

## Modelo hidráulico para estimación tiempo evacuación

El método se encuentra descrito por (Gwynne y Rosenbaum, 2016), se presenta un resumen del mismo.

### Ancho efectivo

Es el ancho utilizable del elemento de evacuación (por ejemplo puerta, escalera, etc.), las personas que se mueven por las rutas de salida de un edificio mantienen una distancia entre ellas y los objetos que encuentran, de las paredes y otros obstáculos. Este espacio libre, denominado “*Capa límite*” resulta necesario para acomodar el balanceo lateral y asegurar el equilibrio del cuerpo.

$$W_{\text{eff}} = W_{\text{real}} - \text{Espesores de capa límite} \quad [\text{m}]$$

Para los Espesores de capa límite consultar la Tabla 1 y las Figuras

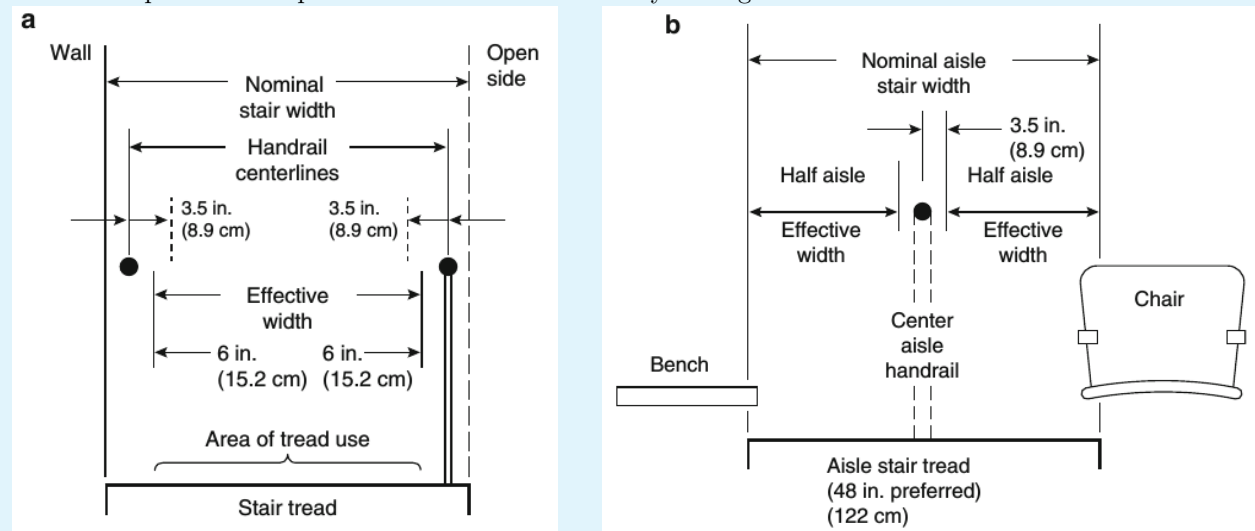


Figura 1: Espesores de capa límite (Gwynne y Rosenbaum, 2016)

Cuadro 1: Espesores de capa límite (Gwynne y Rosenbaum, 2016)

| Elemento en la ruta de evacuación   | Espesor capa límite<br>[cm] |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| Escaleras, pared                    | 15                          |
| Barandas, pasamanos                 | 9                           |
| Sillas de teatro, bancos en estadio | 0                           |
| Pasillo, paredes de rampa           | 20                          |
| Obstáculos                          | 10                          |
| Vestíbulos amplios, pasajes         | < 46                        |
| Puertas, arcos                      | 15                          |

### Densidad de personas

Se considera como el grado de acumulación de personas en una ruta de evacuación, se supone que el tamaño de las personas es uniforme y promediado para toda la población.

$$\rho_p = \frac{\text{Personas}}{\text{Superficie}} \quad \left[ \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right]$$

El valor máximo sugerido es  $\rho_p = 3,76 \text{ personas/m}^2$  puesto que este valor considera que el movimiento de las personas está restringido.

### Velocidad de evacuación

- Si la densidad de personas es mayor a  $0,54 \text{ personas/m}^2$  se emplea la siguiente expresión:

$$V = k (1 - a\rho_p) \quad [\text{m/seg}]$$

$k$  Constante según Tabla 2 [m/seg]

$a$  Constante,  $0,266 \text{ m}^2/\text{personas}$

$\rho_p$  Densidad de personas [personas/m<sup>2</sup>]

- Si la densidad de personas es menor a  $0,54 \text{ personas/m}^2$  se emplea la siguiente expresión:

$$V = 0,85 k \quad [\text{m/seg}]$$

Donde  $k$  se obtiene de la Tabla 2

Cuadro 2: Constantes para velocidad de evacuación (Gwynne y Rosenbaum, 2016)

| Elemento en la ruta de evacuación |             | k    |
|-----------------------------------|-------------|------|
| Pasillo, pasillo, rampa, puerta   |             | 1,40 |
| <b>Escaleras</b>                  |             |      |
| Alzada [mm]                       | Pedada [mm] |      |
| 190                               | 254         | 1,00 |
| 178                               | 279         | 1,08 |
| 165                               | 305         | 1,16 |
| 165                               | 330         | 1,23 |

### Flujo específico

Es el flujo de personas evacuando en un punto de la ruta de salida por unidad de tiempo y de ancho efectivo del camino de evacuación.

$$F_s = V \rho_p = k \rho_p (1 - a\rho_p) \quad \left[ \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}} \right]$$

El flujo específico máximo para cada condición se obtiene para una densidad de personas de 1,9 personas/m<sup>2</sup> en el camino de evacuación. En la Tabla 3 se indican los valores del mismo para cada condición.

Cuadro 3: Flujo específico máximo (Gwynne y Rosenbaum, 2016)

| Elemento en la ruta de evacuación |             | [Personas/seg/m]<br>de ancho efectivo |
|-----------------------------------|-------------|---------------------------------------|
| Pasillo, aisle, rampa, puerta     |             | 1,30                                  |
| <b>Escaleras</b>                  |             |                                       |
| Alzada [mm]                       | Pedada [mm] |                                       |
| 190                               | 254         | 0,94                                  |
| 178                               | 279         | 1,01                                  |
| 165                               | 305         | 1,09                                  |
| 165                               | 330         | 1,16                                  |

### Flujo calculado

Es la cantidad de personas que pasan un punto de la ruta de evacuación por unidad de tiempo:

$$F_c = F_s W_{\text{eff}} = k \rho_p (1 - a\rho_p) W_{\text{eff}} \quad \left[ \frac{\text{personas}}{\text{seg}} \right]$$

### Flujo en puertas

Si una puerta de la ruta de evacuación no puede mantenerse abierta durante la misma, ya sea mediante un mecanismo de traba, y debe ser sostenida por las personas evacuando para poder pasar se considera un flujo máximo de 50 personas/minuto/hoja de puerta.

### Tiempo de paso

Es el tiempo que tarda un grupo de personas en pasar por un punto en una ruta de evacuación y se expresa como:

$$t_p = \frac{\text{Personas}}{\text{Fujo calculado}} = \frac{\text{Personas}}{k \rho_p (1 - a\rho_p) W_{\text{eff}}} \quad [\text{segundos}]$$

donde  $t_p$  es el tiempo de paso ( $t_p$  está en minutos donde  $F_c$  está en personas / min;  $t_p$  está en segundos donde  $F_c$  es personas / s).  $P$  es el tamaño de la población en personas.

## Transiciones

Son cualquier punto en el recorrido de evacuación donde se modifica el mismo. Como ejemplos se pueden citar:

- Ensanchamientos o estrechamientos.
- Modificaciones en la superficie del piso, al pasar de un piso plano a uno con pendiente como una escalera o una rampa.
- Un punto donde convergen dos o más flujos para un flujo de salida único.
- El caso inverso del anterior, donde un flujo de ingreso se ramifica en varios a la salida.
- Una mezcla de los dos anteriores, donde se tienen varios ingresos y varias salidas

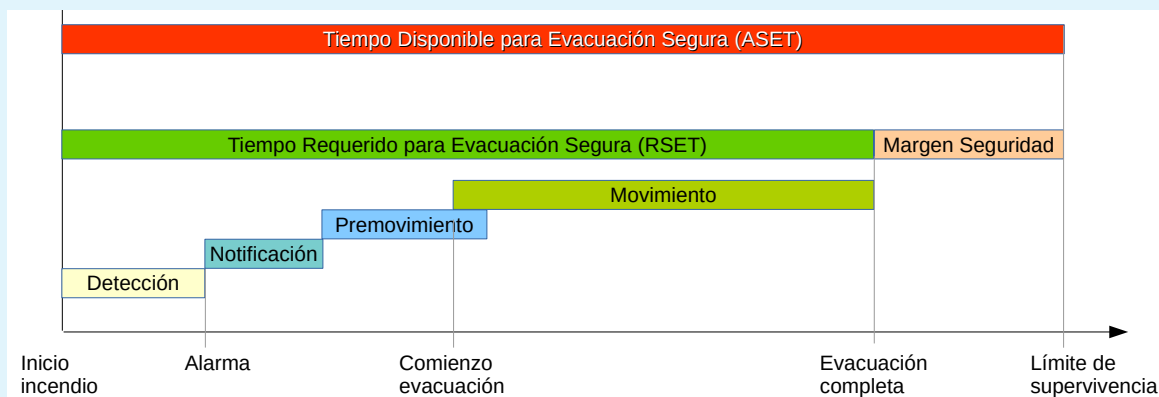
El criterio básico para tratar las transiciones es:

$$(F_c)_{\text{ingreso}} = (F_c)_{\text{salida}}$$

Esto es, el flujo calculado en el ingreso es igual al de la salida.

## Tiempo de pre-evacuación

Es el tiempo anterior al comienzo del movimiento de las personas, desde la toma de conocimiento de la notificación hasta que comienzan a moverse para la evacuación. Está influenciado por diversos factores: la ubicación espacial de las personas, el tipo de alarma (verbal, sirena, etc.), entrenamiento, etc. Usualmente se superpone parte del tiempo de pre-evacuación al de movimiento.



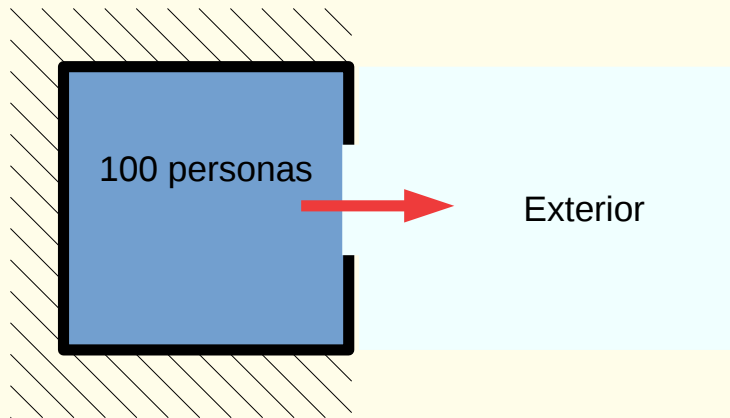
Tiempos de pre-evacuación adaptados de (CIBSE, 2010)

| Tipo edificio | Tipo ocupación                        | Tiempo pre-evacuación [min] |
|---------------|---------------------------------------|-----------------------------|
| Residencial   | Casas, Departamentos                  | 5                           |
| Salud         | Centros de atención, clínica, cirugía | 2                           |
| Educación     | Escuelas, Institutos, Universidades   | 1                           |
| Oficinas      | Oficinas                              | 1                           |
|               | Banco                                 | 1                           |
| Ventas        | Negocios                              | 3                           |
|               | Shoppings, Hipermercados              | 3                           |

Tiempos de pre-evacuación adaptados de (Forssberg, Kjellström, Frantzich, Mossberg, y Nilsson, 2019):

| Tipo de ocupación            | Valores medio (min-max) [seg] | Desviación estandar [seg] |
|------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| Oficina                      | 64,4 (12-201)                 | 45,6                      |
| Cine (alarma de voz)         | 44,0 (17-138)                 | 18,0                      |
| Cine (sirena alarma )        | 30,0 (14-179)                 | 28,1                      |
| Cine (campana alarma)        | 32,5 (11-224)                 | 17,2                      |
| Negocios                     | 35,9 (5-111)                  | 17,7                      |
| Restaurante/Café             | 52,5 (20-86)                  | 15,7                      |
| Colegio                      | 74,9 (13-170)                 | 42,3                      |
| Night club (personal activo) | 46,6 (11-87)                  | 18,7                      |
| Night club (personal pasivo) | 65,4 (5-417)                  | 64,0                      |

### Ejemplo 00: Evacuación de una sala



Se tiene la habitación 01 con 100 personas, densidad de personas de  $\rho_0 = 1,0$  personas/m<sup>2</sup>, un pasillo de salida al exterior de ancho 2,0 m.

¿Cuánto tiempo se requiere para evacuar a las personas?

#### Solución

Se efectúan los siguientes cálculos:

**Egreso al exterior** El ancho efectivo de egreso es:

$$W_{0\text{eff}} = W_0 - 2 \times 0,15 \text{ m} = 2,0 \text{ m} - 0,3 \text{ m} = 1,7 \text{ m}$$

La velocidad con que se egresa al exterior es, siendo  $k = 1,4$  m/seg, según la Tabla 2 para pasillo y puerta :

$$V_0 = k (1 - a \rho_0) = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right) = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

El flujo calculado de egreso al exterior:

$$F_{c_0} = V_0 \times \rho_0 \times W_{0\text{eff}} = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \times 1,7 \text{ m} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

El flujo específico de egreso al exterior:

$$F_{s_0} = V_0 \times \rho_0 = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 1,03 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

El flujo específico máximo para para puerta o pasillo, según la Tabla 3, es de 1,3 Personas/m/seg, el cual es mayor al flujo específico calculado por lo que no existirá congestión de personas en el egreso al exterior. El tiempo de pasaje de todas las personas al exterior es:

$$t_{p0} = \frac{\text{Cantidad de personas}}{(F_{c0})_{\text{pasillo}}} = \frac{100,0 \text{ personas}}{1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}} = 57,24 \text{ seg}$$

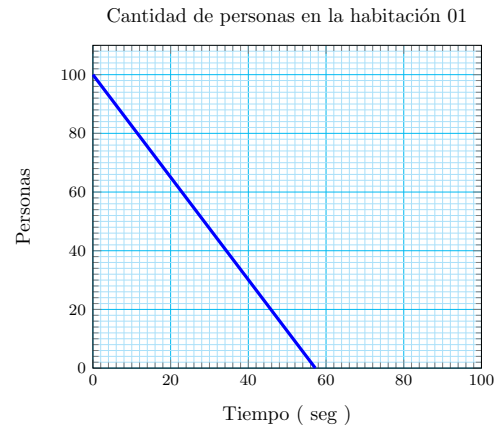
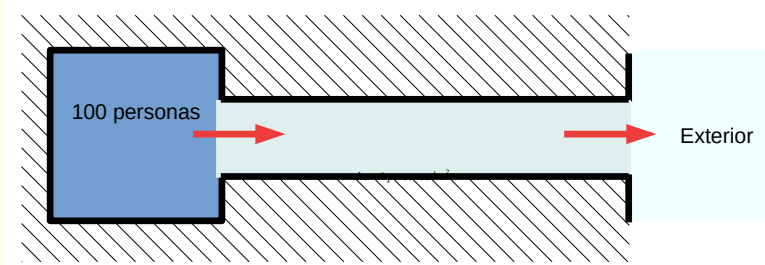


Figura 1: Variación de la cantidad de personas dentro de la habitación 01 según el tiempo.

### Ejemplo 01: Evacuación con ancho uniforme



Se tiene la habitación 01 con 100 personas, densidad de personas de  $\rho_0 = 1,0 \text{ personas/m}^2$ , un pasillo de salida al exterior de ancho 2,0 m y longitud 40,0 m.

¿Cuánto tiempo se requiere para evacuar a las personas?

#### Solución

Se efectúan los siguientes cálculos:

**Ingreso al pasillo** se puede considerar como una puerta puesto que se pasa desde una habitación con un ancho mucho mayor. El ancho efectivo del ingreso es:

$$W_{0\text{eff}} = W_0 - 2 \times 0,15 \text{ m} = 2,0 \text{ m} - 0,3 \text{ m} = 1,7 \text{ m}$$

La velocidad con que se ingresa al pasillo es, siendo  $k = 1,4 \text{ m/seg}$ , según la Tabla 2 para pasillo y puerta :

$$V_0 = k (1 - a \rho_0) = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right) = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

El flujo calculado de ingreso al pasillo:

$$F_{c_0} = V_0 \times \rho_0 \times W_{0\text{eff}} = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \times 1,7 \text{ m} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

El flujo específico de ingreso al pasillo:

$$F_{s_0} = V_0 \times \rho_0 = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 1,03 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

El flujo específico máximo para para puerta o pasillo, según la Tabla 3, es de 1,3 Personas/m/seg, el cual es mayor al flujo específico calculado por lo que no existirá congestión de personas en el ingreso al pasillo.

El tiempo de pasaje de todas las personas por el ingreso al pasillo es:

$$t_{p_0} = \frac{\text{Cantidad de personas}}{(F_{c_0})_{\text{pasillo}}} = \frac{100,0 \text{ personas}}{1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}} = 57,24 \text{ seg}$$

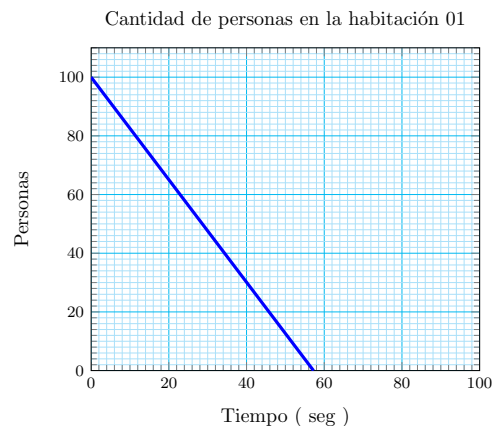


Figura 1: Variación de la cantidad de personas dentro de la habitación 01 según el tiempo.



**Pasillo** el flujo calculado en el pasillo es igual al de ingreso al mismo,  $F_{c_1} = F_{c_0} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$ , el ancho efectivo del pasillo es:

$$W_{1\text{eff}} = W_1 - 2 \times 0,2 \text{ m} = 2,0 \text{ m} - 0,4 \text{ m} = 1,6 \text{ m}$$

y se debe estimar la densidad de personas en el mismo, para ésto se escribe la expresión del flujo calculado:

$$F_{c_1} = k \times W_{1\text{eff}} \times \rho_1 (1 - a \rho_1)$$

Reemplazando los valores conocidos en la misma:

$$1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,6 \text{ m} \times \rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

$$2,24 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}} \times \rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

$$\rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = \frac{1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}}{2,24 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}}}$$

$$\rho_1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1^2 = 0,78 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2}$$

$$-0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1^2 + \rho_1 - 0,78 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 0$$

Resolviendo esta ecuación cuadrática :

$$\rho_1 = \frac{-1 \pm \sqrt{1^2 - 4 \times (-0,266) \times (-0,78)}}{2 \times (-0,266)} = \begin{cases} 1,1 & \Leftarrow \text{Se toma este valor para la densidad por ser el menor} \\ 2,66 \end{cases}$$

Con el valor de la densidad se puede calcular la velocidad de evacuación en el pasillo:

$$V_1 = k (1 - a \rho_1) = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times 1,1 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right) = 0,99 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Y el flujo específico en el pasillo:

$$F_{s_1} = V_1 \times \rho_1 = 0,99 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,1 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 1,09 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

El flujo específico máximo para para puerta o pasillo, según la Tabla 3, es de 1,3 Personas/m/seg, el cual es mayor al flujo específico calculado por lo que no existirá congestión de personas en el pasillo.

El tiempo para recorrer el pasillo hasta la salida al exterior es:

$$t_1 = \frac{\text{Longitud del pasillo hasta el exterior}}{\text{Velocidad de evacuación en el pasillo}} = \frac{40,0 \text{ m}}{0,99 \text{ m/seg}} = 40,45 \text{ seg}$$

El tiempo necesario para evacuar las personas al exterior resulta de la siguiente suma:

$$t_{\text{evacuación}} = t_{p_0} + t_1 = 57,24 \text{ seg} + 40,45 \text{ seg} = 97,7 \text{ seg}$$

En la Figura 2 puede verse como varía la cantidad de personas dentro del edificio según el tiempo. Se comienza con la cantidad de personas que se encuentran en la habitación 01 (100,0 personas) y luego del tiempo que le toma a la primer persona en salir del edificio (40,45 seg), posteriormente la cantidad de personas en el edificio disminuye según la tasa con que salen de la habitación 01, recorren el pasillo y llegan al exterior.

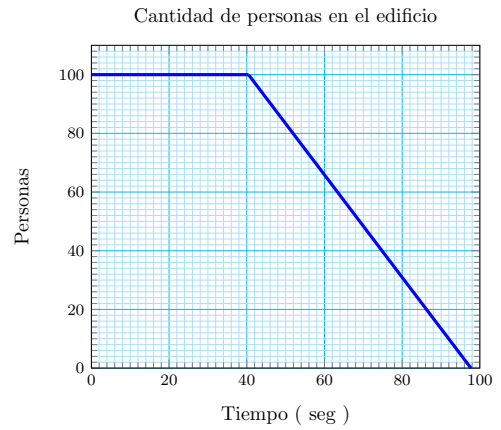
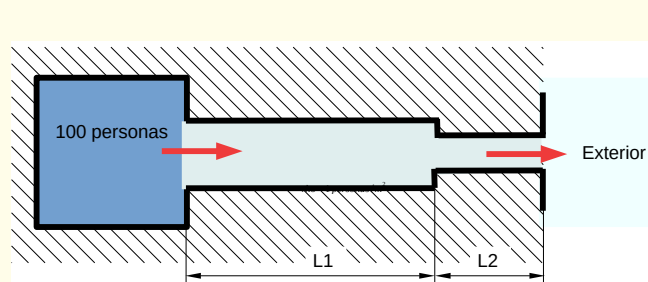


Figura 2: Variación de las personas dentro del edificio según el tiempo

### Ejemplo 02: Estrechamiento del pasillo de evacuación

Se tiene un pasillo de evacuación con las siguientes condiciones:



Donde:

Cantidad de personas = 100,0

Ancho primer pasillo

$$W_1 = 2,0 \text{ m}$$

$$L_1 = 30,0 \text{ m}$$

$$\rho_0 = 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2}$$

Ancho segundo pasillo

$$W_2 = 1,5 \text{ m}$$

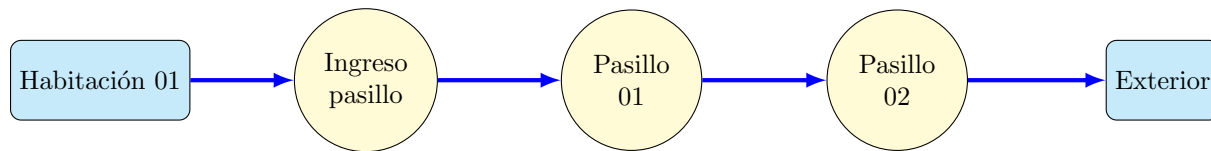
$$L_2 = 10,0 \text{ m}$$

¿Cuánto tiempo se requiere para evacuar a las personas?

Realizado con la colaboración del Ing. Ángel Galeasso.

#### Solución

Para visualizar la trayectoria de evacuación se realiza un diagrama de flujo donde se indican los lugares donde se producen cambios.



**Ingreso pasillo:** se puede considerar como una puerta puesto que se pasa desde la habitación 01 con un ancho mucho mayor. El ancho efectivo del ingreso es:

$$W_{0\text{eff}} = W_0 - 2 \times 0,15 \text{ m} = 2,0 \text{ m} - 0,3 \text{ m} = 1,7 \text{ m}$$

La velocidad con que se ingresa al pasillo es, siendo  $k = 1,4 \text{ m/seg}$ , según la Tabla 2 para pasillo y puerta :

$$V_0 = k (1 - a \rho_0) = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right) = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

El flujo calculado de ingreso al pasillo:

$$F_{c_0} = V_0 \times \rho_0 \times W_{0\text{eff}} = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \times 1,7 \text{ m} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

El flujo específico de ingreso al pasillo:

$$F_{s_0} = V_0 \times \rho_0 = 1,03 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,0 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 1,03 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

El flujo específico máximo para para puerta o pasillo, según la Tabla 3, es de 1,3 Personas/m/seg, el cual es mayor al flujo específico calculado por lo que no existirá congestión de personas en el ingreso al pasillo. El tiempo de pasaje de todas las personas por el ingreso al pasillo es:

$$t_{p0} = \frac{\text{Cantidad de personas}}{F_{c0}} = \frac{100,0 \text{ personas}}{1,75 \text{ personas/seg}} = 57,24 \text{ seg}$$

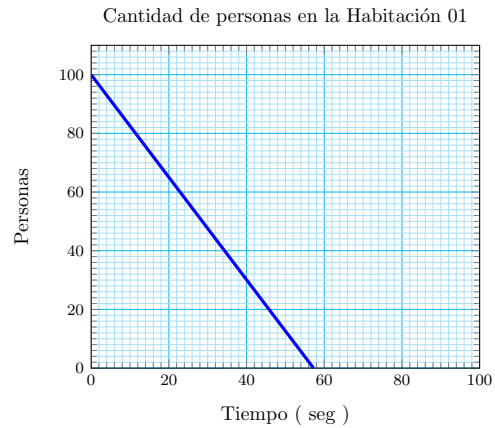
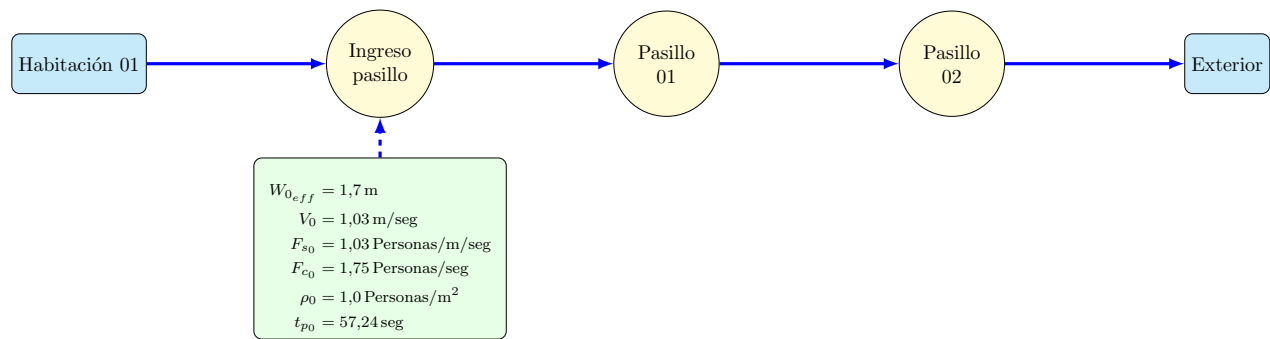


Figura 3: Variación de la cantidad de personas dentro de la Habitación 01 según el tiempo.

Los resultados obtenidos se pueden indicar el diagrama de flujo de la evacuación:



**Pasillo 01:** el flujo calculado en el pasillo es igual al de ingreso al mismo,  $F_{c1} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$ , el ancho efectivo del pasillo es:

$$W_{1eff} = W_1 - 2 \times 0,2 \text{ m} = 2,0 \text{ m} - 0,4 \text{ m} = 1,6 \text{ m}$$

y se debe estimar la densidad de personas en el mismo, para ésto se escribe la expresión del flujo calculado:

$$F_{c1} = k \times W_{1\_eff} \times \rho_1 (1 - a \rho_1)$$

Reemplazando los valores conocidos en la misma:

$$1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,6 \text{ m} \times \rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

$$2,24 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}} \times \rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

$$\rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = \frac{1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}}{2,24 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}}}$$

$$\rho_1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1^2 = 0,78 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2}$$

$$-0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1^2 + \rho_1 - 0,78 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 0$$

Resolviendo esta ecuación cuadrática:

$$\rho_1 = \frac{-1 \pm \sqrt{1^2 - 4 \times (-0,266) \times (-0,78)}}{2 \times (-0,266)} = \begin{cases} 1,1 & \Leftarrow \text{Se toma este valor para la densidad por ser el menor} \\ 2,66 \end{cases}$$

Con el valor de la densidad se puede calcular la velocidad de evacuación en el pasillo:

$$V_1 = k (1 - a \rho_1) = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times 1,1 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right) = 0,99 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

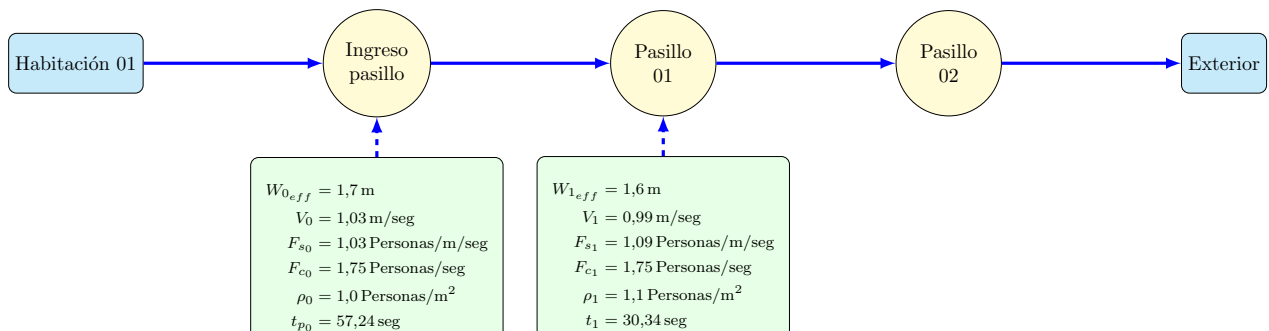
Y el flujo específico en el pasillo:

$$F_{s1} = V_1 \times \rho_1 = 0,99 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,1 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 1,09 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

El flujo específico máximo para para puerta o pasillo, según la Tabla 3, es de 1,3 Personas/m/seg, el cual es mayor al flujo específico calculado por lo que no existirá congestión de personas en el pasillo.

El tiempo para recorrer el pasillo hasta el estrechamiento en el mismo es:

$$t_1 = \frac{\text{Longitud del pasillo hasta estrechamiento}}{\text{Velocidad de evacuación en el pasillo}} = \frac{30,0 \text{ m}}{0,99 \frac{\text{m}}{\text{seg}}} = 30,34 \text{ seg}$$



**Pasillo 02:** el ancho del pasillo se reduce a 1,5 m y al ser un pasillo el ancho efectivo del mismo queda en:

$$W_{2\text{eff}} = W_2 - 2 \times 0,2 \text{ m} = 1,5 \text{ m} - 0,4 \text{ m} = 1,1 \text{ m}$$

El flujo calculado de ingreso al estrechamiento es igual al del Pasillo 01:

$$F_{c_2} = F_{c_1} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

Y su flujo específico es:

$$F_{s_2} = \frac{F_{c_1}}{W_{2\text{eff}}} = \frac{1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}}{1,1 \text{ m}} = 1,59 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

Como:

$$F_{s_2} = 1,59 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}} > 1,3 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

se tiene que existe acumulación de personas al ingreso del estrechamiento del pasillo. Por esto como flujo específico en el mismo se toma su valor máximo:

$$F_{s_2} = 1,3 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}}$$

Con este valor se puede estimar el nuevo flujo calculado:

$$F_{c_2} = F_{s_2} W_{2\text{eff}} = 1,3 \frac{\text{personas}}{\text{m} \times \text{seg}} \times 1,1 \text{ m} = 1,43 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

La tasa de acumulación de personas en el estrechamiento es la diferencia entre los flujos calculados:

$$\text{Tasa de acumulación} = F_{c_1} - F_{c_2} = 1,75 \frac{\text{personas}}{\text{seg}} - 1,43 \frac{\text{personas}}{\text{seg}} = 0,32 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

y se debe estimar la densidad de personas en el Pasillo 02, para ésto se escribe la expresión del flujo calculado:

$$F_{c_2} = k \times W_{2\text{eff}} \times \rho_2 (1 - a \rho_2)$$

Reemplazando los valores conocidos en la misma:

$$1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \times 1,1 \text{ m} \times \rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_2 \right) = 1,43 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

$$1,54 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}} \times \rho_1 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_1 \right) = 1,43 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}$$

$$\rho_2 \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_2 \right) = \frac{1,43 \frac{\text{personas}}{\text{seg}}}{1,54 \frac{\text{m}^2}{\text{seg}}}$$

$$\rho_2 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_2^2 = 0,93 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2}$$

$$-0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times \rho_2^2 + \rho_2 - 0,93 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} = 0$$

Resolviendo esta ecuación cuadrática:

$$\rho_2 = \frac{-1 \pm \sqrt{1^2 - 4 \times (-0,266) \times (-0,93)}}{2 \times (-0,266)} = \begin{cases} 1,67 \\ 2,09 \end{cases} \quad \Leftarrow \text{ Se toma este valor para la densidad por ser el menor}$$

Con el valor de la densidad se puede calcular la velocidad de evacuación en el pasillo:

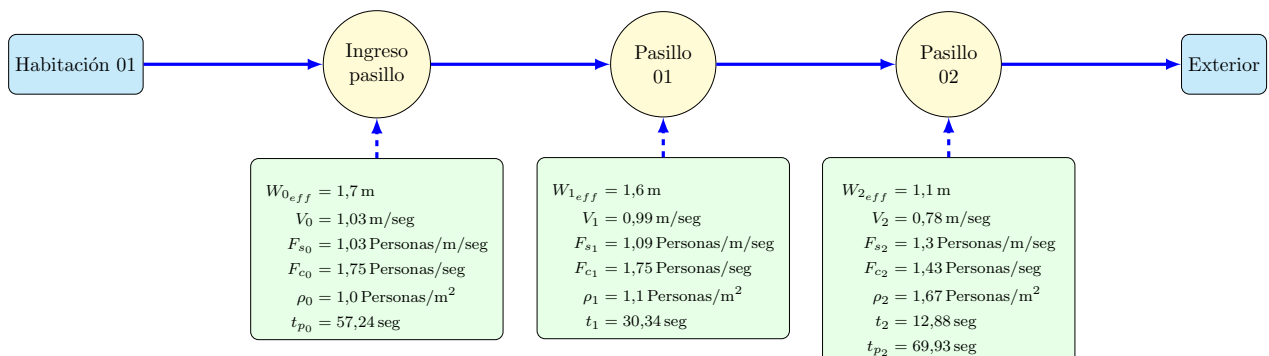
$$V_2 = k (1 - a \rho_2) = 1,4 \frac{\text{m}}{\text{seg}} \left( 1 - 0,266 \frac{\text{m}^2}{\text{personas}} \times 1,67 \frac{\text{personas}}{\text{m}^2} \right) = 0,78 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

El tiempo necesario para recorrer el Pasillo 02 hasta el exterior es:

$$t_2 = \frac{\text{Longitud del Pasillo 02}}{\text{Velocidad de evacuación en el pasillo}} = \frac{10,0 \text{ m}}{0,78 \text{ m/seg}} = 12,88 \text{ seg}$$

El tiempo de pasaje hacia el exterior de todas las personas es:

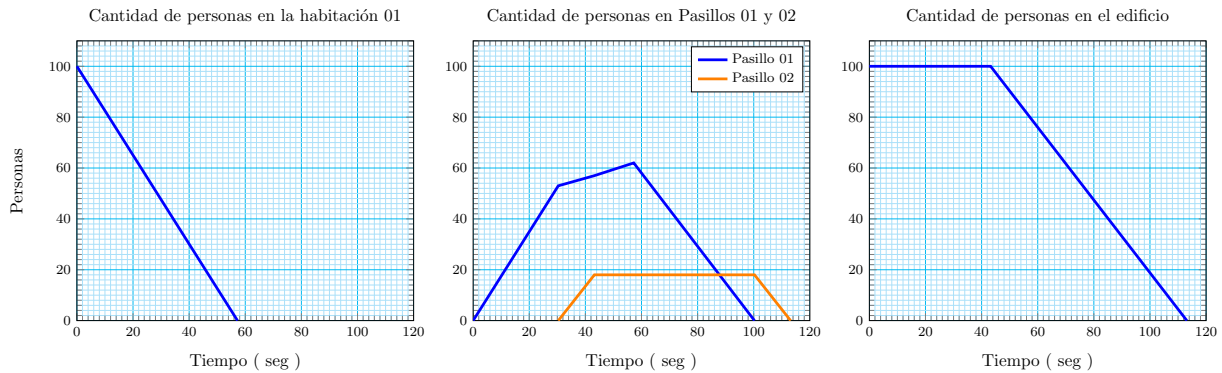
$$tp_2 = \frac{\text{Cantidad de personas}}{F_{c_2}} = \frac{100,0 \text{ personas}}{1,43 \text{ personas/seg}} = 69,93 \text{ seg}$$



**Acumulación de personas durante la evacuación:** en los cálculos anteriores se puso en evidencia que al pasar las personas desde el Pasillo 01 al Pasillo 02 se produce una acumulación con una tasa de 0,32 personas/seg. El efecto que esto produce en la evacuación se describe en la siguiente tabla:

| Tiempo [seg] | Habitación 01 [personas] | Pasillo 01 [personas] | Pasillo 02 [personas] | Exterior [personas] | Comentarios  |
|--------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--|
| 0,0          | 100                      | 0                     | 0                     | 0                   | Inicio evacuación                                    |
| 30,34        | 47                       | 53                    | 0                     | 0                   | Las primeras personas llegan al ingreso Pasillo 02   |
| 43,22        | 25                       | 57                    | 18                    | 0                   | Las primeras personas llegan a la salida al exterior |
| 57,24        | 0                        | 62                    | 18                    | 20                  | No hay personas en Habitación 01                     |
| 100,27       | 0                        | 0                     | 18                    | 82                  | No hay personas en Pasillo 01                        |
| 113,15       | 0                        | 0                     | 0                     | 100                 | No hay personas dentro del edificio                  |

Y en los siguientes gráficos:



**Exterior:** el tiempo para evacuar desde la Habitación 01 al exterior resulta de la suma de los tiempos anteriores:

$$t_{\text{evacuación}} = t_1 + t_2 + t_{p_2} = 30,34 \text{ seg} + 12,88 \text{ seg} + 69,93 \text{ seg} = 113,15 \text{ seg}$$

## Referencias

- CIBSE. (2010). *CIBSE Guide E. Fire Safety Engineering* (3rd Revised edition ed.). Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).
- Forsberg, M., Kjellström, J., Frantzich, H., Mossberg, A., y Nilsson, D. (2019, 01 de Nov). The variation of pre-movement time in building evacuation. *Fire Technology*, 55(6), 2491-2513. Descargado de <https://doi.org/10.1007/s10694-019-00881-1> doi: 10.1007/s10694-019-00881-1
- Gwynne, S. M., y Rosenbaum, E. R. (2016). SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. En Society of Fire Protection Engineers (Ed.), (cap. Employing the Hydraulic Model in Assessing Emergency Movement). Springer.