

Determinación del tiempo de deshumidificación en un almacén soterrado en las condiciones climáticas y geohidrológicas de Cuba.

Ma. D. Andrade Gregori, R. Hernández Rubio, M. Piedra Díaz.

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas. Av. Salvador Allende y Luaces.
Quinta de los Molinos. Municipio Plaza de la Revolución.
Apartado Postal: 6163. Ciudad de la Habana. Cuba.

(Recibido el 7 de Abril de 2006; aceptado el 12 de Junio de 2006)

Resumen

En el trabajo se presenta un método de cálculo para determinar con exactitud el tiempo que debe trabajar un deshumidificador para alcanzar la humedad mínima requerida y se compara con el método de cálculo analítico que aparece en la literatura tradicional. En el método de cálculo propuesto se utiliza como indicador económico la eficiencia del proceso de deshumidificación.

Palabras claves: humedad, tiempo, deshumidificación, eficiencia, costos.

1. Introducción.

Los sistemas de deshumidificación proporcionan grandes beneficios para conservar los medios que se almacenan prolongadamente en obras soterradas. Sin embargo, no existe beneficio sin inversión, de aquí la importancia del estudio encaminado a disminuir los costos de inversión de los sistemas de deshumidificación aumentando los beneficios.

Los beneficios económicos de los sistemas de deshumidificación para la conservación prolongada se dividen en dos categorías principales:

- Reducción de costos de inversión debida al reemplazo de equipos.
- Mejoras en la sensibilidad operacional.

La realización eficiente de un proyecto de deshumidificación en una obra soterrada está condicionada a la humedad mínima que tienen sus locales y los niveles de tolerancia establecidos para los medios u objetos que se pretende almacenar. El conocimiento detallado de ambas condicionantes evitaría trabajar inútilmente contra la elevada carga de humedad que puede aportar al entorno local, que para vencerla requeriría un tiempo de deshumidificación ilimitado lo cual sería inalcanzable desde el punto de vista técnico y económicamente incoachable.

En este trabajo, se emplea un método de cálculo numérico para darle solución a la ecuación que rige el comportamiento climático de un almacén soterrado. Este método permite determinar con exactitud el tiempo que debe trabajar un deshumidificador para alcanzar la humedad mínima requerida y se compara con el método de cálculo analítico que se emplea en la literatura tradicional [1, 2, 3].

Como indicador económico para evaluar el efecto económico del cálculo se utiliza la eficiencia del proceso de deshumidificación (η). Si η aumenta, se produce una disminución del consumo de energía eléctrica y una reducción de la cantidad de equipos ambientadores a utilizar dentro de una obra. Por lo que, una mayor exactitud en la determinación del tiempo de deshumidificación y del tiempo de retorno a las condiciones iniciales trae aparejado un efecto económico, derivado de un empleo más racional del equipamiento ambientador disponible.

2. Fundamentación teórica.

La eficiencia del proceso de climatización está dada por [4,5]:

$$\eta = \frac{t_R}{t_{dh}}$$

Donde:

t_R : Es el tiempo que se demora el sistema en restablecer las condiciones límites de máxima humedad a la temperatura del local.

t_{dh} : Es el tiempo que demora el sistema en alcanzar el mínimo de humedad bajo la acción del deshumidificador a la temperatura del local.

Un buen diseño de deshumidificación debe garantizar que el local alcance los niveles de humedad relativa y temperatura exigidos en el menor tiempo posible y que el tiempo de restablecimiento a las condiciones iniciales sea el mayor posible, entonces el deshumidificador funcionará el menor tiempo por lo que el consumo de energía disminuirá.

En sentido general, para disminuir el tiempo de deshumidificación es necesario disminuir al máximo las cargas de humedad dentro de los locales y escoger correctamente los límites de humedad. Una cota de humedad muy por debajo de la exigida implica que el deshumidificador funcione más tiempo que el necesario.

3. Cálculo tradicional del tiempo de deshumidificación. (Cálculo Simple).

El cálculo para la determinación del tiempo de deshumidificación de un local dado por los métodos tradicionales [1,2,3] se realiza según un modelo lineal ajustado a las condiciones de los almacenes soterrados.

$$t_{dh} = \frac{(\rho_{vp} - \rho_v)V}{-\Sigma I_i}$$

Donde:

t_{dh} : tiempo de deshumidificación del local, (horas).

V: volumen del local, (m^3)

ρ_{vp} y ρ_v : densidad del vapor asociada a la pared y al local respectivamente, (Kg/m^3)

ΣI_i : sumatoria de las cargas de humedad en el local soterrado incluyendo la carga de humedad extraída por el deshumidificador. Convencionalmente se asume negativa.

$$\Sigma I_i = \Sigma f_i - \Sigma g_j$$

Donde:

Σf_i : cargas de humedad que pueden encontrarse en los locales.

Σg_j : extracción de vapor de agua por el deshumidificador.

El tiempo que tardará el aire del local en alcanzar valores de Humedad Relativa (HR) por encima de lo permisible para los medios conservados (tiempo de restauración a las condiciones iniciales) dependerá fundamentalmente de la carga de humedad que aporta el entorno, los embalajes de madera u otros y la falta de hermeticidad de conductos y puerta del local.

En la figura No. 1 se muestran los tiempos de restauración a las condiciones iniciales para diferente acabado de las paredes en los almacenes.

4. Cálculo numérico del tiempo de deshumidificación. (Cálculo Complejo).

La ecuación que rige el cambio de densidad de vapor en un almacén soterrado con deshumidificación [4] correspondiendo con:

$$\frac{d\rho}{dt} = \Sigma f_i \rho_v - \Sigma g_j$$

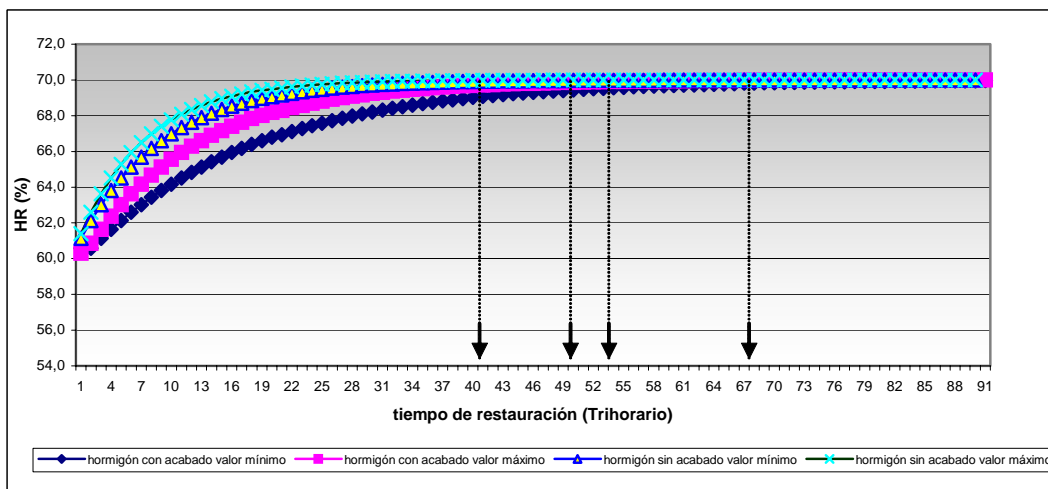


Figura 1. Tiempo de restauración a las condiciones de equilibrio iniciales de acuerdo al acabado de las paredes en los almacenes.

Si se considera que $g_j = f(\rho_v, t)$, es decir, que la cantidad de humedad que se extrae por el deshumidificador es variable en el tiempo y depende de las condiciones climáticas del local, la ecuación no tiene solución analítica y se debe utilizar un método numérico para su solución.

El estudio del proceso se realiza en tres momentos importantes, que se analizan a continuación:

(1) Condiciones iniciales, donde t_i es el tiempo de encendido del deshumidificador,

$$\rho_v(0) = \rho_{vo} \text{ y } \rho_v(t_i) = \rho_{v\min}$$

El tiempo en que el local alcanza el valor mínimo de densidad de vapor de agua requerido o llegue al equilibrio de humedad se determina mediante:

$$\rho_v(t+dt) = \rho_v(t) + \frac{1}{V} \left[\sum_{i=0}^{n-1} f_i(t, \rho_v(t)) + g_j(t, \rho_v(t)) \right] * dt$$

$$t_i = t_i + dt$$

Desde $t = 0$ hasta que

$$\rho_v(t+dt) \approx \rho_v(t) \text{ o } \rho_v(t+dt) \leq \rho_{v\min}$$

Siendo:

$\rho_{v\min}$ Mínima densidad de vapor requerida.

g_j Es la función que describe la masa de vapor de agua que extrae el deshumidificador j

V Es el volumen del local

n La cantidad de fuentes de humedad que hay en el local.

f_i Es la función que describe la masa de vapor que se incorpora al local por la presencia de una fuente de humedad i .

(2) Se apaga el deshumidificador cuando

$$\rho_v(0) = \rho_{v\min} \text{ y se obtiene } \rho_v(t_R) = \rho_{v\max}$$

El tiempo de restauración a las condiciones iniciales (t_R) que se demora el local en llegar al nivel máximo de humedad exigido ($\rho_{v\max}$) después de haber apagado el deshumidificador se calcula mediante:

$$\rho_v(t+dt) = \rho_v(t) + \frac{1}{V} \sum_{i=0}^{n-1} f_i(t, \rho_v(t)) * dt$$

$$\text{Para } \rho_v(0) = \rho_{v\min} \quad t_R = t_R + dt$$

(3) Calculando desde $t_R=0$ hasta que $\rho_v(t_R) = \rho_{v\max}$

Se enciende el deshumidificador cuando $\rho_v(0) = \rho_{v\max}$ y se obtiene $\rho_v(t_{dh}) = \rho_{v\min}$.

El tiempo (t_{dh}) que demora el local en volver a alcanzar la densidad de vapor mínima requerida luego de encender el deshumidificador se determina por:

$$\rho_v(t+dt) = \rho_v(t) + \frac{1}{V} \left[\sum_{i=0}^{n-1} f_i(t, \rho_v(t)) + g_j(t) \right] * dt$$

$$\text{Para } \rho_v(0) = \rho_{v\max} \quad t_{dh} = t_{dh} + dt$$

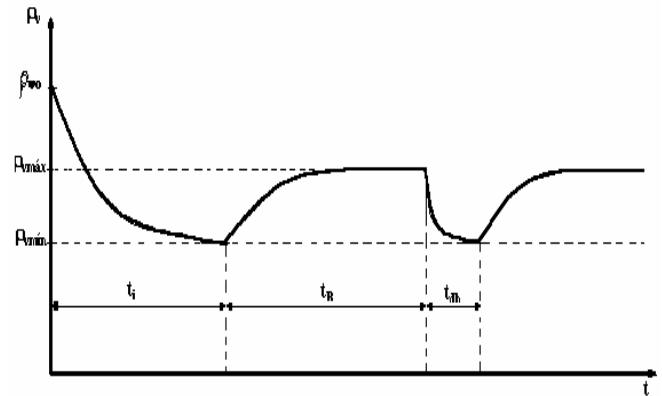


Figura 1. Variación de la densidad del vapor para diferentes momentos después de encendido el deshumidificador.

5. Cálculo de las cargas de humedad en los almacenes soterrados.

La masa de vapor de agua que suministra cada fuente de humedad al medio por unidad de tiempo esta dada por la función. f_i [4]:

$$\frac{1}{V} \sum_{i=0}^{n-1} f_i = c_1 S_p + c_2 S_a + c_3 S_{cajas} + c_4 S_h + c_5 S_i + c_6 S_{personas}$$

Donde:

S_p, S_a, \dots, S_n : son las superficies que ocupan las diferentes fuentes de humedad. (m^2)

c_1, c_2, \dots, c_i : son los coeficientes que caracterizan a cada fuente de humedad y se detallan en la siguiente tabla:

Tabla no. 1 Fuentes de humedad que pueden estar presente en los almacenes soterrados.

Fuentes de Humedad	Función (f_i)	Coefficiente (c_i)
Permeabilidad constructiva	$f_1 = c_1 S_p / V$	$c_1 = \alpha$
Superficies acuosas	$f_2 = c_2 S_a / V$	$c_2 = \frac{HR_v T}{H_1}$
Embalajes de madera y otros.	$f_3 = c_3 S_{cajas} / V$	$c_3 = a_p x_i R_v T / x_o$
Falta de hermeticidad	$f_4 = c_4 S_h / V$	$c_4 = 3600 V_a$
Aperturas de la puerta	$f_5 = c_5 S_i / V$	$c_5 = 3600 V_a t_A / 24 h$
Personal Laborando	$f_6 = c_6 S_{personas} / V$	$c_6 = F_i \times P_i$

Todos los coeficientes con excepción del coeficiente de permeabilidad constructiva se calculan según lo establecido en la literatura tradicional [1].

6. Comparación entre el cálculo simple y el cálculo complejo.

Las características climáticas, constructivas y geohidrológicas de los locales que se van a climatizar condicionan los valores de humedad mínima como se puede apreciar en la Figura 3. En este gráfico se muestra la diferencia que existe entre el tiempo de deshumidificación calculado por el método tradicional y por el método numérico. El tiempo de deshumidificación por el cálculo simple es de 144 horas y por el cálculo complejo es de 77 horas.

Los modelos lineales para el cálculo del tiempo de deshumidificación por el método tradicional no permiten simular los procesos de transporte de humedad que ocurren en los almacenes soterrados.

Al disminuir el tiempo de deshumidificación la eficiencia del proceso aumenta como se muestra en la Figura 4. Esto se cumple tanto para el cálculo simple como para el cálculo complejo, en este último la eficiencia tiene una tendencia a estabilizarse, es decir, que por mucha cantidad de vapor que se extraiga del local la eficiencia del proceso no aumenta pues está condicionada a la humedad mínima característica de cada almacén dada por sus condiciones climáticas, constructivas y geohidrológicas.

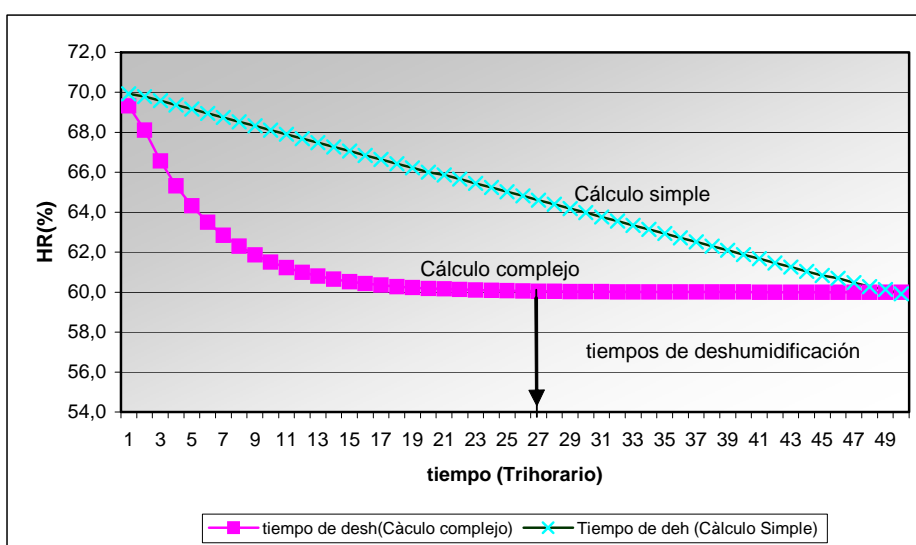


Figura 3. Tiempo de deshumidificación utilizando el cálculo simple y el cálculo complejo.

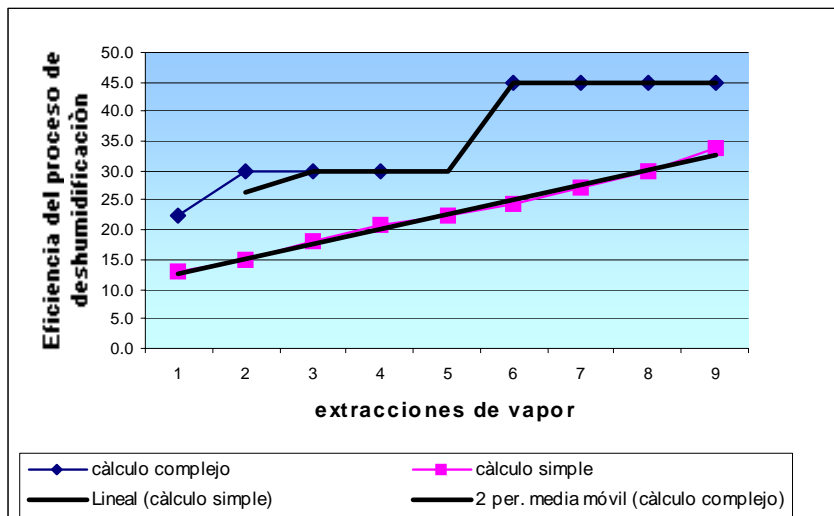


Figura 4. Incremento de la eficiencia del proceso de deshumidificación para el cálculo simple y complejo respectivamente.

7. Comparación entre el cálculo simple y el cálculo complejo en cuanto a disminución de costos de inversión y aumento de beneficios.

En la tabla 2 se hace un resumen comparativo entre el cálculo simple y el cálculo complejo a partir de un estudio realizado para disminuir los costos de inversión de los sistemas de deshumidificación aumentando los beneficios.

Para el cálculo se tuvo en cuenta una obra ingeniera que contiene 6 almacenes. Se considera que un ciclo de trabajo es la suma del tiempo de deshumidificación y el tiempo de restauración a las condiciones iniciales.

El costo de un deshumidificador con productividad promedio de 10 litros a 25 °C y humedad de 60%, es en 24 horas es de \$300.0 pesos.

Los costos anuales de consumo de energía eléctrica están calculados a partir del tiempo de deshumidificación de una obra al año.

En el caso del cálculo complejo, la eficiencia aumenta con mayor exactitud la determinación del tiempo de deshumidificación, lo que trae consigo una disminución del consumo de energía eléctrica y una reducción del equipamiento ambientador necesario a utilizar dentro de una obra.

Por ejemplo si el proyecto de deshumidificación se lleva a cabo en 10 obras del país se necesitarían 20 equipos deshumidificadores y no 30 equipos como lo exige el Cálculo simple por lo que los costos de inversión por compra de equipos se reducen, y por ende se reducen los costos por mantenimiento y por consumo de energía eléctrica. Este último se reduce sólo en un 5 % pero al tener en cuenta las dificultades que implica llevar energía en condiciones de soterramiento se hace significativo el valor.

La política de rotación de los equipos deshumidificadores en esta obra se muestra en la Figura 5:

Tabla no. 2. Comparación entre el Cálculo Simple y el Cálculo Complejo.

CALCULO	t_{dh} (h)	t_r (h)	η	Ciclos /año- local	No.de equipos /obra	Costo de inversión(\$)	Consumo energía /año (Kw.)	Costo anual (\$)
SIMPLE	144	267	1.8	21	3	900	26717	2404
COMPLEJO	77	267	3.4	25	2	600	25410	2287

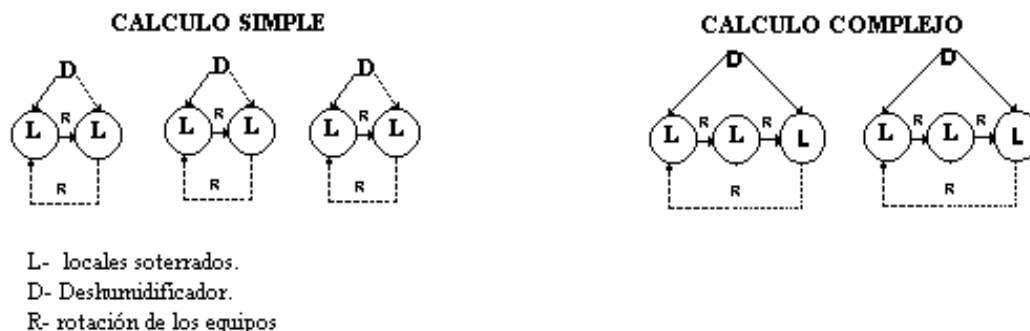


Figura 5. Política de rotación de los deshumidificadores en una obra soterrada con 6 almacenes.

8. Conclusiones.

Con el Método Numérico (cálculo complejo) se pudo determinar con exactitud el tiempo de deshumidificación necesario para alcanzar la humedad mínima requerida en los almacenes soterrados para el caso de estructuras con paredes revestidas de hormigón y se comparó con el Método Analítico (cálculo simple) utilizado en la literatura tradicional..

Se comparan ambos métodos de cálculo demostrándose la diferencia en el cálculo de los tiempos de deshumidificación, en la eficiencia del proceso de deshumidificación, en la disminución de la cantidad de equipos a utilizar en una obra ingeniera y en la reducción del costo de inversión del proyecto de deshumidificación, por lo que se corrobora que los modelos lineales para el cálculo del tiempo de deshumidificación por el método tradicional no permiten simular con exactitud los procesos de transporte de humedad que ocurren en los almacenes soterrados.

9. Bibliografía.

1. Harriman I.; Lewis G.; "The Dehumidification Handbook" Segunda edición. Editorial Mason - Grant Company. 2000.
2. ASHRAE Handbook on Fundamentals, Chapter 20, American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 1981
3. Carrier. "Handbook of air Conditioning System Design". 1998.
4. Andrade, M.D. "Diseño de climatización de locales soterrados". Tesis de Maestría ISPJAE. CETER. 1998.
5. Hernández R. "Consideraciones preliminares sobre la actividad climática en una obra soterrada". Presentado en XII Forum de Ciencia y Técnica. 1998. Habana. Cuba.

Determination of dehumidifier time in underground warehouse for cuban conditions.

Abstract.

In this paper a calculation method is presented to determine with accuracy the time that a dehumidifier should work to reach the required minimum humidity and it is compared with the calculation presented in the traditional literature. In the proposed method calculation, the efficiency is used as fundamental economic indicator of the dehumidification process.

Key words. humidity, time, dehumidifier, efficiency, costs.