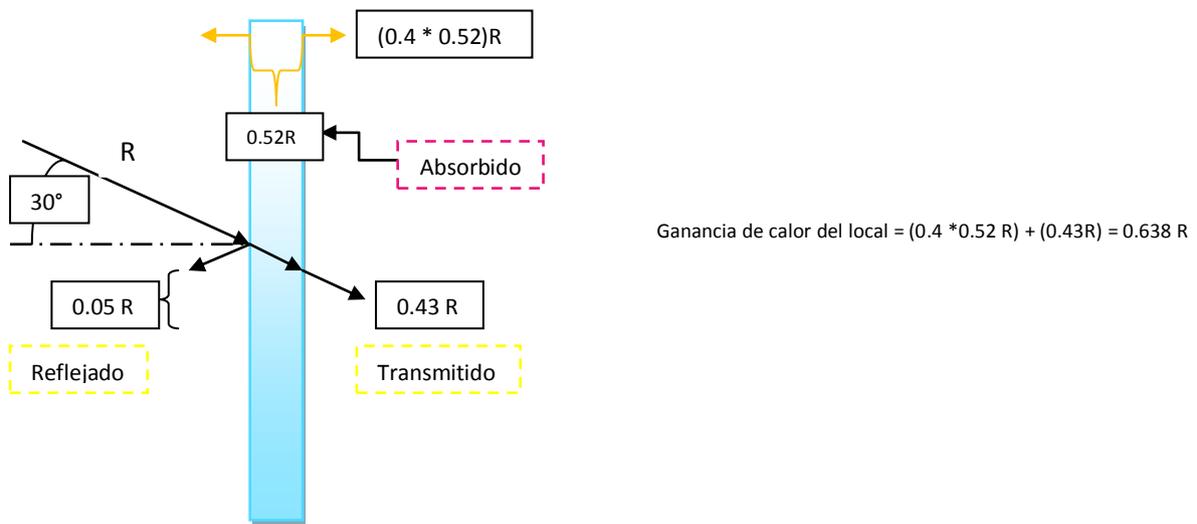


Figura 12. Ganancia de calor por radiación solar en un vidrio con coeficiente de absorción de 52%.

La siguiente tabla muestra los factores totales de ganancia solar a través de algunos tipos de vidrios dependiendo de la fabricación y color.

Tabla 36. Factor total de ganancia solar a través del vidrio.

Factor total de ganancia solar a través del vidrio (coeficiente global de insolación con o sin dispositivo de sombra o pantalla)	
Tipo de vidrio	Factor
<b>Vidrio Sencillo</b>	
Vidrio sencillo ordinario	1
Vidrio sencillo 6 mm	0.94
<b>Vidrio Absorbente</b>	
Coefficiente de absorción 0,4 a 0,48	0.8
Coefficiente de absorción 0,48 a 0,56	0.73
Coefficiente de absorción 0,56 a 0,7	0.62

Los vagones del metro de la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo cuenta con ventanas de vidrio sencillo de 6 [mm] de espesor, el cual absorbe un 15 % de radiación solar, refleja el 8

% y transmite el 77 %, teniendo un factor total de ganancia solar a través del vidrio de 0.94 comparado con el vidrio sencillo ordinario.

Las ventanas están distribuidas en las paredes y puertas a lo largo y ancho del vagón:

- Ventanas de pared (V1): 3 ventanas colocadas a lo largo de las paredes laterales del vagón.
- Ventanas en las puertas de ascenso y descenso (V2): 2 ventanas por cada puerta de ascenso y descenso, distribuidas en 4 puertas a lo largo de las paredes laterales del vagón.
- Ventanas en las puertas conectoras (V3): una ventana en cada puerta que conecta a dos vagones.

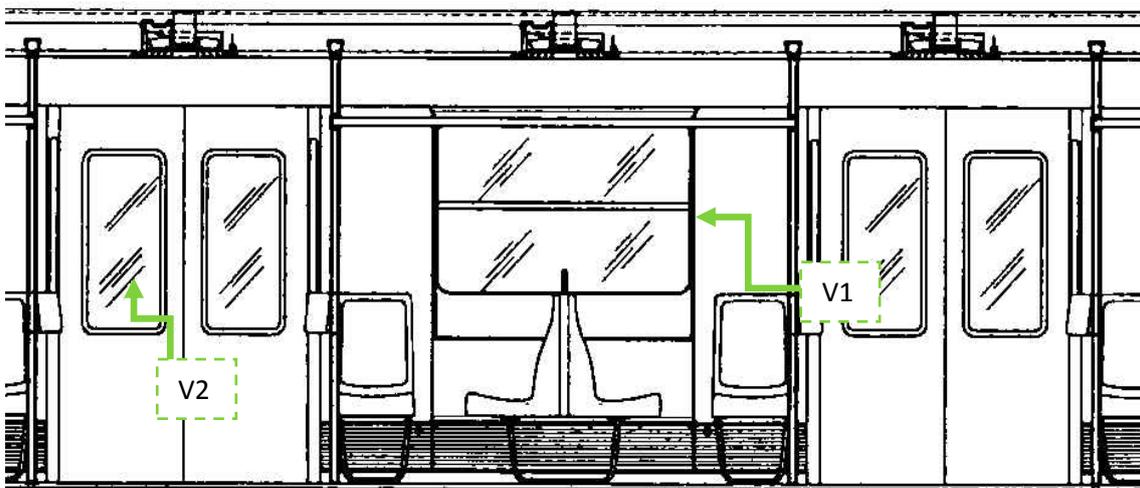


Figura 13. Localización de las ventanas en la pared lateral de los vagones del metro, donde V1 indica las ventanas en la pared y V2 las ventanas en las puertas de ascenso y descenso.

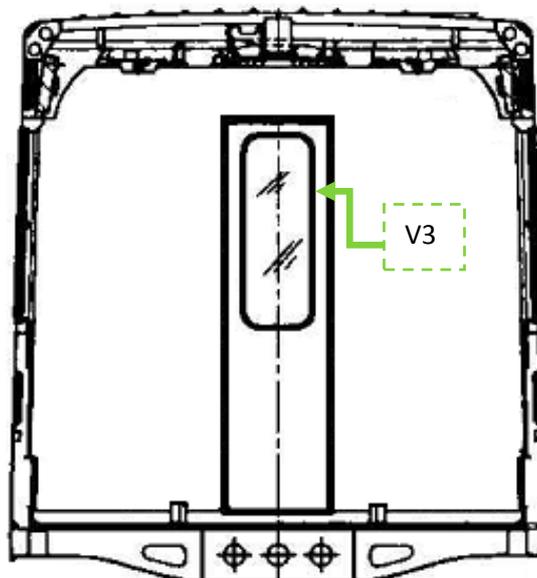


Figura 14. Localización de las ventanas en las puertas conectoras de los vagones del metro de la Ciudad de México indicados por V3.

La distribución y dimensiones de las ventanas es la siguiente:

Tabla 37. Dimensiones de las ventanas de los vagones del metro de la línea 3.

Características de las Ventanas							
Tipo	Cantida d	Ancho [m]	Altura [m]	Acuerdo [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Área total [m <sup>2</sup> ]	Orientaci ón
Ventanas pared V1	3	1.4	0.79	0.1	1.097	3.29	E y O
Ventana puerta grande V2	8	0.46	0.88	0.1	0.396	3.17	E y O
Ventana puerta chica V3	1	0.3	0.78	0.1	0.225	0.23	N y S

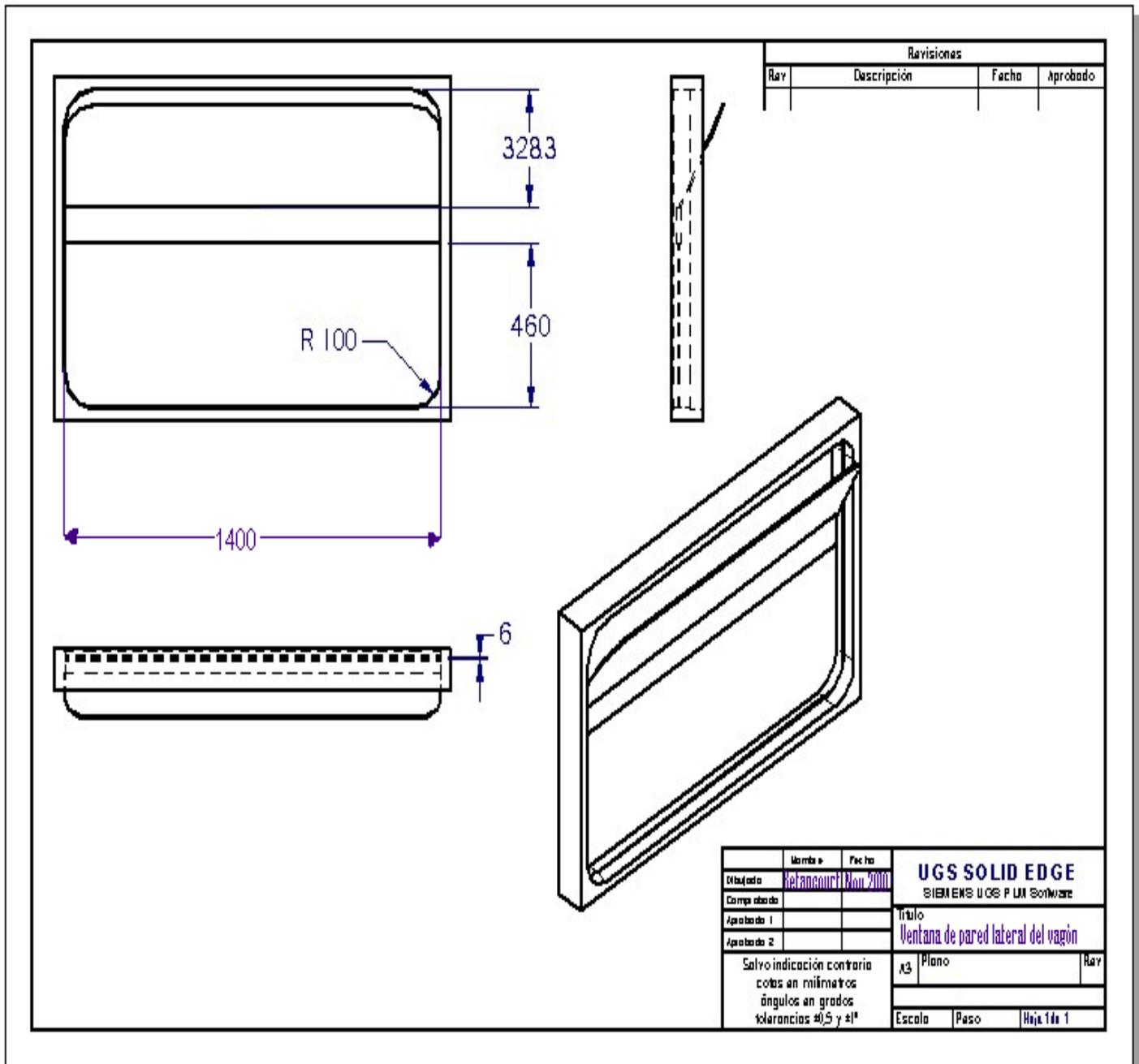


Figura 15. Plano de la ventana tipo V1.

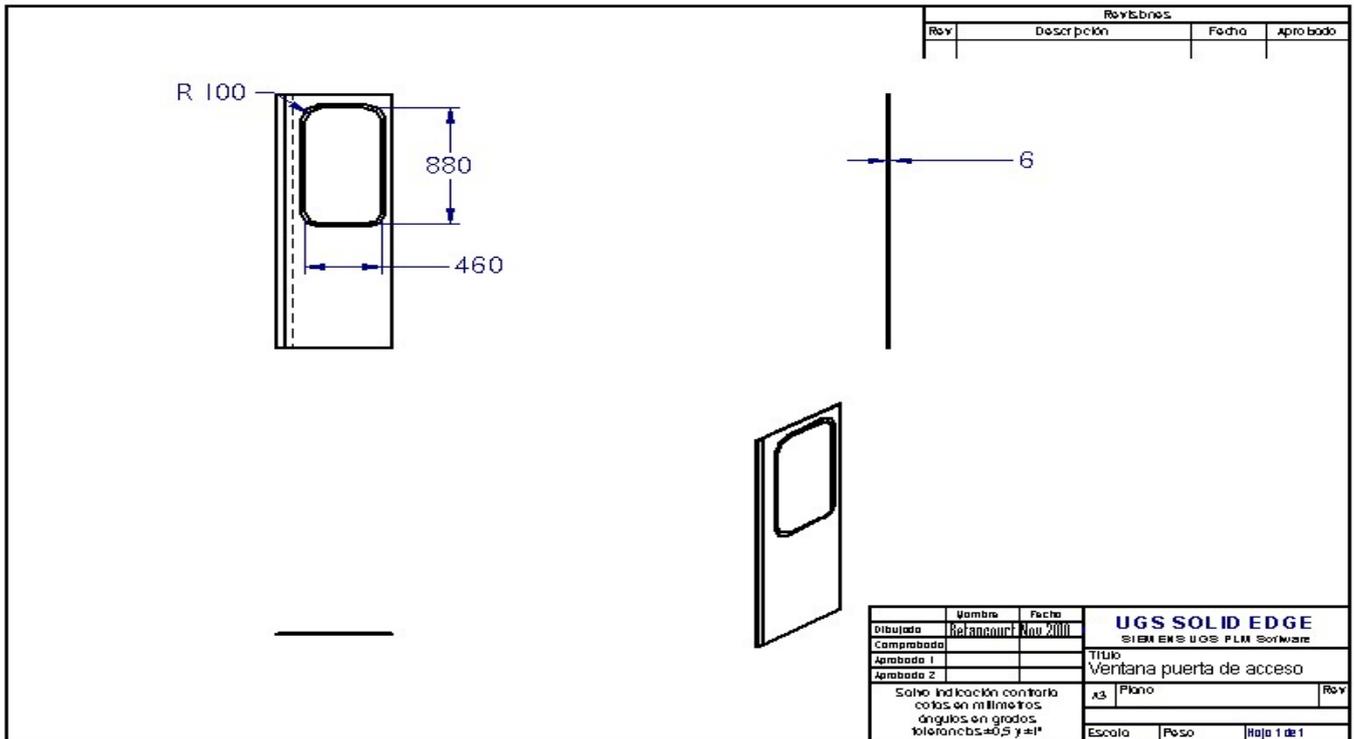


Figura 16. Plano de la ventana tipo V2.

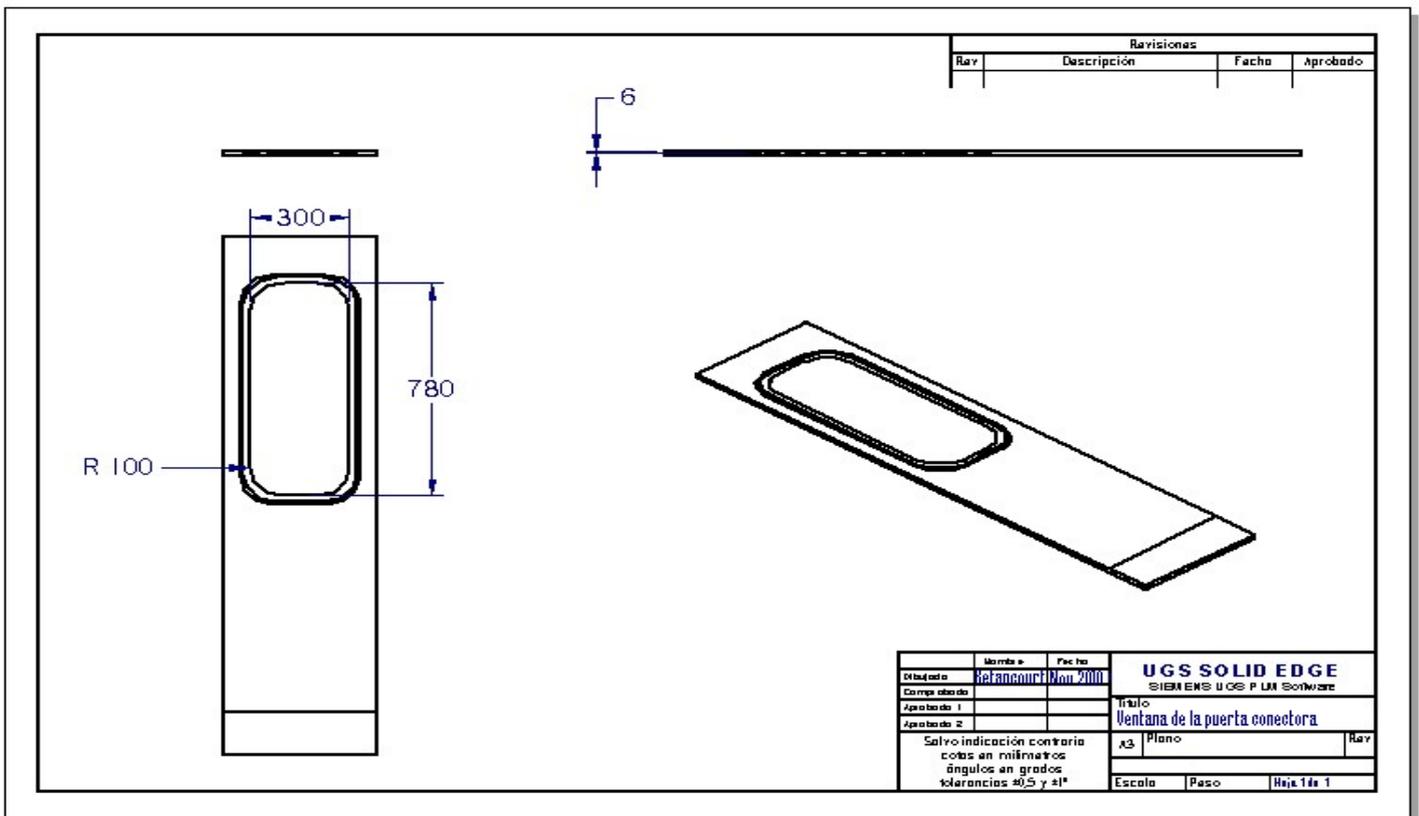


Figura 17. Plano de la ventana tipo V3.

Por lo que la carga solar por infiltración de sol por las ventanas queda calculada como:

$$\dot{q}_{solar} = Q_{solar\ corregida} * FGS * A_{ventana}$$

Teniendo como resultado:

Tabla 38-a. Máxima carga solar por infiltración de sol en las ventanas de 6[mm] en los vagones de la línea 3 para las estaciones superficiales en  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

Máxima carga solar por infiltración de sol en las ventanas, $\left[\frac{kcal}{h}\right]$														
20° Latitud norte		Hora solar												Máxima aportación solar.
Época	Orientación	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
21 junio	N	18	26	21	16	12	11	9	11	12	15	21	26	17
	E	1451	2657	2876	2564	1723	735	252	252	252	252	212	159	53
	S	2	6	7	9	9	9	9	9	9	9	7	6	2
	O	53	159	212	252	252	252	252	735	1723	2564	2876	2657	1458
	Total	1523	2847	3116	2840	1995	1007	522	1007	1995	2840	3116	2847	1530
22 julio y 21 mayo	N	12	17	14	11	9	9	157	9	9	11	14	17	12
	E	1345	2657	2929	2604	1776	822	252	252	252	232	212	139	53
	S	2	5	7	8	9	9	9	9	9	8	7	5	2
	O	53	139	212	232	252	252	252	822	1776	2604	2929	2657	1345
	Total	1412	2818	3162	2854	2045	1091	669	1091	2045	2854	3162	2818	1412
24 agosto y 20 abril	N	4	6	7	8	9	9	9	9	9	8	7	6	4
	E	947	2551	2962	2677	1902	914	53	252	252	232	192	126	33
	S	1	4	7	9	12	15	16	15	12	9	7	4	1
	O	33	126	192	232	252	252	252	914	1902	2677	2962	2551	947
	Total	985	2687	3167	2926	2175	1190	330	1190	2175	2926	3167	2687	985
22 septiembre y 22 marzo	N	0	2	1	7	8	9	9	9	9	8	7	4	0
	E	0	2332	2929	2677	1868	808	252	252	252	232	192	106	0
	S	0	5	14	24	33	39	41	40	33	24	14	5	0
	O	0	106	192	232	252	252	252	808	1868	2677	2929	2332	0
	Total	0	2445	3136	2939	2161	1108	553	1109	2162	2941	3141	2447	0
22 octubre y 20 febrero	N	0	2	6	7	8	9	9	9	8	7	6	2	0
	E	0	1776	2637	2531	1796	875	252	252	232	212	159	66	0
	S	0	13	31	48	58	66	70	66	58	48	31	13	0
	O	0	66	159	212	232	252	252	875	1796	2531	2637	1776	0
	Total	0	1857	2833	2798	2094	1201	582	1201	2094	2798	2833	1857	0
21 noviembre y 21 enero	N	0	2	5	7	8	8	8	8	8	7	5	2	0
	E	0	1272	2299	2279	1630	769	232	232	232	192	139	53	0
	S	0	17	43	63	77	85	88	85	77	63	43	17	0
	O	0	53	139	192	212	232	232	769	1630	2279	2299	1272	0
	Total	0	1344	2486	2541	1927	1094	560	1094	1947	2541	2486	1344	0
22 diciembre	N	0	1	4	7	7	8	8	8	7	7	4	1	0
	E	0	1000	2120	2173	1524	610	232	232	212	192	126	33	0
	S	0	15	46	70	83	92	93	92	83	70	46	15	0
	O	0	33	126	192	212	232	232	610	1524	2173	2120	1000	0
	Total	0	1050	2297	2442	1826	941	565	941	1826	2442	2297	1050	0

Tabla 38-b. Máxima carga solar por infiltración de sol en las ventanas de 6[mm] en los vagones de la línea 3 para las estaciones superficiales en [W].

	Máxima ganancia por infiltración de sol en las ventanas en [W]												
	Hora solar												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 de junio	1771	3311	3623	3303	2320	1170	606	1170	2320	3302	3623	3311	1779
22 de julio y 21 de mayo	1642	3277	3677	3319	2378	1268	778	1268	2378	3319	3677	3277	1642
24 de agosto y 20 de abril	1146	3125	3683	3402	2529	1384	383	1384	2529	3402	3683	3125	1146
22 de septiembre y 22 de marzo	0	2843	3646	3418	2513	1289	643	1289	2513	3419	3652	2845	0
22 de octubre y 20 de febrero	0	2160	3294	3253	2435	1397	677	1397	2435	3253	3294	2160	0
21 de noviembre y 21 de enero	0	1563	2891	2954	2241	1272	651	1272	2264	2954	2891	1563	0
22 de diciembre	0	1221	2671	2839	2123	1094	657	1094	2123	2839	2671	1221	0

Como se puede observar en la tabla, la máxima carga solar por infiltración del sol en las ventanas alcanzada será de  $3167 \left[ \frac{kcal}{h} \right]$  o bien  $3683 [W]$ , estas cargas máximas podrían ocurrir en los meses de abril, mayo, julio o agosto a las 16 horas. Al comparar los valores de la tabla puede tomarse en cuenta que las cargas solares por infiltración del sol en las ventanas de las puertas conectoras es mínima, despreciable a comparación con las demás ventanas de las puertas de ascenso y descenso, y las laterales en la pared.

#### 5.1.5. Carga térmica a través de paredes y techos por influencia de la radiación solar.

Cuando existe una diferencia de temperatura entre dos puntos de un mismo cuerpo, se presenta un flujo de calor desde el punto caliente al punto frío. También existirá una transferencia de vapor de agua, si el vapor de agua entra en contacto con una superficie con una temperatura inferior a su punto de rocío, el vapor se condensará.

Cuando se hace el cálculo de ganancia de calor en las paredes exteriores y el techo, se debe de calcular en la hora de máximo flujo. Como la transmisión de calor por insolación y la diferencia de temperatura exterior e interior varía en todo el día se debe de calcular una diferencia equivalente de temperatura, la cual está definida como aquella diferencia de temperaturas del aire al interior y exterior que resulta del flujo de calor total a través de la estructura debido a radiación solar variable y la temperatura exterior.

La diferencia equivalente de temperatura toma en cuenta:

- Orientación.
- Construcción.
- Latitud.
- Condiciones de proyecto.

La transmisión de calor a través de un muro de una o varias capas en un estado estacionario se calcula como:

$$\dot{q}_{pared} = A U (\Delta T_e)$$

Donde:

$$\dot{q}_{pared} = \text{ganancia de calor en paredes en [W]}$$

$$A = \text{superficie de contacto en [m}^2\text{]}$$

$$U = \text{coeficiente global de transmisión de calor en } \left[ \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$$

$$\Delta T_e = \text{diferencia equivalente de temperatura en [}^\circ\text{C]}$$

El coeficiente global de transmisión de calor nos indica la cantidad de calor que se transmite a través de una pared por metro cuadrado de superficie y por cada grado centígrado de diferencia entre las paredes exterior e interior. La inversa del coeficiente global de transmisión de calor nos indica la resistencia global contra el paso de calor y en una pared de varios materiales es igual a la suma de las resistencias parciales de cada material que compone la pared más el coeficiente de convección del aire al interior y al exterior.

Para calcular el coeficiente global de transmisión de calor de un muro con varias capas:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \sum \text{capas} \frac{L_i}{k_i} + \frac{1}{h_{ext}}}$$

Donde:

$$h_{int} = \text{coeficiente de convección del aire al interior en } \left[ \frac{W}{m \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$$

$$h_{ext} = \text{coeficiente de convección del aire al exterior en } \left[ \frac{W}{m \text{ } ^\circ\text{C}} \right]$$

$$k_i = \text{conductividad térmica de cada capa en } \left[ \frac{m^2 \text{ } ^\circ\text{C}}{W} \right]$$

$$L_i = \text{espesor de la capa de cada material en [m]}$$

Para el cálculo de la diferencia equivalente de temperatura se usaron tablas basadas en la intensidad de radiación solar de julio a 40° latitud norte, un intervalo de variación de 11[°C] exterior en 24 horas, con una temperatura máxima exterior de 35 [°C] e interior de proyecto de 27 [°C], y un coeficiente de absorción de paredes y techos de 0.78 para color medio.

Para poder seleccionar la diferencia equivalente de temperatura se debe de calcular el peso total por metro cuadrado de los materiales que constituyen la estructura de los vagones del metro tipo motriz sin cabina.

Las dimensiones de un tren motriz sin cabina de la línea 3:

Tabla 39. Dimensiones de las puertas, ventanas y muros de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.

Dimensiones de muros.										
Orientación	Puertas				Ventanas		Muros			
	Ancho [m]	Largo [m]	Cantidad	Área total [m <sup>2</sup> ]	Cantidad	Área total [m <sup>2</sup> ]	Alto [m]	Largo [m]	Área [m <sup>2</sup> ]	Área total [m <sup>2</sup> ]
N	0.46	1.9	1	0.874	1	0.23	2.4	2.5	6	5.13
S	0.46	1.9	1	0.874	1	0.23	2.4	2.5	6	5.13
E	0.692	1.9	8	10.518	3 y 8	6.46	2.4	15.78	37.872	24.06
O	0.692	1.9	8	10.518	3 y 8	6.46	2.4	15.78	37.872	24.06

Tabla 40. Dimensiones del piso y el techo de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.

Dimensiones del piso y techo.				
Tipo	Ancho [m]	Largo [m]	Cantidad	Área [m <sup>2</sup> ]
Techo	2.5	15.78	1	39.450
Piso	2.5	15.78	1	39.450

El techo, piso y paredes de los vagones del metro de la línea 3 están compuestas por diferentes materiales y reforzados con una estructura de acero al interior, además que para la fácil apertura de puertas y ventilación tiene espacios de aire entre sus estructuras de diferentes espesores.

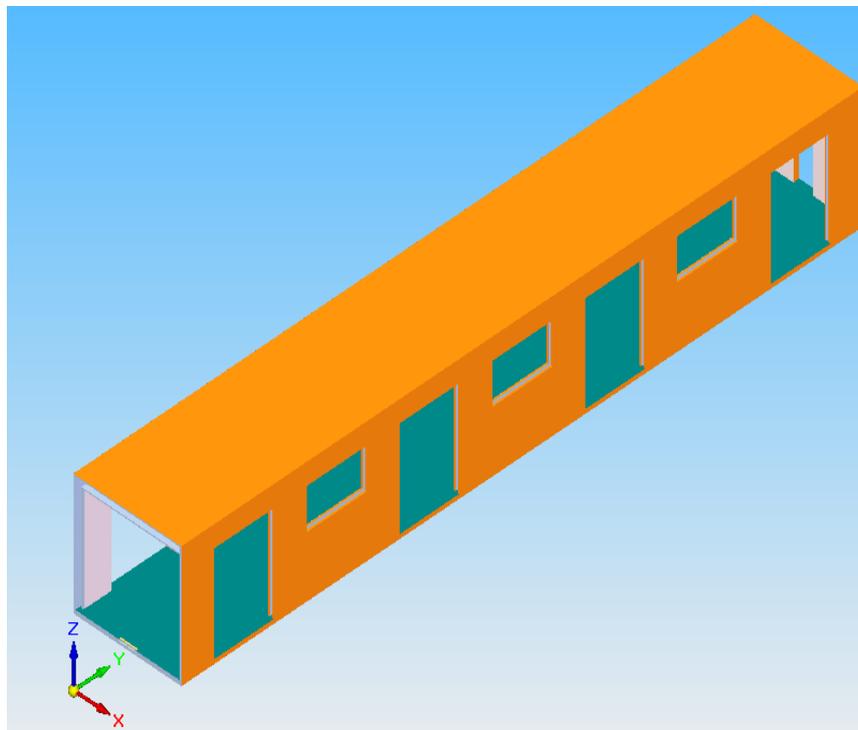


Figura 18. Estructura de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

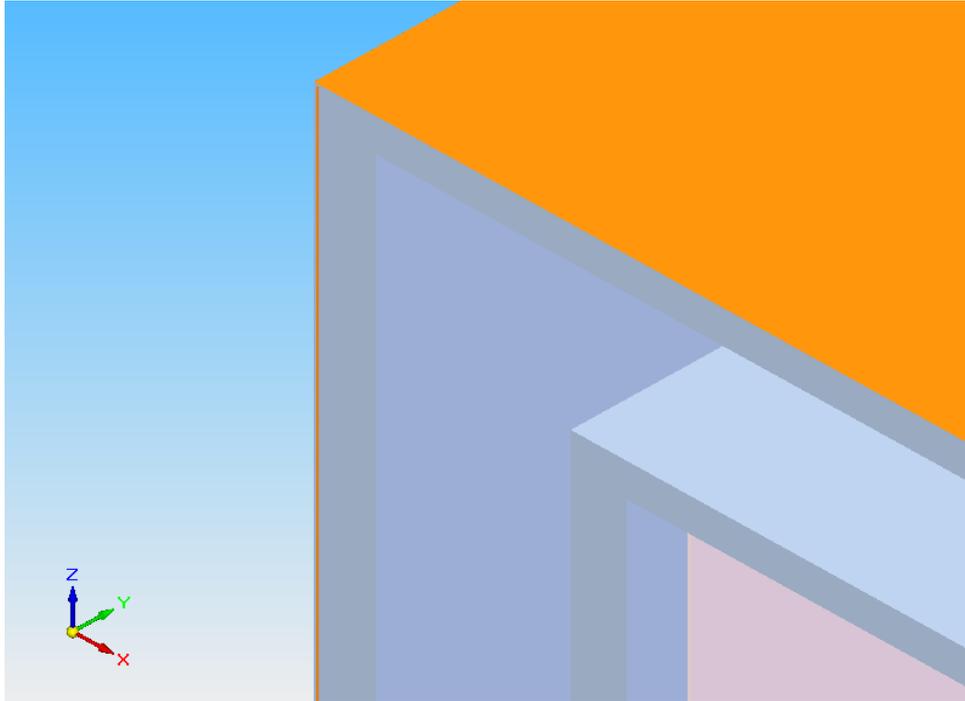


Figura 19. Capas que conforman la estructura de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

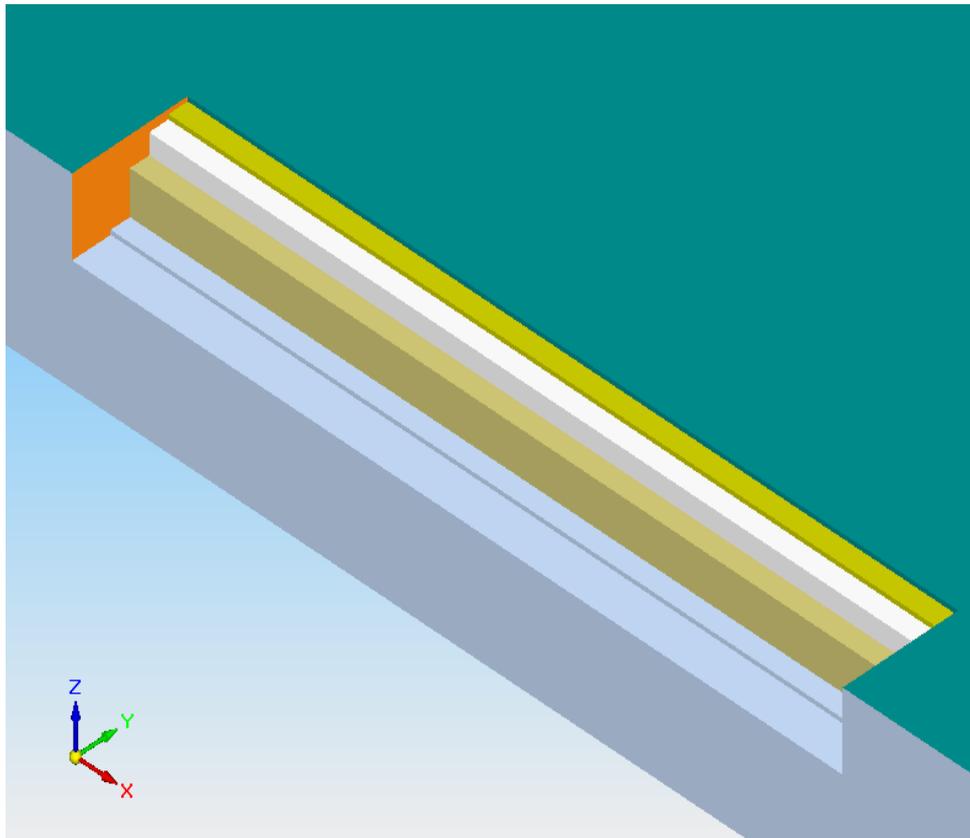


Figura 20. Capas que conforman el piso de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

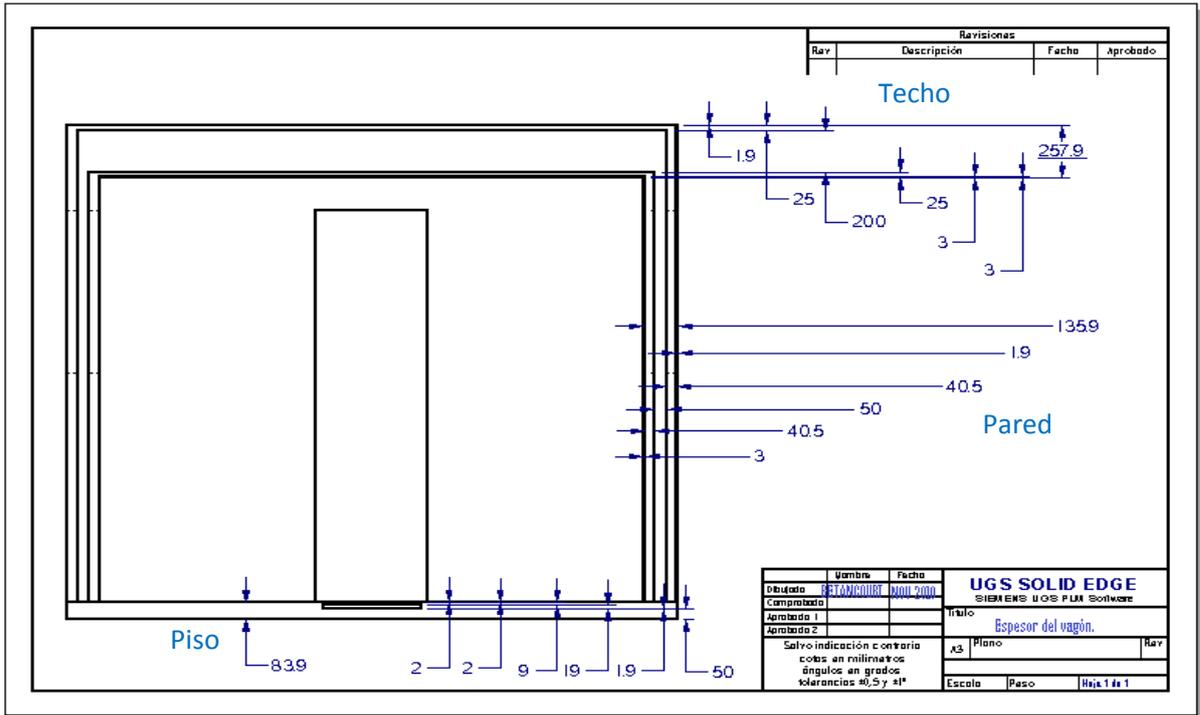


Figura 21. Espesores de las diferentes capas que conforman a un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

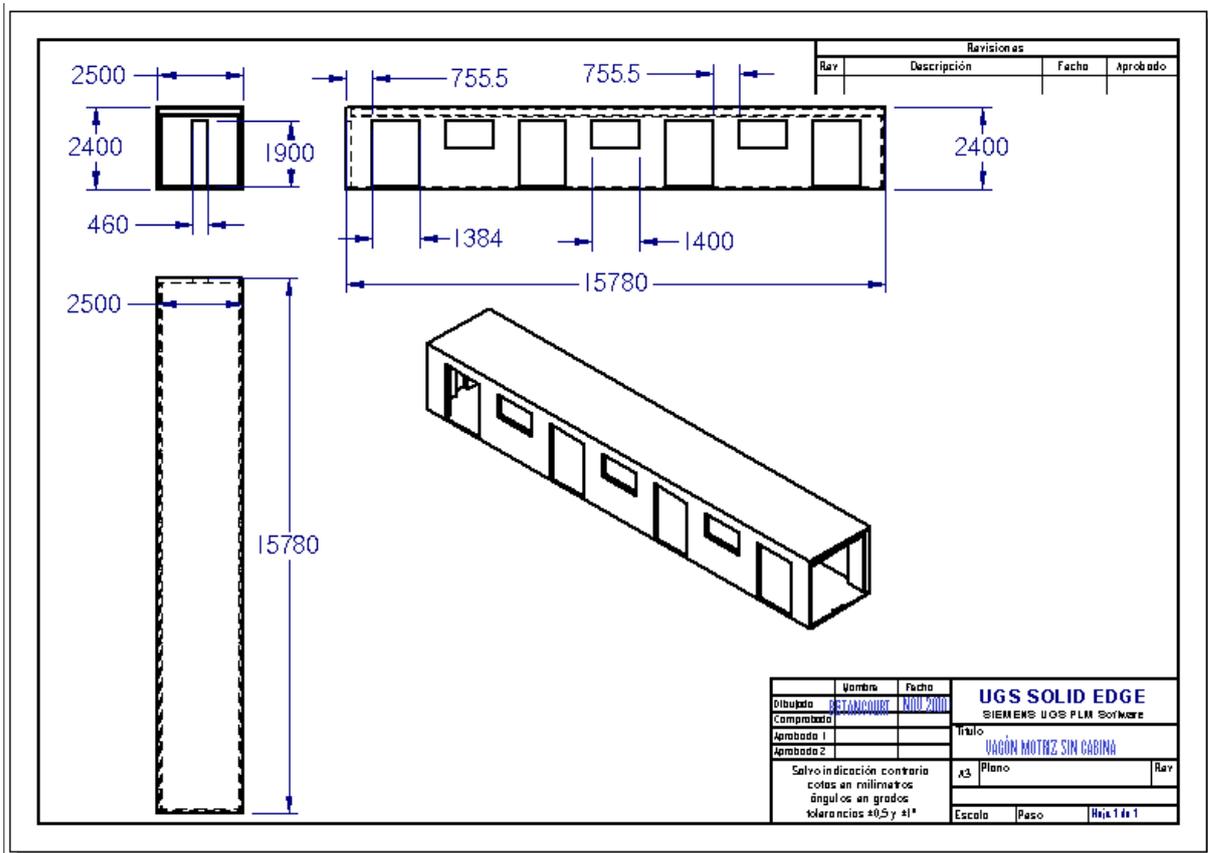


Figura 22. Plano de la estructura de un vagón motriz sin cabina.

Muros:

Tabla 41. Propiedades y dimensiones de las capas de los muros.

Orientación	Primer capa						
	Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m^{\circ}C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_1}{k_1} [\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{W}]$
N	Acero	0.0019	0.010	7830	51.8	76.26	3.67E-05
S	Acero	0.0019	0.010	7830	51.8	76.26	3.67E-05
E	Acero	0.0019	0.046	7830	51.8	357.96	3.67E-05
O	Acero	0.0019	0.046	7830	51.8	357.96	3.67E-05
Orientación	Segunda capa						
	Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m^{\circ}C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_2}{k_2} [\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{W}]$
N	Formica	0.003	0.015	1350	0.258	20.760	0.012
S	Formica	0.003	0.015	1350	0.258	20.760	0.012
E	Formica	0.003	0.072	1350	0.258	97.448	0.012
O	Formica	0.003	0.072	1350	0.258	97.448	0.012
Orientación	Tercera capa						
	Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m^{\circ}C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_3}{k_3} [\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{W}]$
N	Aire Quieto	0.05	0.256	0.9646	0.0263	0.247	1.901
S	Aire Quieto	0.05	0.256	0.9646	0.0263	0.247	1.901
E	Aire Quieto	0.05	1.203	0.9646	0.0263	1.160	1.901
O	Aire Quieto	0.05	1.203	0.9646	0.0263	1.160	1.901
Orientación	Estructura						
	Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m^{\circ}C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_{est}}{k_{est}} [\frac{m^2 \cdot ^{\circ}C}{W}]$
N	Acero	0.081	0.082	7830	51.8	642.060	0.002
S	Acero	0.081	0.082	7830	51.8	642.060	0.002
E	Acero	0.081	0.380	7830	51.8	2975.400	0.002
O	Acero	0.081	0.380	7830	51.8	2975.400	0.002

Techo y piso.

Tabla 42. Propiedades y dimensiones del techo (renglón superior) y del piso (renglón inferior).

Primer capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [ $m^3$ ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$k$ [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_1}{k_1}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Acero	0.0019	0.075	7830	51.8	586.898	3.67E-05
Acero	0.0019	0.075	7830	51.8	586.898	3.67E-05

Segunda capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [ $m^3$ ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$k$ [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_2}{k_2}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Formica	0.003	0.118	1350	0.258	159.773	0.012
Vinil	0.002	0.079	1800	0.12	142.020	0.017

Tercera Capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [ $m^3$ ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$k$ [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_3}{k_3}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Aire Quieto	0.2	7.890	0.9646	0.0263	7.611	7.605
Formica	0.009	0.355	1350	0.258	479.318	0.035

Cuarta Capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [ $m^3$ ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$k$ [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_4}{k_4}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Aluminio anonizado	0.003	0.118	2710	205	320.729	1.46E-05
Resina Fenólica	0.002	0.079	600	0.29	47.340	6.90E-03

Quinta capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [ $m^3$ ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$k$ [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_5}{k_5}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
-	-	-	-	-	-	-
Tryplay	0.019	0.750	430	0.17	322.500	0.112

Estructura						
Material	Espesor [m]	Volumen [ $m^3$ ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	$k$ [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_{est}}{k_{est}}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Acero	0.05	0.626	7830	51.8	4901.580	0.001
Acero	0.05	0.626	7830	51.8	4901.580	0.001

La estructura que soporta las paredes de los vagones del metro está en formas de largueros axiales a las paredes, es por ello que se idealizó la estructura para un cálculo más sencillo como una capa de cierto espesor equivalente al volumen ocupado por los largueros.

Conociendo el espesor de cada material de los muros, el área y la densidad obtenemos el peso de cada material y al sumarlos en cada orientación obtenemos el peso de los muros, de igual manera se obtiene el peso del techo y el piso. Al dividir el peso de los muros en cada orientación por la superficie del piso obtenemos la relación peso de muros por metro

cuadrado de piso que nos ayudará a seleccionar la tabla de diferencia equivalente de temperatura para una estructura de 144 y 143  $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ .

Tabla 43. Peso de la estructura de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

Orientación	Peso de muros [kg]	Peso de muros por $m^2$ de piso [kg]
N	739	144
S	739	144
E	3432	143
O	3432	143
		Peso Total [kg]
Techo		5977
Piso		6480
Vagón		20799

Para los muros podemos seleccionar la relación de diferencia equivalente de temperatura para una pared que pesa 144 [kg] por cada metro cuadrado de piso.

Tabla 44. Diferencia equivalente de temperatura para un muro con un peso de 144 y 143  $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$ .

Diferencia equivalente de temperatura [°C]																				
		Hora solar																		
Orientación	Peso del muro, $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$	Mañana								Tarde										
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
N	144	-1.7	-1.7	-2.2	-1.7	-1.1	0.5	1.7	3.8	5.0	6.2	7.3	7.0	6.7	5.8	4.9	3.8	2.7	1.6	0.5
S	144	-0.5	-1.2	-2.2	0.0	1.5	6.9	11.0	14.1	16.0	15.2	14.4	11.5	9.4	7.1	5.8	4.3	3.5	2.1	1.3
E	143	0.3	7.3	13.1	16.9	19.3	18.9	17.7	11.0	6.9	7.2	7.6	7.7	7.8	6.8	5.8	4.8	3.8	2.7	1.5
O	143	-0.6	-1.2	-1.7	-0.9	0.0	1.6	3.1	5.2	6.4	10.6	13.5	18.4	22.2	21.1	19.1	11.2	4.5	2.9	1.6
Sombra	144/143	-1.7	-1.7	-2.2	-1.7	-1.1	0.5	1.7	3.8	5.0	6.2	7.3	7.0	6.7	5.8	4.9	3.8	2.7	1.6	0.5

Si nosotros operamos la tabla tal como está obtendremos valores para las condiciones ambientales antes mencionadas, es por eso que debemos de aplicarle una corrección para que sea aplicable a las condiciones de la Ciudad de México y a la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo.

De las condiciones de proyecto para el año 2010 en la Ciudad de México:

$$\Delta T_{real} = T_{m\acute{a}x\ prom} - T_{int\ deseada}$$

Tabla 45. Condiciones de proyecto del año 2010 de la Ciudad de México.

Temperatura máxima extrema promedio	30.6 [°C]
Temperatura interior deseada	24 [°C]
$\Delta T_{real}$	6.6 [°C]

Seleccionando con el  $\Delta T_{real}$  la corrección para la diferencia equivalente de temperatura:

Tabla 46. Corrección de la diferencia equivalente de temperatura para las condiciones de proyecto.

Correcciones de las diferencias equivalentes de temperaturas [°C]																							
		Hora solar																					
		Variación de la temperatura exterior en 24 h																					
$\Delta T_{real}$		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24			
6		0.3	-0.3	-0.8	-1.3	-1.7	-2.2	-2.7	-3.1	-3.6	-4	-4.5	-5	-5.4	-5.9	-6.7	-7.2	-7.8	-8	-8.1			

Para corregir la diferencia equivalente de temperatura:

$$\Delta T_e = a + \Delta T_{es} + b \left( \frac{R_s}{R_m} \right) (\Delta T_{em} - \Delta T_{es})$$

Donde:

$\Delta T_e$  = diferencia equivalente de temperatura corregida en [°C]

$a$  = corrección de diferencia equivalente de temperatura respecto a  $\Delta T_{real}$  en [°C]

$\Delta T_{es}$  = dif. eq. tem a la hora considerada para los muros a la sombra en [°C]

$b$  = coeficiente de color de la pared, color medio 0.78

$R_s$  = máxima insolación correspondiente al mes y latitud en  $\left[ \frac{kcal}{h * m^2} \right]$

$R_m$  = máxima insolación correspondiente al mes de julio y latitud en  $\left[ \frac{kcal}{h * m^2} \right]$

$\Delta T_{em}$  = dif. eq. temp a la hora considerada para muros al sol en [°C]

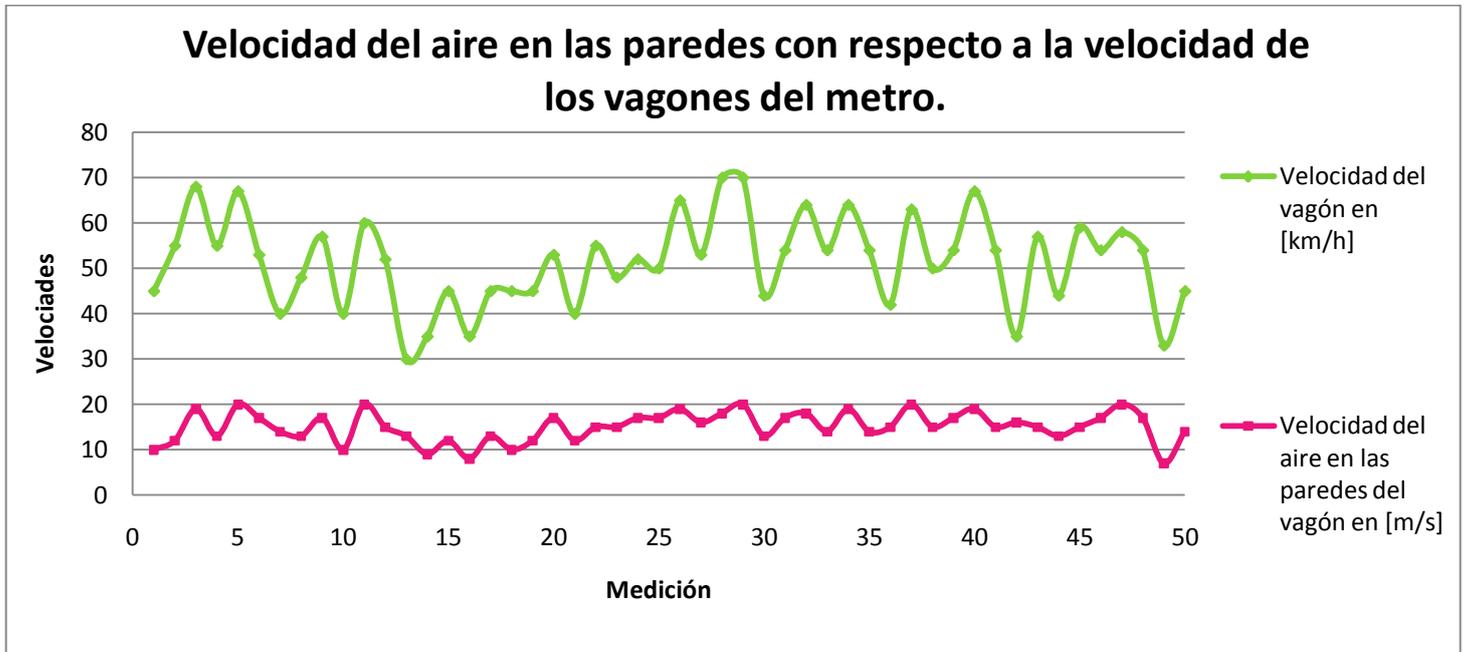
Para poder obtener la ganancia de calor a través de los muros del vagón es necesario obtener el coeficiente global de transmisión global (U).

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{L_4}{k_4} + \frac{L_{est}}{k_{est}} + \frac{1}{h_{ext}}}$$

Donde  $\frac{L_i}{k_i}$  son los espesores de cada capa de la estructura dividida entre la conducción térmica y  $h_{int}$  y el  $h_{ext}$  son el coeficiente de convección del aire al interior y al exterior de la estructura.

Para calcular el coeficiente de convección se determinarán las condiciones del aire al interior y al exterior del vagón en operación.

Mediante un análisis experimental se tomó la velocidad del viento con un anemómetro en las paredes de un vagón en operación, este vagón era un vagón tipo motriz sin cabina. Al mismo tiempo se iban comparando las mediciones de velocidad del aire, con las velocidades alcanzadas por el vagón, obteniéndose los siguientes resultados:



Gráfica 8. Velocidad del metro y el aire en las paredes del vagón.

Obteniéndose una velocidad promedio para el recorrido de un vagón en operación de terminal a terminal de  $52 \left[ \frac{km}{h} \right]$  y una velocidad promedio de  $15 \left[ \frac{m}{s} \right]$  del aire en las paredes del vagón en operación.

Para caracterizar el aire en las paredes del vagón dinámicamente calcularemos el número de Reynolds para especificar si el flujo es laminar o turbulento ya que la fricción superficial y transferencia por convección dependen de gran medida de estas condiciones. Cuando se trata de un flujo laminar el movimiento del fluido es altamente ordenado y es posible identificar líneas de flujo a lo largo de las cuales se mueven las partículas, en cambio cuando el fluido es turbulento el fluido es altamente irregular y se caracteriza por fluctuaciones de velocidad que aumentan la transferencia de energía por convección.

Para determinar el número de Reynolds se debe tomar una longitud característica  $x$  que es igual al largo del vagón.

$$Re_x = \frac{\rho u_\infty x}{\mu}$$

Donde:

$$Re_x = \text{número de Reynolds}$$

$$\rho = \text{densidad del fluido en } \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$u_\infty = \text{velocidad del fluido para un flujo libre}$

$x = \text{longitud característica}$

$\mu = \text{viscosidad dinámica del fluido de trabajo}$

Idealizando que el aire en movimiento tiene la misma temperatura que la promedio extrema de proyecto obtenemos las propiedades del aire a la temperatura de 30.6 [°C]:

Tabla 47. Propiedades del aire a condiciones de proyecto.

Aire					
T [K]	$\rho \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$	$C_p \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} \right]$	$\mu \left[ \frac{\text{N s}}{\text{m}^2} \right]$	$k \left[ \frac{\text{W}}{\text{m K}} \right]$	Pr
303.6	1.1494192	1.007144	0.00001862	0.0265	0.7064

Sustituyendo datos en la ecuación de Reynolds para una velocidad de 15.06  $\left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$  al exterior del vagón:

$$Re_x = 1467002, \quad 4000 \leq Re_x \leq 10^8 \quad \therefore \text{flujo turbulento}$$

El número de Nusselt es un parámetro adimensional que es igual al gradiente de la temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.

Para una geometría establecida en número de Nusselt está en función del Reynolds y del número de Prandtl:

$$Nu = f(Re_x, Pr)$$

Conociendo el Nu se puede encontrar el coeficiente de convección y calcular el flujo de calor.

$$Nu = \frac{h x}{k_f}$$

Donde para un flujo turbulento:

$$Nu_x = (0.037 Re_x^{\frac{4}{5}} - 871) Pr^{\frac{1}{3}}$$

$$Nu_x = 17049$$

Despejando el coeficiente de convección:

$$h = \frac{Nu_x k_f}{x}$$

$$h_{ext} = 28.63 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

De igual manera para una velocidad de  $3 \left[ \frac{m}{s} \right]$  al interior del vagón:

$$Re_x = 3409367, \quad 4000 \leq Re_x \leq 10^8 \quad \therefore \text{flujo turbulento}$$

$$Nu_x = 4757$$

$$h_{int} = 7.99 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$$

Una vez que conocemos los coeficientes de convección del aire al interior al exterior, los espesores y las conductividades térmicas para los muros se pudo calcular el coeficiente global de transmisión de calor:

Tabla 48. Coeficiente global de transmisión de calor de los muros.

Orientación	$U \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$U * A_{muros} \left[ \frac{W}{K} \right]$
N	0.4821	2.471
S	0.4821	2.471
E	0.4821	11.599
O	0.4821	11.599

Para calcular la ganancia de calor a través de las paredes se multiplicará UA de los muros por la diferencia equivalente de temperatura corregida para paredes de color medio.

$$\dot{q}_{pared} = A_{muros} U (\Delta T_e)$$

Tabla 49. Ganancia de calor en las paredes del vagón.

Ganancia de calor en paredes en [W]														
		Hora solar												
Orientación		Mañana						Tarde						
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
N	21 de junio	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		1.0	-2.0	-5.4	-1.8	0.5	11.3	19.0	25.5	28.5	26.4	23.8	16.3	10.8
E		13.0	76.3	128.4	161.3	181.8	174.8	158.2	89.7	45.0	44.8	44.4	39.2	35.4
O		3.6	-9.2	-20.8	-17.3	-12.3	0.1	11.2	30.8	39.8	78.2	103.3	145.2	177.3
Suma		16.2	62.1	96.7	136.7	165.0	184.0	188.0	149.7	118.7	156.8	180.4	207.5	228.8
N	22 de julio y 21 de mayo	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		1.1	-2.0	-5.4	-1.8	0.6	11.6	19.4	25.9	28.9	26.7	24.1	16.5	10.9
E		13.0	76.3	128.4	161.3	181.8	174.8	158.2	89.7	45.0	44.8	44.4	39.2	35.4
O		3.8	-9.2	-20.8	-17.1	-12.1	0.3	11.4	31.0	40.0	79.0	104.4	147.3	180.2
Suma		16.4	62.2	96.7	137.0	165.3	184.5	188.6	150.3	119.4	158.0	181.8	209.7	231.7
N	24 de agosto y 20 de abril	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		1.1	-2.0	-5.4	-1.7	0.6	11.7	19.6	26.1	29.2	27.0	24.3	16.6	11.0
E		12.8	75.3	126.7	159.2	179.5	172.8	156.5	88.9	44.8	44.7	44.4	39.1	35.3
O		3.9	-9.1	-20.7	-17.0	-12.0	0.4	11.6	31.2	40.2	79.5	105.1	148.6	181.9
Suma		16.4	61.3	95.1	135.1	163.2	182.7	187.2	149.9	119.6	158.6	182.7	211.1	233.4
N	22 de septiembre y 22 de marzo	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		1.1	-2.0	-5.4	-1.8	0.6	11.6	19.4	25.9	28.9	26.7	24.1	16.5	10.9
E		12.8	75.3	126.7	159.2	179.5	172.8	156.5	88.9	44.8	44.7	44.4	39.1	35.3
O		3.8	-9.2	-20.8	-17.1	-12.1	0.3	11.4	31.0	40.0	79.0	104.4	147.3	180.2
Suma		16.2	61.2	95.1	134.9	163.0	182.5	186.9	149.5	119.2	157.9	181.8	209.7	231.6
N	22 de octubre y 20 de febrero	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		0.8	-2.1	-5.4	-2.1	0.0	10.2	17.4	23.7	26.6	24.8	22.6	15.5	10.4
E		12.8	75.3	126.7	159.2	179.5	172.8	156.5	88.9	44.8	44.7	44.4	39.1	35.3
O		2.8	-9.6	-21.2	-17.9	-13.2	-0.7	10.1	29.7	38.6	74.6	98.2	135.8	164.7
Suma		14.9	60.6	94.6	133.7	161.4	180.0	183.5	146.0	115.4	151.5	174.0	197.2	215.5
N	21 de noviembre y 21 de enero	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		0.5	-2.2	-5.4	-2.6	-0.6	8.6	15.1	21.1	23.9	22.6	20.8	14.4	9.7
E		12.8	75.3	126.7	159.2	179.5	172.8	156.5	88.9	44.8	44.7	44.4	39.1	35.3
O		1.5	-10.2	-21.8	-18.9	-14.5	-2.0	8.5	28.1	37.0	69.5	90.9	122.5	146.7
Suma		13.3	60.0	94.0	132.3	159.5	177.2	179.7	141.9	111.1	144.2	165.0	182.8	196.9
N	22 de diciembre	-1.5	-3.0	-5.4	-5.4	-4.9	-2.2	-0.5	3.7	5.5	7.4	8.9	6.8	5.2
S		0.4	-2.2	-5.4	-2.7	-0.9	8.0	14.3	20.1	22.9	21.8	20.2	14.0	9.5
E		12.8	75.3	126.7	159.2	179.5	172.8	156.5	88.9	44.8	44.7	44.4	39.1	35.3
O		1.0	-10.4	-22.0	-19.3	-15.0	-2.4	7.9	27.5	36.3	67.6	88.2	117.6	140.0
Suma		12.8	59.7	93.8	131.8	158.8	176.1	178.3	140.3	109.5	141.5	161.7	177.4	189.9

Encontrándose ganancias máximas de 233.4 [W] en los meses de agosto y abril a las 18 horas. De la misma manera se calcula la diferencia equivalente de temperatura para techos color medio.

Tabla 50. Diferencia equivalente de temperatura para techos color medio.

Diferencia equivalente de temperatura para techos color medio [°C]																				
		Hora solar																		
Condiciones	Peso del muro [ $\frac{kg}{m^2}$ ]	Mañana								Tarde										
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Soleado	100	0.0	-0.5	-1.1	-0.5	1.1	5.0	8.9	12.8	16.7	20.0	22.8	23.9	23.9	22.2	19.4	16.7	13.9	11.1	8.3
	200	2.2	1.7	1.1	1.7	3.3	5.5	8.9	12.8	15.6	18.3	21.1	22.2	22.8	21.7	19.4	17.8	15.6	13.3	11.1
	144	0.8	0.4	-0.1	0.4	1.8	4.5	7.7	11.1	14.1	16.7	19.1	20.1	20.3	19.0	16.8	14.9	12.7	10.5	8.3

Tabla 51. Diferencia equivalente de temperatura para techos corregida.

Diferencia equivalente de temperatura para techos color medio corregido [°C]																				
		Hora solar																		
Condiciones	Peso del muro [ $\frac{kg}{m^2}$ ]	Mañana								Tarde										
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Soleado	144	1.3	1.4	1.4	2.3	3.8	6.6	9.8	13.1	16.1	18.7	21.3	22.5	23.1	22.4	21.2	19.9	18.6	16.9	15.2

Donde la ecuación de cálculo de coeficiente de transmisión de calor del techo es:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{L_{est}}{k_{est}} + \frac{1}{h_{ext}}}$$

La cual se multiplicará por el área del techo:

Tabla 52. Coeficiente global de transferencia de calor del techo.

Tipo	$U \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$	$U * A \left[ \frac{W}{K} \right]$
Techo	0.129	5.072

Para calcular la ganancia de calor a través del techo se multiplicará UA del techo por la diferencia equivalente de temperatura corregida para techos de color medio.

$$\dot{q}_{techo} = A U (\Delta T_e)$$

Obteniendo:

Tabla 53. Ganancia de calor por radiación del sol en el techo del vagón.

Ganancia de calor por radiación del sol para techos color medio [W]															
Condiciones	Peso del muro $\left[\frac{kg}{m^2}\right]$	Hora solar													
		Mañana							Tarde						
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Soleado	144	6.4	7.2	7.1	11.6	19.4	33.6	49.8	66.5	81.7	95.0	107.9	114.2	117.1	113.7

Sumando la ganancia de calor de las paredes por radiación para las 7 temporadas del año, la ganancia de calor de los techos por radiación y la ganancia de calor de las ventanas para las 7 temporadas del año:

Tabla 54. Ganancia de calor solar en la estructura del vagón.

	Ganancia de calor solar en la estructura del vagón en [W]													
	Hora solar													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
21 de junio	1794	3380	3727	3451	2504	1388	844	1387	2520	3554	3911	3632	2125	
22 de julio y 21 de mayo	1665	3346	3781	3468	2563	1487	1016	1485	2580	3572	3967	3601	1991	
24 de agosto y 20 de abril	1169	3193	3785	3548	2711	1600	621	1600	2730	3655	3973	3450	1496	
22 de septiembre y 22 de marzo	23	2912	3748	3564	2695	1505	880	1505	2714	3672	3942	3169	349	
22 de octubre y 20 de febrero	21	2228	3396	3399	2615	1611	910	1609	2632	3500	3576	2471	333	
21 de noviembre y 21 de enero	20	1630	2992	3098	2420	1482	881	1480	2457	3193	3164	1860	314	
22 de diciembre	19	1288	2771	2982	2301	1304	885	1301	2314	3076	2940	1513	307	
	Ganancia de calor solar en la estructura del vagón en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$													
	Hora solar													
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
21 de junio	1543	2907	3205	2968	2154	1194	726	1193	2167	3057	3364	3124	1827	
22 de julio y 21 de mayo	1432	2878	3252	2982	2204	1278	874	1277	2218	3072	3411	3097	1712	
24 de agosto y 20 de abril	1005	2746	3255	3052	2332	1376	534	1376	2348	3144	3417	2967	1287	
22 de septiembre y 22 de marzo	19	2504	3224	3065	2318	1294	757	1294	2334	3158	3390	2725	300	
22 de octubre y 20 de febrero	18	1916	2920	2923	2249	1385	783	1384	2263	3010	3075	2125	286	
21 de noviembre y 21 de enero	17	1402	2573	2664	2081	1275	758	1273	2113	2746	2721	1600	270	
22 de diciembre	17	1108	2383	2565	1979	1121	761	1119	1990	2645	2528	1301	264	

La máxima influencia del sol en la estructura del vagón podría ser en los meses de agosto y abril con una carga de 3973 [W] o bien 3417  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

### 5.1.6. Motores eléctricos.

Una de las principales fuentes de calor proviene de los equipos eléctricos, los motores eléctricos son equipos que emiten fuentes de ganancias sensibles ya que transforman gran parte de la energía mecánica en calor.

El Sistema de Transporte Colectivo Metro, cuenta con diferentes equipos eléctricos pero la mayor potencia disipada en forma de calor la emite el motor de corriente directa que sirve para poder remolcar los vagones. El motor del Sistema de Transporte Colectivo de la línea 3 es un motor-generador de tracción, cada vagón motriz con o sin cabina cuenta con dos motores de tracción los cuales tienen la siguiente descripción:

Tabla 55. Datos de placa del motor de tracción de la línea 3.

Motor-generador de tracción.		
Tipo de corriente	Directa	
Tipo	GLM0331	
Serie	40625P21387	
Voltaje	720	V
Corriente	360	A
Revoluciones	3120	RPM
Resistencia	0.058	$\Omega$
Potencia útil	114	KW
Excitación	Serie	

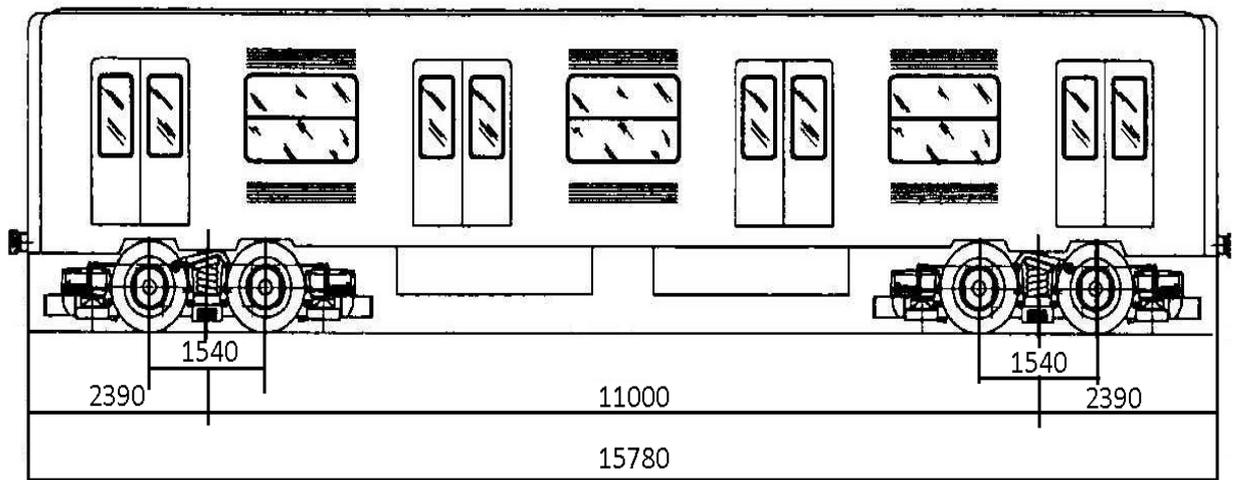


Figura 23. Vagón motriz sin cabina de la línea 3.

La mayoría de la energía calorífica disipada por los motores se transfiere por conducción al piso del vagón elevando la temperatura al interior.



Figura 24. Bogue de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.



Figura 25. Motor de c.d. (1) de un vagón motriz sin cabina de la línea 3.

En los motores de corriente directa con excitación en serie, el devanado de campo se encuentra conectado en serie con la armadura, de manera que la corriente total que demanda pasa por el devanado de campo y también por la armadura.

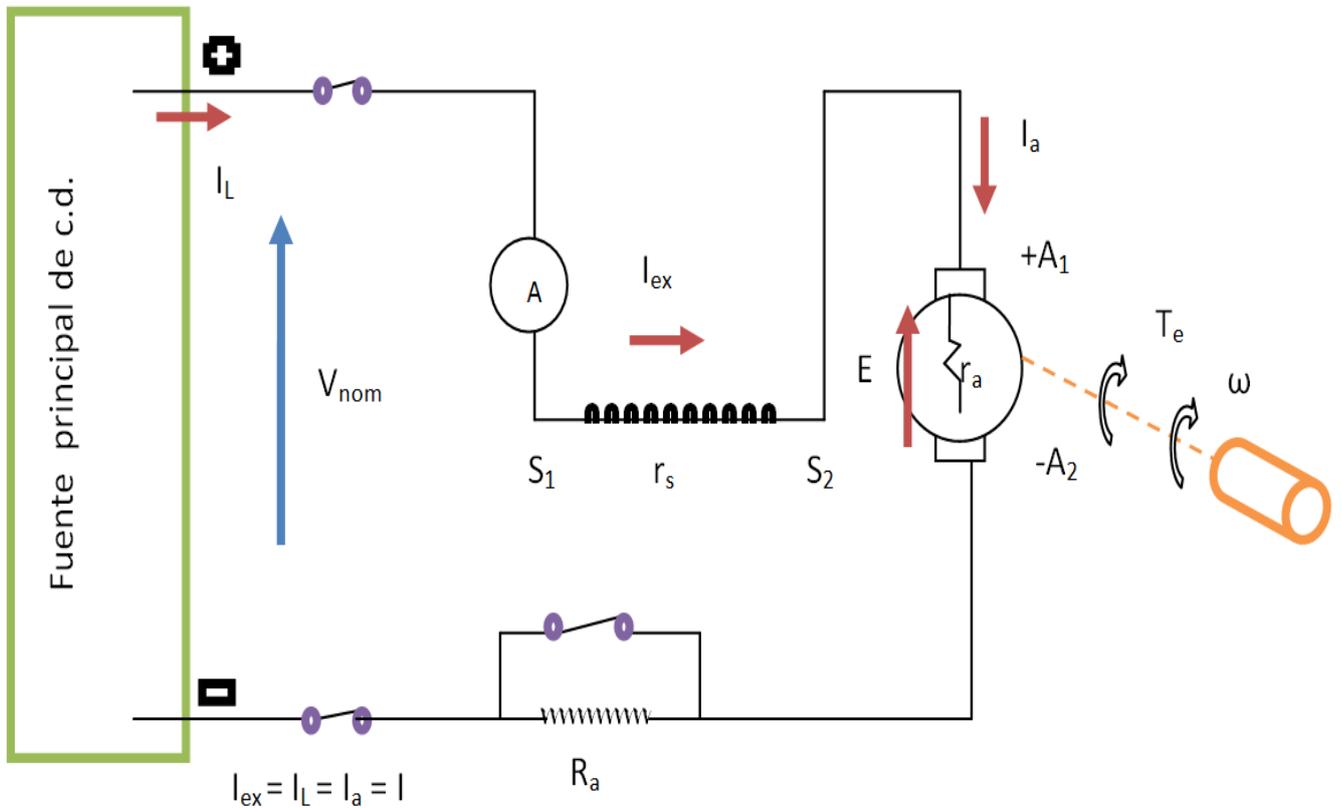


Figura 26. Diagrama de conexiones de un motor de c.d. con excitación en serie.

La fuerza electromotriz desarrollada en un motor de corriente directa es:

$$fem = V - I(r_s + r_a)$$

Donde:

$$fem = \text{fuerza electromotriz en [V]}$$

$$V = \text{voltaje en [V]}$$

$$I = \text{corriente en [A]}$$

$$r_s = \text{resistencia del devanado de campo en } [\Omega]$$

$$r_a = \text{resistencia de la armadura en } [\Omega]$$

La potencia demandada es:

$$P = VI$$

$$P = \text{potencia demandada en [W]}$$

La potencia desarrollada

$$P_{des} = P_{ent} - P_{pér}$$

$P_{des}$  = potencia desarrollada en [W]

$P_{ent}$  = potencia de entrada en [W]

$P_{pér}$  = potencia de pérdidas en [W]

$$P_{des} = VI - I^2(r_s + r_a)$$

Calculando la potencia calorífica generada por los motores del metro de la línea 3:

$$P_{pér} = I^2(r_s + r_a)$$

Tabla 56. Calor disipado por el motor de c.d.

Calor disipado por el motor.		
$r_s + r_a$	0.058	$\Omega$
$P_{pér} = I^2(r_s + r_a)$	7.5	[kW]
Potencia calorífica disipada	6464.5	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$
Potencia calorífica disipada por los dos motores del vagón.	15	[kW]
	12929	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$
Rendimiento	93.8%	

Un proceso común de generación de energía térmica implica la conversión de energía eléctrica a energía térmica en un medio conductor de corriente (resistencia). La razón a la que se genera energía al pasar una corriente I a través de un medio de resistencia eléctrica es:

$$\dot{E}_g = I^2(r_s + r_a)$$

Si esta generación de potencia ocurre de manera uniforme a lo largo del medio de volumen V, la razón de generación volumétrica  $\left[\frac{W}{m^3}\right]$  es entonces:

$$\frac{\dot{E}_g}{V} = \frac{I^2(r_s + r_a)}{V}$$

Es importante definir que debe de haber una conservación de la energía en nuestro volumen de control, que viene definido por nuestro vagón y esta ley debe de satisfacerse en todos y cada uno de los instantes de tiempo t.

Si el flujo entrante y la generación de energía exceden al flujo saliente habrá un aumento en la cantidad de energía almacenada en nuestro volumen de control y si ocurre lo contrario habrá una disminución en el almacenamiento de energía. Si el flujo entrante y la generación de

energía igualan al flujo de salida, entonces se dice que estamos en condiciones de estado estable donde no existe cambio en la cantidad de energía almacenada en el volumen de control.

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm}$$

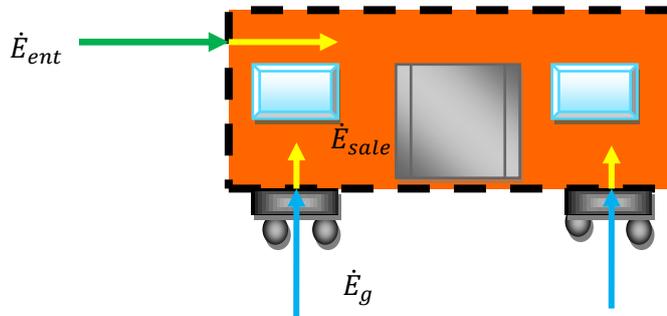


Figura 27. Balance de energía de un volumen de control.

Tomando el Sistema de Transporte Colectivo como en estado estable, el volumen de control es nuestro piso y la energía generada proviene de los motores del metro:

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sale}$$

Donde la potencia calorífica que entra es por conducción a través del piso, y la generada es la potencia calorífica disipada por los motores:

$$\dot{q}_{entra} = A_{piso} U_{piso} (\Delta T)$$

$$\dot{E}_g = I^2 (r_s + r_a)$$

$$\dot{q}_{entra} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sale}$$

$$A_{piso} U_{piso} (\Delta T) + I^2 (r_s + r_a) = \dot{E}_{sale}$$

Calculando el área para las dimensiones y propiedades del piso del vagón del metro:

Tabla 57. Área del piso de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.

Ancho [m]	Largo [m]	$A_{piso} [m^2]$
2.5	15.78	39.450

Determinando el coeficiente global de transmisión de calor para los espesores del piso del vagón del metro:

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_{int}} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{L_4}{k_4} + \frac{L_5}{k_5} + \frac{L_{est}}{k_{est}} + \frac{1}{h_{ext}}}$$

Tabla 58. Propiedades de los espesores del piso de un vagón tipo motriz sin cabina de la línea 3.

Primer capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_1}{k_1}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Acero	0.0019	0.075	7830	51.8	586.898	3.67E-05
Segunda capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_2}{k_2}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Vinil	0.002	0.079	1800	0.12	142.020	0.017
Tercera Capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_3}{k_3}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Formica	0.009	0.355	1350	0.258	479.318	0.035
Cuarta Capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_4}{k_4}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Resina Fenólica	0.002	0.079	600	0.29	47.340	6.90E-03
Quinta capa						
Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_5}{k_5}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Tryplay	0.019	0.750	430	0.17	322.500	0.112
Estructura						
Material	Espesor [m]	Volumen [m <sup>3</sup> ]	Densidad [ $\frac{kg}{m^3}$ ]	k [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]	Peso [kg]	$\frac{L_{est}}{k_{est}}$ [ $\frac{m^2 \cdot ^\circ C}{W}$ ]
Acero	0.05	0.626	7830	51.8	4901.580	0.001

Tabla 59. Coeficiente global de transmisión de calor del piso.

$$U \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad U * A_{muros} \left[ \frac{W}{K} \right]$$

3.017	119.04
-------	--------

Para las condiciones de proyecto del metro en la superficie:

Tabla 60. Condiciones de proyecto del metro.

Temperatura máxima extrema promedio	30.5 [°C]
Temperatura interior deseada	24 [°C]
$\Delta T$	6.5 [°C]

La potencia calorífica disipada por los motores y transmitida por conducción es igual a la potencia calorífica de salida la cual afecta el interior del metro.

Tabla 61. Potencia calorífica disipada por los motores y transmitida al interior del vagón por conducción.

$\dot{q}_{entra}$	$\dot{E}_g$	$\dot{E}_{sale}$	
0.7737	15	15.7373	[kW]
665.269	12929	13562	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$

Como podemos observar la potencia calorífica que se transmite al vagón debida a los motores es muy elevada casi 16 [kW] o 13562  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$  y es una de las principales causas de la elevación de la temperatura al interior del vagón.

## 5.2 Estaciones subterráneas.

En el caso de las estaciones subterráneas del Sistema de Transporte Colectivo de la línea 3 no habrá influencia de la radiación del sol, por lo que se analizará la transferencia de calor debida a alumbrado, personas y motores.

Para poder analizar el trayecto del metro a través de toda la línea se tomarán todas las estaciones subterráneas como iguales y en el trayecto del túnel no habrá transmisión de calor por personas y alumbrado fuera del vagón.

Cada estación subterránea de la línea 3 posee 112 lámparas con 2 tubos fluorescentes de 38 [W], por lo que analizando de la misma manera que en alumbrado del vagón:

Tabla 62. Características de las lámparas de las estaciones de la línea 3.

Línea 3	Lámparas		
	Tipo	Vagón	Potencia útil [W]
	Fluorescentes	13	38

Tabla 63. Potencia calorífica sensible disipada por las lámparas de las estaciones de la línea 3.

Lámparas fluorescentes	Estación		
	Ganancia sensible $\left[\frac{kcal}{h}\right]$	Ganancia sensible [W]	[kW - h]
1	33	38	137
13	425	494	1178

Obteniéndose una potencia calorífica sensible disipada por las lámparas de 950 [W] u 817  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

En las estaciones con mayor afluencia y con correspondencia de la línea 3 se puede observar a las horas pico los pasillos de las estaciones completamente transitados por personas que

esperan el ascenso hacia los vagones, para las estaciones con mayor afluencia se tomará que habrá en promedio 40 usuarios de pie y 10 usuarios de marcha rápida.

Tabla 64. Potencia calorífica emitida por las personas en cada estación de la línea 3.

Estación						Potencia total en la estación en $\left[\frac{kcal}{h}\right]$	Potencia total en la estación en $[kW]$
Usuarios			Potencia neta $\left[\frac{kcal}{h}\right]$				
De pie	Marcha	Total	De pie	Marcha	Total		
40	10	50	5544	2772	8316	8316	10

Obteniéndose una potencia calorífica emitida por las personas en la estación por cada vagón de 10  $[kW]$  ó  $8316 \left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

Tomándose para los motores la misma cantidad de energía disipada:

Tabla 65. Calor disipado por el motor de c.d.

Calor disipado por el motor.		
$r_s + r_a$	0.058	$\Omega$
$P_{p\acute{e}r} = I^2(r_s + r_a)$	7.5	$[kW]$
Potencia calorífica disipada	6464.5	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$
Potencia calorífica disipada por los dos motores del vagón.	15	$[kW]$
	12929	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$
Rendimiento	93.8%	

Obteniéndose una potencia calorífica disipada por los motores de 15  $[kW]$  o bien  $12929 \left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

Analizando de nuevo nuestro volumen de control:

$$\dot{E}_{entra} + \dot{E}_g - \dot{E}_{sale} = \dot{E}_{alm}$$

Donde la energía de entrada es la energía por el cambio de condiciones al interior y al exterior del vagón, se idealizará que no existe energía almacenada debido a que se analizará como estado estable, la energía que sale es la que afecta a las condiciones al interior del vagón y la energía generada será aquella que proviene de las personas, lámparas y motores al exterior.

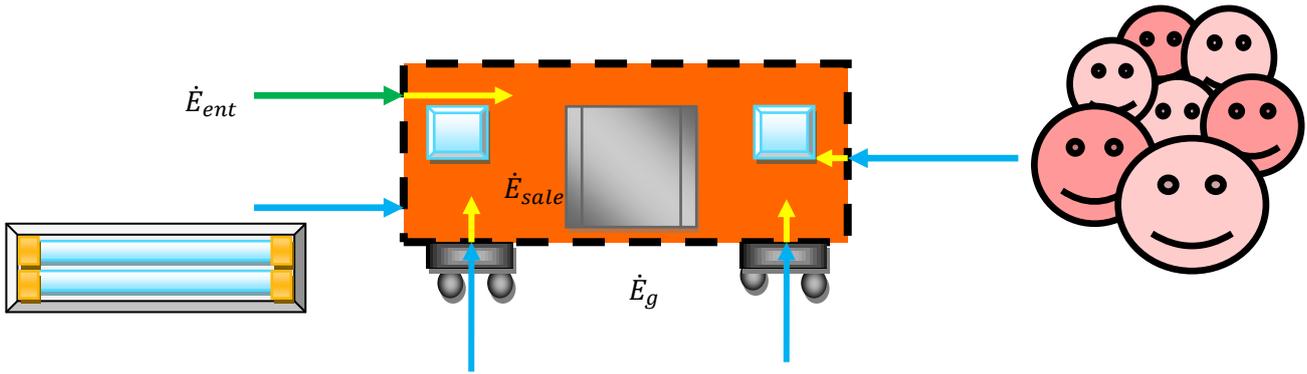


Figura 28. Balance de energía de un volumen de control.

Obteniéndose la siguiente ecuación:

$$\dot{q}_{entra} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sale}$$

Donde:

$$\dot{q}_{entra} = A_{\text{piso y paredes}} U_{\text{piso y paredes}} (\Delta T)$$

$$\dot{E}_g = \dot{q}_{\text{usuarios}} + \dot{q}_{\text{lámparas}} + \dot{q}_{\text{motores}}$$

$$A_{\text{piso y paredes}} U_{\text{piso y paredes}} (\Delta T) + \dot{q}_{\text{usuarios}} + \dot{q}_{\text{lámparas}} + \dot{q}_{\text{motores}} = \dot{E}_{sale}$$

Calculando para las condiciones de proyecto del metro en el subterráneo:

Tabla 66. Condiciones de proyecto del metro para el subterráneo.

Temperatura máxima extrema promedio	36 [°C]
Temperatura interior deseada	24 [°C]
$\Delta T$	12 [°C]

Y para los coeficientes globales de transmisión de calor para las paredes, ventanas, puertas, pisos y techos de un vagón tipo motriz sin cabina:

$$\dot{q}_{entra} = A_{\text{piso y paredes}} U_{\text{piso y paredes}} (\Delta T)$$

Tabla 67. Coeficiente global de transmisión de calor del piso, techo, puertas, ventanas y paredes y potencia calorífica emitida por el cambio de temperatura al interior del vagón.

Orientación	U*A $\left[\frac{W}{K}\right]$		
	Paredes	Puertas	Ventanas
N	2.471	5.439	0.855
S	2.471	5.439	0.855
E	11.598	65.463	24.510
O	11.598	65.463	24.510
Techo	5.07		
Piso	119.04		
Total	344.784		
$\dot{q}_{entra}$	4.14		$[kW]$
	3558		$\left[\frac{kcal}{h}\right]$

Para el cálculo de la energía generada:

$$\dot{E}_g = \dot{q}_{usuarios} + \dot{q}_{lámparas} + \dot{q}_{motores}$$

Tabla 68. Potencia calorífica generada por lámparas, personas y motores.

$\dot{E}_g$			
$\dot{q}_{lámparas}$	$\dot{q}_{usuarios}$	$\dot{q}_{motores}$	
0.494	10	15	$[kW]$
425	8316	12929	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$
$\dot{E}_g$		25.164	$[kW]$
		21670	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$

Por último sustituyendo los valores en la siguiente ecuación se obtiene la potencia calorífica de salida.

$$\dot{q}_{entra} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sale}$$

Tabla 69. Potencia calorífica que afecta al interior del vagón en las estaciones subterráneas.

$\dot{q}_{entra}$	$\dot{E}_g$	$\dot{E}_{sale}$	
4.1374	25	29.301	$[kW]$
3557.4	21670	25227	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$

Se puede observar que la potencia calorífica que afecta al interior del vagón proveniente de cargas externas es de 29.3  $[kW]$  o bien 25227  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ , es importante señalar que no en todas las

estaciones existe la misma afluencia de personas, pero en las estaciones de correspondencia existe la mayor demanda del servicio hasta situaciones que es imposible el paso y el ascenso y descenso de pasajeros provocando la elevación de temperatura al interior y al exterior del vagón.

## 6. CARGA TOTAL

La carga total al interior de los vagones del metro de la línea 3 se encuentra al sumar todas las cargas interiores y exteriores.

Es importante resaltar que tendremos dos condiciones analizadas, las condiciones de transmisión de calor para las estaciones superficiales y las condiciones de transmisión de calor para las estaciones subterráneas.

Tabla 70. Cargas interiores y exteriores que actúan sobre el vagón.

Cargas interiores						
	Vagón	$\frac{[kcal]}{h}$	$[kW]$	Tren	$\frac{[kcal]}{h}$	$[kW]$
	Personas	Vagón 5/4	28406.40	33.03	Tren 5/4	255657.60
Lámparas		784.32	0.91		7058.88	8.21
Suma		29190.72	33.94		262716.48	305.48
Cargas exteriores						
Estaciones superficiales						
	Vagón	$\frac{[kcal]}{h}$	$[kW]$	Tren	$\frac{[kcal]}{h}$	$[kW]$
	Motores		13562.33	15.77		122060.98

Radiación solar a través de paredes, techos y vidrios

$[kW]$	Hora solar												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 de junio	1.79	3.38	3.73	3.45	2.50	1.39	0.84	1.39	2.52	3.55	3.91	3.63	2.12
22 de julio y 21 de mayo	1.67	3.35	3.78	3.47	2.56	1.49	1.02	1.49	2.58	3.57	3.97	3.60	1.99
24 de agosto y 20 de abril	1.17	3.19	3.78	3.55	2.71	1.60	0.62	1.60	2.73	3.66	3.97	3.45	1.50
22 de septiembre y 22 de marzo	0.02	2.91	3.75	3.56	2.70	1.50	0.88	1.51	2.71	3.67	3.94	3.17	0.35
22 de octubre y 20 de febrero	0.02	2.23	3.40	3.40	2.62	1.61	0.91	1.61	2.63	3.50	3.58	2.47	0.33
21 de noviembre y 21 de enero	0.02	1.63	2.99	3.10	2.42	1.48	0.88	1.48	2.46	3.19	3.16	1.86	0.31
22 de diciembre	0.02	1.29	2.77	2.98	2.30	1.30	0.89	1.30	2.31	3.08	2.94	1.51	0.31
$\frac{[kcal]}{h}$	Hora solar												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 de junio	1542.87	2906.62	3204.94	2967.91	2153.56	1193.80	726.12	1192.50	2167.35	3056.73	3363.63	3123.78	1827.24
22 de julio y 21 de mayo	1431.99	2877.82	3251.54	2982.20	2204.28	1278.47	874.10	1277.34	2218.40	3072.05	3411.38	3096.84	1712.27
24 de agosto y 20 de abril	1005.04	2746.22	3255.09	3051.61	2331.65	1375.98	533.64	1376.02	2347.70	3143.61	3417.04	2967.17	1286.85
22 de septiembre y 22 de marzo	19.47	2504.17	3223.53	3065.13	2317.78	1294.00	756.58	1294.39	2334.32	3158.01	3390.09	2725.35	299.84
22 de octubre y 20 de febrero	18.32	1915.70	2920.19	2922.95	2249.26	1385.20	782.61	1384.17	2263.29	3010.04	3075.17	2125.28	286.00
21 de noviembre y 21 de enero	17.00	1402.03	2573.26	2664.44	2080.82	1274.90	757.57	1272.77	2112.62	2746.40	2720.98	1599.78	269.97
22 de diciembre	16.51	1107.74	2383.49	2564.91	1979.28	1121.45	761.42	1118.90	1990.43	2644.97	2528.49	1301.09	264.00

Estaciones subterráneas						
	Vagón	$\frac{[kcal]}{h}$	$[kW]$	Tren	$\frac{[kcal]}{h}$	$[kW]$
	Motores, lámparas y personas		25227.21	29.30		227044.85

Tabla 71. Suma de las cargas interiores y exteriores que actúan sobre el vagón para la condición de estaciones subterráneas y superficiales.

Carga total estaciones superficiales													
[kW]	Hora solar												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 de junio	51.51	53.10	53.44	53.17	52.22	51.10	50.56	51.10	52.24	53.27	53.63	53.35	51.84
22 de julio y 21 de mayo	51.38	53.06	53.50	53.18	52.28	51.20	50.73	51.20	52.30	53.29	53.68	53.32	51.71
24 de agosto y 20 de abril	50.88	52.91	53.50	53.26	52.43	51.32	50.34	51.32	52.45	53.37	53.69	53.17	51.21
22 de septiembre y 22 de marzo	49.74	52.63	53.46	53.28	52.41	51.22	50.60	51.22	52.43	53.39	53.66	52.89	50.06
22 de octubre y 20 de febrero	49.74	51.94	53.11	53.11	52.33	51.33	50.63	51.33	52.35	53.22	53.29	52.19	50.05
21 de noviembre y 21 de enero	49.74	51.35	52.71	52.81	52.14	51.20	50.60	51.20	52.17	52.91	52.88	51.58	50.03
22 de diciembre	49.74	51.00	52.49	52.70	52.02	51.02	50.60	51.02	52.03	52.79	52.66	51.23	50.02
$\left[\frac{kcal}{h}\right]$	Hora solar												
	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
21 de junio	44296	45660	45958	45721	44907	43947	43479	43946	44920	45810	46117	45877	44580
22 de julio y 21 de mayo	44185	45631	46005	45735	44957	44032	43627	44030	44971	45825	46164	45850	44465
24 de agosto y 20 de abril	43758	45499	46008	45805	45085	44129	43287	44129	45101	45897	46170	45720	44040
22 de septiembre y 22 de marzo	42773	45257	45977	45818	45071	44047	43510	44047	45087	45911	46143	45478	43053
22 de octubre y 20 de febrero	42771	44669	45673	45676	45002	44138	43536	44137	45016	45763	45828	44878	43039
21 de noviembre y 21 de enero	42770	44155	45326	45417	44834	44028	43511	44026	44866	45499	45474	44353	43023
22 de diciembre	42770	43861	45137	45318	44732	43874	43514	43872	44743	45398	45282	44054	43017
Carga total estaciones subterráneas													
	Vagón	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$	[kW]	Tren	$\left[\frac{kcal}{h}\right]$	[kW]							
		54417.93	63.24		489761.33	569.19							

Analizando los resultados podemos observar que la carga total en los vagones del metro de la línea 3 es más alta en las estaciones subterráneas que en las estaciones superficiales. La carga total aumenta hasta un 18% en las estaciones subterráneas, esto es debido a que el calor generado por las personas y lámparas en el subterráneo es mayor al irradiado por el sol en las estaciones superficiales, además de que en las estaciones superficiales este calor se disipa fácilmente a los alrededores.

Para las estaciones subterráneas la carga térmica es de 63.24 [kW] o bien 54417.93  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$  y para las estaciones superficiales es de 53.69 [kW] o bien 46170  $\left[\frac{kcal}{h}\right]$ .

Una tonelada de refrigeración es la unidad nominal para referirse a la capacidad de extracción de la carga térmica para el enfriamiento de los equipos de aire acondicionado. Nos indica la cantidad de calor absorbida por la fusión de una tonelada de hielo sólido puro en 24 horas, esto equivale en los equipos a poder extraer 12000  $\left[\frac{BTU}{h}\right]$  o 3.517 [kW].

Reflejando las cargas térmicas en toneladas de refrigeración podemos decir que se necesitan 18 toneladas de refrigeración para cada vagón en la línea 3 cuando este viaja por los túneles, o

15.3 toneladas de refrigeración para cada vagón en la línea 3 cuando este viaja por la superficie, para poder mantener las condiciones de 24 [°C] al interior del vagón.

Como el metro viaja en la mayor parte a través de los túneles se puede decir que la capacidad que se necesita es de 18 toneladas de refrigeración por cada vagón, es decir que por cada tren se necesitan 162 toneladas de refrigeración para poder satisfacer las condiciones de confort al interior del vagón en las condiciones de máxima afluencia.

# 7. VENTILACIÓN

El objetivo de la ventilación en el metro, es remover la gran cantidad de calor generado dentro y fuera de los vagones, suprimir malos olores y renovar el aire sucio. El movimiento del aire producido por el movimiento de los vagones hace que el ambiente se sienta más frío. Un leve movimiento del aire es deseable puesto que elimina las capas de aire caliente y húmedo.

Es necesario fuera y dentro de los vagones prever un cierto caudal de aire exterior que permita la supresión de olores y concentraciones de dióxido de carbono emitido por las personas.

La tasa de renovación necesaria varía dependiendo de la cantidad de ocupantes y utilización del lugar, por lo que generalmente se recomienda un caudal de  $13 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$  para techos de 2.4 [m] de altura.

En los vagones de la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo la renovación del aire se hace mediante un sistema de ventilación, el cual consta de rejillas, ventiladores, puertas y ventanas.

El aire limpio entra por las rejillas superiores del vagón, se distribuye a través del largo del techo por el conducto de la ventilación situado en el entretecho, se filtra y desciende por los ventiladores hacia el interior del vagón donde remueve el calor, los malos olores y el aire sucio para finalmente salir a través de las ventanas, puertas y las rejillas interiores.

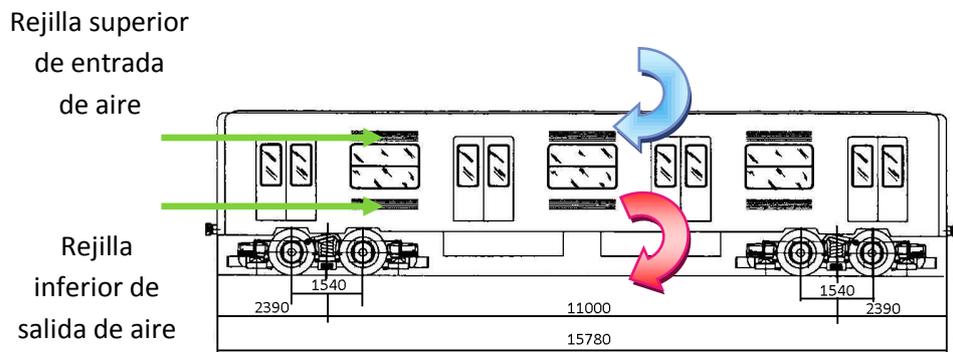


Figura 29. Rejillas del vagón.

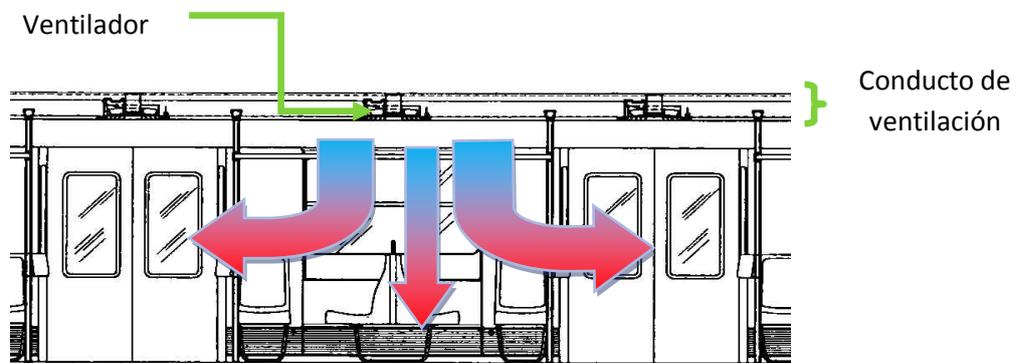


Figura 30. Flujo de aire al interior del vagón.

En estudios realizados por el Sistema de Transporte Colectivo para la línea 3, se conoce que el caudal de aire promedio en el tren a través de las rejillas, ventiladores, puertas y ventanas es de  $12,800 \left[ \frac{\text{tren}}{h} \right]$  y si queremos satisfacer las condiciones de recomendación se debe de cumplir que el caudal sea de  $13 \left[ \frac{m^3}{h} \right]$ .

Tabla 72. Potencia calorífica que afecta al interior del vagón en las estaciones subterráneas.

Vagones	Caudal		Condiciones recomendadas		
9	12800	$\left[ \frac{m^3}{h} \right]$	Caudal	13	$\left[ \frac{m^3}{h} \right]$
1	1422	$\left[ \frac{m^3}{h} \right]$		1231	$\left[ \frac{m^3}{h} \right]$
Renovaciones		15	Cumplimiento	115.5	%
Volumen del vagón					
Largo	15.78	[m]			
Ancho	2.5	[m]			
Alto	2.4	[m]			
Volumen	94.68	$[m^3]$			

Como se puede observar el aire de renovación que entra a los vagones es el necesario y cumple con las condiciones recomendadas, sin embargo es importante señalar que mientras mayor cantidad haya de ocupantes es mayor la cantidad de calor a disipar, hay mayor obstrucción al flujo del aire y es necesario mayor caudal de aire, es por esto la sensación de sofoco cuando hay un sobrecupo en los vagones. A pesar de que se cumpla con el flujo apropiado de aire en los vagones del metro, muchos de los ventiladores axiales en todos los trenes necesitan mantenimiento debido a que sus filtros están sucios y tapan las salidas y además que no funcionan.

## 8. CONCLUSIONES

En los horarios de máxima afluencia en la línea 3 del Sistema de Transporte Colectivo Metro se han alcanzado temperaturas de hasta 36 [°C] y humedades relativas de 75 [%], aunados a estas condiciones el desplazamiento del aire al interior baja de  $3 \left[ \frac{m}{s} \right]$  a  $0.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , condiciones que no están dentro del rango del confort térmico, provocando sensaciones de incomodidad en el vagón al realizar un recorrido.

En los estudios realizados por trabajadores de la línea 3, el gasto de aire que entra a través de las rejillas hacia la ventilación y que trabajan al 100% es el suficiente, ya que cumple con las renovaciones de aire necesarias para las personas dentro del vagón, sin embargo la ventilación de los trenes no trabajan al 100%, ya que debido a fallas, falta de mantenimiento o no uso de los ventiladores, no se alcanzan los niveles de renovaciones de aire, provocando sensaciones de incomodidad en las personas al interior ya sea en horarios de máxima o mínima afluencia, por lo que podemos concluir que uno de los principales factores que deterioran el confort dentro de los vagones del metro es debida a la falta de aire limpio dentro del vagón, siendo este uno de los principales campos de oportunidad para mejorar el confort al interior del vagón, simplemente dando un mantenimiento constante a los filtros de los ventiladores o modificando la estructura del vagón con mayor cantidad de rejillas para aumentar el gasto de aire al interior del vagón y mejorar la sensación de comodidad.



Figura 31. Ventilador de la línea 3.

El problema de generación y acumulación de calor que afectan a los vagones del Sistema de Transporte Colectivo Metro son debidos a diferentes factores en el interior como en el exterior del vagón. Existen diferentes fuentes que emiten calor hacia los alrededores provocando la elevación de temperatura en el ambiente.

Podemos dividir estas fuentes como internas y externas. Las fuentes internas son aquellas que generan calor al interior del vagón, como las personas, la iluminación y diversos circuitos eléctricos para la apertura y cierre de las puertas, las conexiones, los controles, motor de los ventiladores, etc., estos últimos debido a que no se tienen referencias sobre el voltaje y la

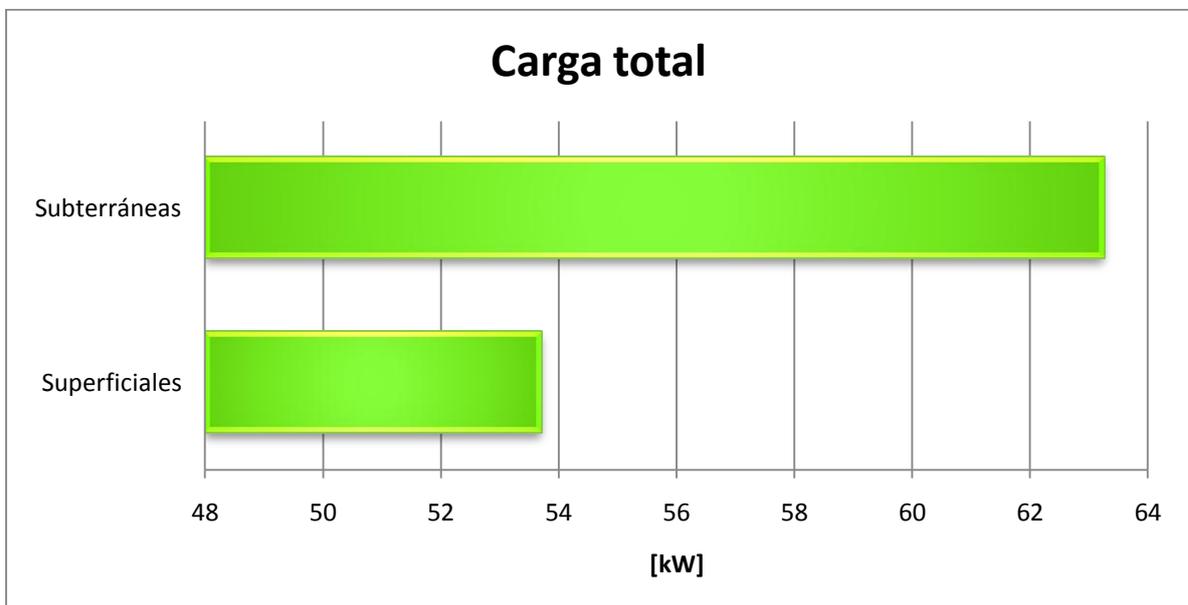
corriente que manejan no serán calculados, pero se deberá de tomar en cuenta al diseñar el sistema de confort térmico como un 5% más sobre la carga de calor a disipar.



Figura 32. Circuitos de la cabina de control y apertura y cierre de puertas.

Las cargas externas son aquellas que generan calor pero se encuentran al exterior del vagón, para el caso de estaciones subterráneas son las personas, la iluminación, los motores, circuitos eléctricos, etc., y para el caso de las estaciones superficiales es el efecto de la radiación solar sobre las paredes del vagón y los motores.

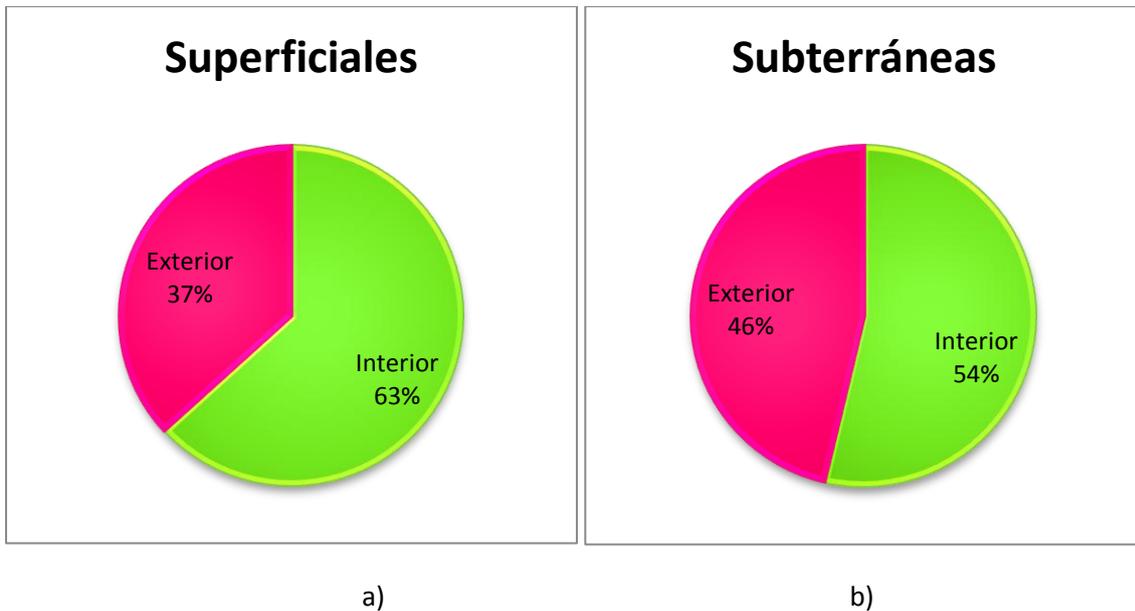
Al realizar la suma de cada una de las cargas de calor emitidas por las fuentes externas como internas se encontró la carga total para las estaciones subterráneas y las estaciones superficiales.



Gráfica 9. Carga total para estaciones subterráneas y superficiales.

Como se puede observar en la gráfica la carga de calor en las estaciones subterráneas es mayor a las estaciones superficiales, esto se debe a que en las estaciones subterráneas la generación y acumulación de calor debido a las diversas fuentes es mayor, esto produce una concentración del calor que se transmite al interior del vagón.

Si analizamos las cargas externas e internas para las estaciones subterráneas y las estaciones superficiales más detalladamente encontramos que:



Gráfica 10. Comparación de la carga exterior e interior para estaciones a) superficiales y b) subterráneas.

Se puede observar en las siguientes gráficas que en las estaciones subterráneas la carga de calor que proviene del exterior tiene mayor efecto sobre la carga total que en las estaciones superficiales, en las estaciones superficiales la carga de calor que proviene del exterior es casi la tercera parte de la carga de calor total que ingresa al vagón, esto quiere decir que la mayor cantidad de calor que afecta a las condiciones interiores del vagón proviene del interior, en cuanto en las estaciones subterráneas la carga exterior e interior tienden a ser iguales.

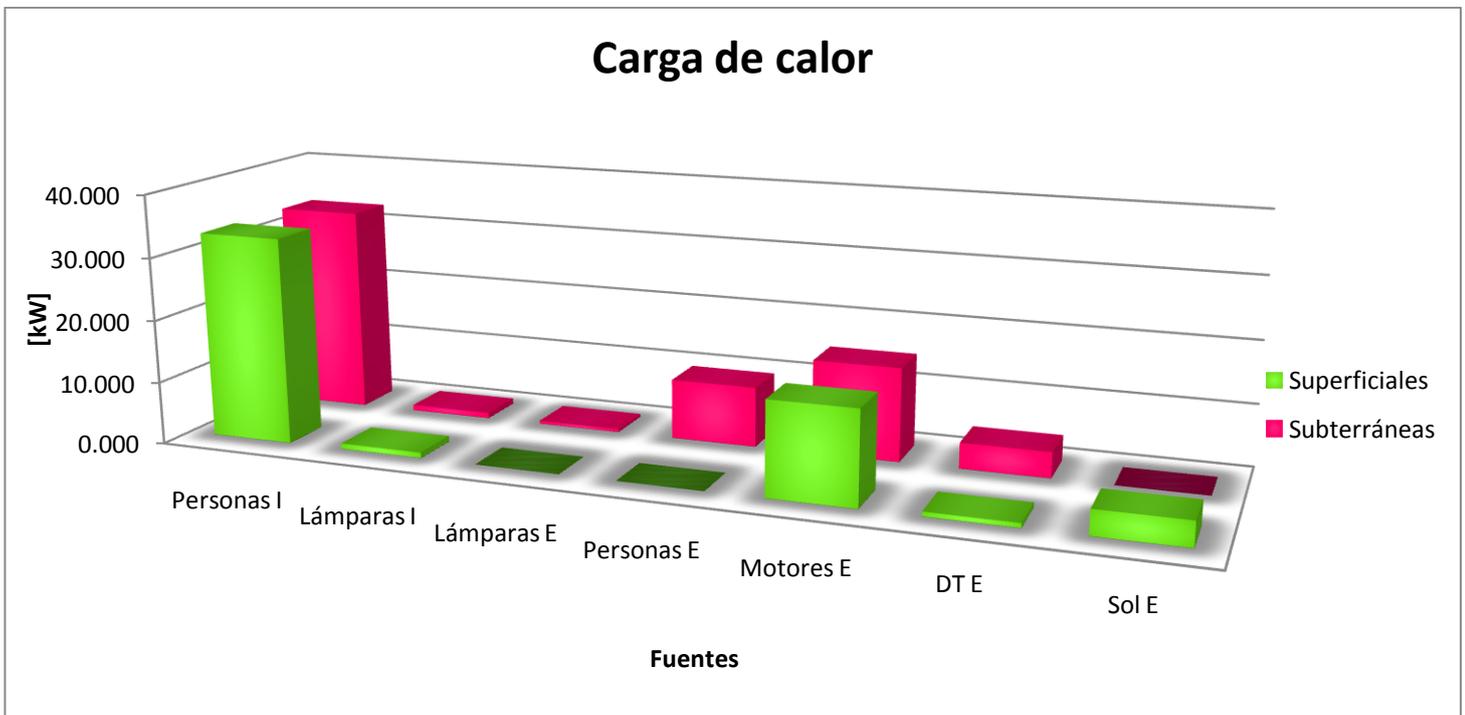
Para poder encontrar la fuente principal de calor que afecta las condiciones al interior del vagón se deberá de hacer una comparación entre cada una de las fuentes:

Tabla 73. Cargas para estaciones superficiales y subterráneas.

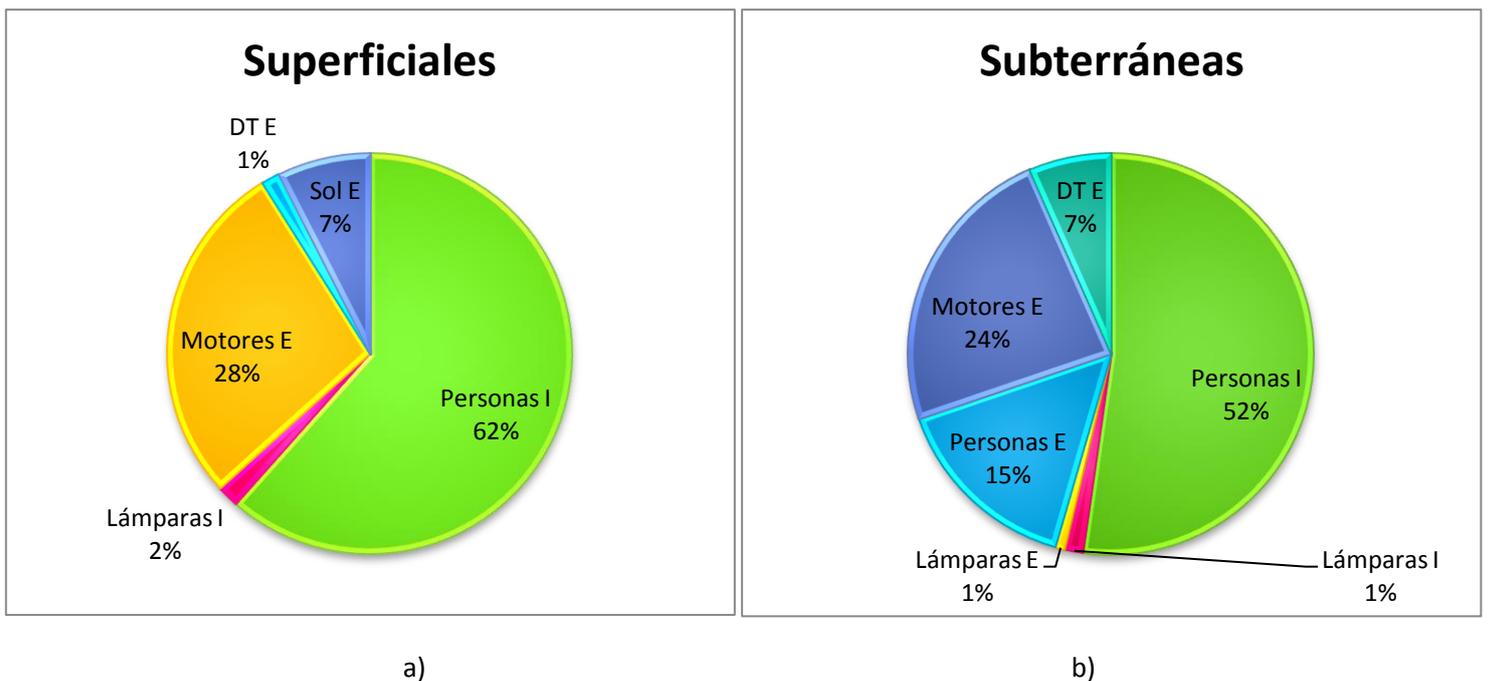
Superficiales [kW]		Subterráneas [kW]	
Personas I	33.030	Personas I	33.030
Lámparas I	0.912	Lámparas I	0.912
<b>Interior</b>	<b>33.942</b>	<b>Interior</b>	<b>33.942</b>
Motores E	15.000	Lámparas E	0.494
$\Delta T$ E	0.774	Personas E	9.670
Sol E	3.973	Motores E	15.000
<b>Exterior</b>	<b>19.747</b>	$\Delta T$ E	4.137
<b>Total</b>	<b>53.689</b>	<b>Exterior</b>	<b>29.301</b>
		<b>Total</b>	<b>63.243</b>

De la tabla es evidente que la carga al interior debido a las personas y lámparas es la misma para las estaciones superficiales y las estaciones subterráneas.

Sin embargo la carga exterior es diferente para los dos tipos de estaciones, por un lado el calor transmitido por los motores es el mismo, pero el calor debido al cambio de temperatura en el ambiente es mayor en las estaciones subterráneas debido a que la temperatura ambiente es mayor en este, y si comparamos en conjunto la carga por las lámparas y personas contra el calor por radiación del sol la diferencia es considerable, siendo mayor el calor emitido por las personas y lámparas que la influencia del sol sobre la estructura del vagón.



Gráfica 11. Carga de calor para estaciones superficiales y subterráneas.



Gráfica 12. Porcentaje de aportación de calor para estaciones a) superficiales y b) subterráneas.

Analizando los datos obtenidos y observando las gráficas se puede concluir que la principal fuente de calor que afecta el confort térmico de los vagones proviene de las personas que viajan al interior del vagón, seguida del calor emitido por la transformación de energía mecánica en térmica de los motores para los vagones motrices, en el caso de las estaciones subterráneas por las personas que esperan ascender el vagón y en las estaciones superficiales por la radiación del sol.

En el caso de los vagones remolque no existirá la influencia de calor debido a los motores reduciéndose la carga 15 [kW].

### **8.1 Recomendaciones.**

Para mantener una sensación de confort térmico en el interior de los vagones es recomendable que la temperatura de bulbo seco este entre 24 [°C] y 27 [°C] y que la humedad relativa varíe entre 50 [%] y 60 [%]. Esto quiere decir que se deberá reducir 9 [°C] de temperatura de bulbo seco y un 15 [%] de humedad relativa como mínimo. Actualmente la velocidad del aire a la salida de los ventiladores de los vagones de la línea 3 es de  $0.5 \left[ \frac{m}{s} \right]$  para ventiladores con filtros sin mantenimiento y  $3 \left[ \frac{m}{s} \right]$  en los ventiladores con filtros limpios, sin embargo en los vagones de la línea 2, Tasqueña - Cuatro Caminos la velocidad del aire a la salida de los ventiladores varía de  $3 \left[ \frac{m}{s} \right]$  a  $5 \left[ \frac{m}{s} \right]$ , provocando una mayor sensación de comodidad al entrar en contacto con el caudal de aire, por lo que sería recomendable aumentar la velocidad de los ventiladores de la línea 3.

En cuanto al aumento de gasto de aire al interior del vagón se recomienda hacer un cambio en la estructura del vagón, por ejemplo utilizar el efecto pistón sobre la parte frontal del vagón, esto es utilizar las ventanas de las puertas conectoras como louvers y extractores, alcanzando a ventilar las zonas menos alcanzadas del vagón. Realizar un mantenimiento constante de los filtros para la ventilación para que no se tapen debido al polvo, basura y metales que están en las vías.

Como la línea 3 es en su mayoría subterránea deben de existir áreas con respiraderos o inyectores de aire con el fin de proveer aire limpio que proviene del ambiente exterior, y de igual manera deben de existir extractores que saquen el aire sucio o utilizado, debido a que el aire debe de recorrer el subterráneo podría ser recomendable el uso de un sistema de impulsores de aire llamados TurboYet, estos impulsores toman el aire y aumentan su presión y velocidad para que puedan recorrer distancias de hasta 50 [m], son recomendables para túneles y no ocupan mucho espacio.

Sabiendo que la principal fuente de calor proviene de las personas, se recomienda tener un mayor control en las redes viales del metro, esto quiere decir aumentar la cantidad de trenes en las horas de máxima afluencia reduciendo la cantidad de personas que ingresen a los vagones y no vayan con sobrecupo, de tal manera se reduciría de un 8 [%] a un 15 [%] de la carga de calor total, o sea un 20 [%] de la carga de calor emitida por las personas. De la misma manera al tener un mayor control sobre el ascenso y descenso de pasajeros se reducirán los tiempos de traslados, tratando de evitar la acumulación de personas dentro y fuera del vagón,

además de tratar de ingresar la mayor cantidad de personas en los vagones remolque, ya que por no tener motores que los impulsen tienen un 30 [%] menos de calor transmitido al interior.

En el caso de que se quieran alcanzar las condiciones óptimas de confort térmico se recomienda la instalación de un sistema de aire acondicionado, de la capacidad calculada, el cual es aplicable para cualquier clima, tiene un sistema de control de temperatura, pero necesita un mantenimiento constante, un lugar con salida al exterior para tomar aire limpio, y un espacio disponible, pero debido a que consume gran cantidad de energía es el sistema de confort térmico más costoso, lo que repercutiría en el aumento del precio del boleto del metro.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

En libros:

1. Bagaría Blanxart J., "Prontuario de Calefacción, ventilación y aire acondicionado", Marcombo Boixareu Editores, Barcelona México, 6ta edición.
2. Tricomi E., "ABC del aire acondicionado", Alfaomega, Marcombo, 1992.
3. McQuiston Faye C., "Calefacción, ventilación y aire acondicionado: análisis y diseño", Limusa Wiley, 2008.
4. Carrier Air Conditioning, "Manual de aire acondicionado", Editorial Marcombo, cuarta edición.
5. Borja Navarrete, Á., "Treinta años de hacer el metro de la Ciudad de México", Editorial Espejo de Obsidiana, México 1997.
6. Incropera Frank P., "Fundamentos de transferencia de calor", Cuarta edición, Editorial Pearson.
7. Pinazo Ojer J., "Manual de Climatización Tomo II: Cargas térmicas", Universidad Politécnica de Valencia, Editorial Servicio de Publicaciones.

En Internet:

8. <http://www.metro.df.gob.mx/>  
Sistema de Transporte Colectivo Metro Online. Ciudad de México, Distrito Federal, México, Portal Metro de la Ciudad de México, 2010-2011.