
Aire acondicionado: ahorros por cambio de operación

Por Jorge Fiora, Mario Ogara y Ángel Bermejo
Una Nota Técnica del INTI- Energía
27 de octubre de 2006

1	Propósito, conclusiones principales y limitaciones.....	1
2	El modelo	2
3	Temperatura en Buenos Aires y potencia en el MEM	5
4	La marcha del cálculo per cápita	5
5	La marcha del cálculo global.....	7
6	Detalles sobre la condensación de humedad	9

1 Propósito, conclusiones principales y limitaciones

Se trata de estimar los posibles ahorros de energía eléctrica por el cambio de la consigna de temperatura en los equipos de refrigeradores para acondicionamiento de aire en las horas de consumo pico¹.

Según nuestro modelo un aumento de la temperatura del ambiente acondicionado de 18 a 24°C produce para una temperatura exterior de 30°C un ahorro de energía del 40% durante la noche. Es decir se gasta un 40 % menos en acondicionamiento de aire.

Esta cifra es compatible con unos 3 a 4,5 millones de equipos de aire acondicionado, entre 3 y 2 usuarios por equipo y los 300 MW/°C de aumento de potencia demandada informados por CAMMESA².

Es entonces razonable esperar una reducción en la demanda de potencia de unos 300 MW por cada grado que se aumente el promedio de

¹ Debería proponerse una temperatura de 24 o 25°C. En Cuba “Se dispuso que los locales climatizados limiten la temperatura (no inferior a 24 grados C.)”, ver <http://webcutc.org/documentos/notinoticias11.htm>

² Comunicación telefónica con el Ing Mastrangelo el 26/9/2006. Correlaciones nuestras entre la temperatura en Bs. As. con la demanda del MEM en febrero de 2006 arrojan una cifra promedio de 240 MW/C para una semana con extremos de 128 y 450 MW/C, aunque esto como se comprende tiene valor bastante relativo dado la extensión geográfica del MEM.

temperatura de los ambientes acondicionados. Sobre los 17 GW de potencia pico esto representa un 1,76% por cada grado.

La cifra relativa del 40% de ahorro se refiere a un modelo donde se asocia a cada persona un ambiente tipo y ciertas humedades relativas al exterior e interior. Es probablemente conservativa para días calurosos en horas pico.

En definitiva la potencia en aire acondicionado puede estimarse en las horas pico de días calurosos como se muestra en la Figura 1 donde además se muestran posibles ahorros en la hipótesis de un aumento de 2°C en la temperatura

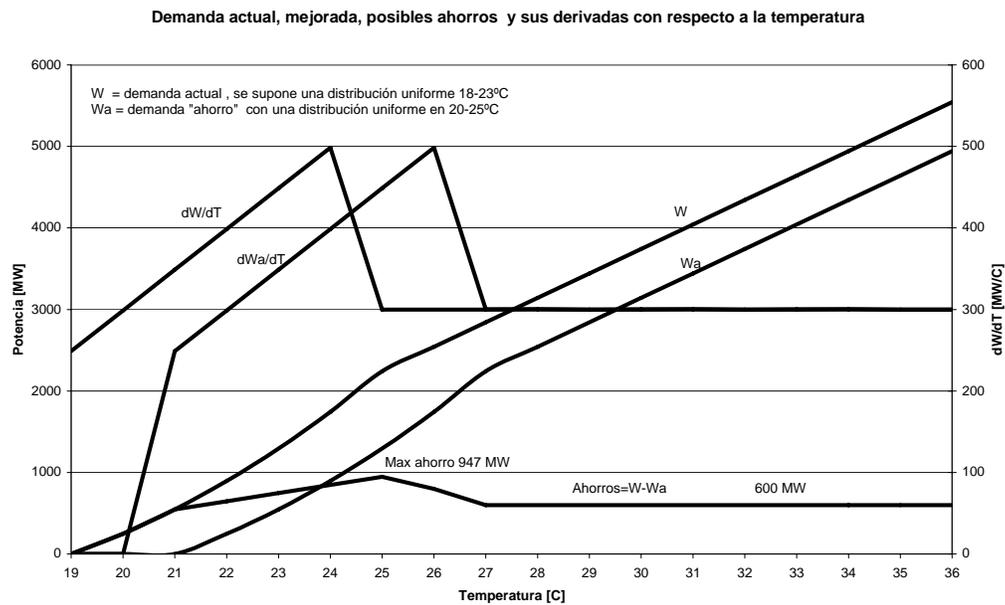


Figura 1: la demanda actual se calcula con una distribución uniforme de las consignas de temperatura entre 18 y 23 °C, los equipos se encienden cuando la temperatura es 2°C mayor que la consigna. La demanda "ahorro" se calcula análogamente pero con una distribución uniforme ente 20 y 25°C.

La cifra de ahorro absoluto está basada en la cifra de CAMMESA y la indicación general del modelo de que el aumento de la demanda es proporcional a la diferencia de temperatura. Como se ve el modelo es conceptualmente coherente pero en pocos datos de validez relativamente incierta.

2 El modelo

El modelo consiste en lo siguiente, a cada usuario se le asigna

1. Una superficie de pared³ 28m² de ladrillo cerámico de espesor x ($x=30$ cm para las conclusiones numéricas) y una superficie vidriada de 2m² y 3mm de espesor.
2. Cada usuario se encuentra en reposo y disipa una potencia de unas 106 kcal/h (123W)
3. Además hay en el ambiente, por cada usuario una potencia disipada por artefactos de 75 W.
4. La humedad relativa exterior es del 80% y la del interior del 50%.
5. Hay una renovación de aire de 15 m³/h

Con estas suposiciones se tiene que aproximadamente F , el calor que debe extraerse del recinto, es por cada usuario (ver Figura 2)

$$F = A\delta T + B \quad (2.1)$$

Donde δT es la diferencia de temperatura entre el exterior y el interior y siendo x el espesor de la pared (de ladrillo cerámico en cm) los coeficientes A y B son⁴

$$A = \frac{100 \text{ W/}^\circ\text{K}}{-0,00016262\text{cm}^{-2}\cdot x^2 + 0,02721294\text{cm}^{-1}\cdot x + 0,51550096} \quad (2.2)$$

$$B = 251 \text{ W}$$

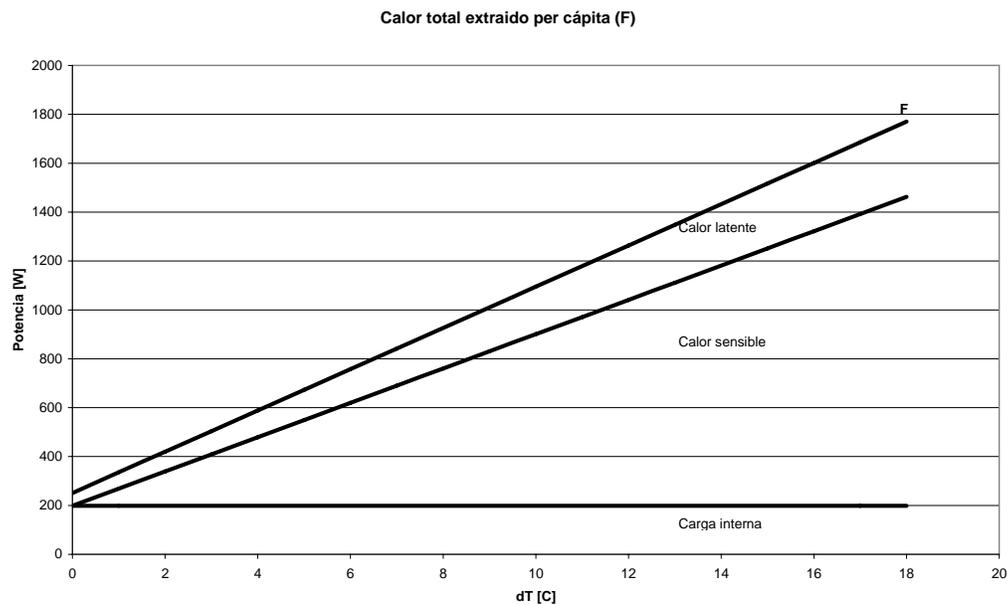


Figura 2: el modelo de la ecuación (2.1) donde se muestran las diversas componentes. La carga interna tiene a su vez una componente de calor latente debido a que las personas humedecen el ambiente a través de la respiración y transpiración.

³ Corresponde a la superficie lateral de una habitación cuadrada de 3m de lado y 2,5 m de altura menos una ventana de 2 m²

⁴ La expresión de A se obtuvo ajustando un polinomio de grado 2 a los valores $1/A$ calculados. La aproximación es excelente.

La potencia requerida (en watts) resulta entonces

$$P = \frac{F}{\text{COP}} \quad (2.3)$$

Donde el COP (Coeficiente de Performance) puede tomarse típicamente para equipos domiciliarios como 2,5. Usando este valor y poniendo $x=30$ cm tenemos

$$F = 84 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}} \delta T + 251 \text{ W} \quad (2.4)$$
$$P = 34 \frac{\text{W}}{^{\circ}\text{C}} \delta T + 100 \text{ W}$$

Según el modelo propuesto hay un incremento en el consumo del orden de 34W por usuario y grado de aumento de la diferencia temperatura del ambiente acondicionado con el exterior. Por otra parte CAMMESA informa un incremento medio de la potencia de 300MW por cada grado de aumento de la temperatura ambiente. Esto supone unos 8,8 millones de usuarios y suponiendo del orden de 3 usuarios por equipo nos indica unos 2,9 millones de equipos. Durante el año 2005 se instalaron alrededor de 1,5 millones de nuevos aparatos de aire acondicionado⁵. Con lo cual este número de equipos no parece descabellado.

⁵ Ver <http://www.ambitoweb.com/seccionesepeciales/suplementos/nacional/noticia.asp?id=9516>

3 Temperatura en Buenos Aires y potencia en el MEM

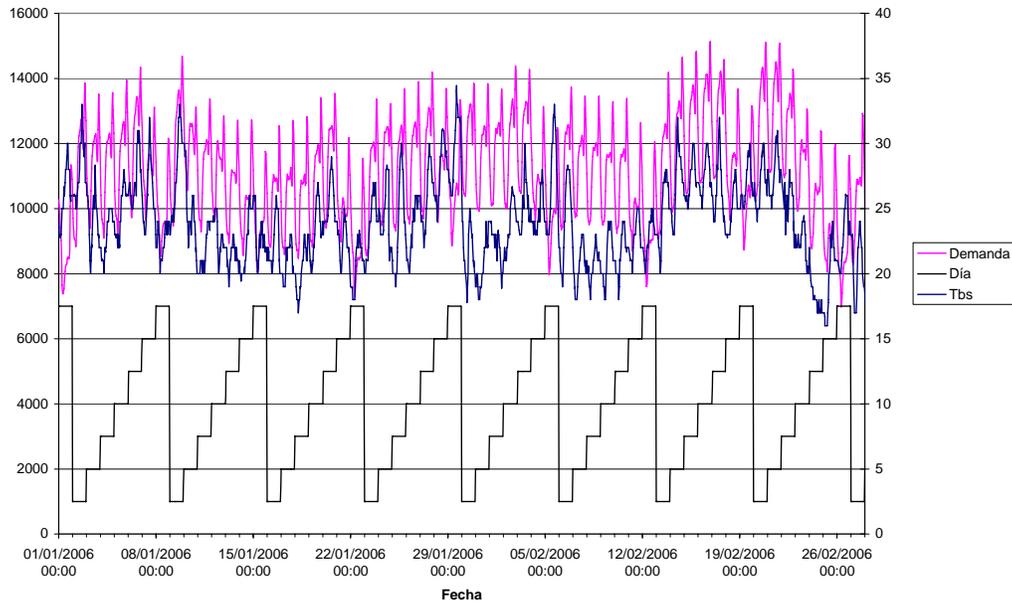


Figura 3: la escalera inferior indica el día de la semana, el más alto es el domingo. La potencia en MW (magenta) se lee a la izquierda, la temperatura en la ciudad de Buenos Aires (azul) en Celsius a la derecha. Los picos de potencia son alrededor de las 21 hs.

4 La marcha del cálculo per cápita

Calor de las personas y aire renovado			
Calor disipado por persona	106	kcal/h	
	123,3	W	
Renovación de aire	6	m ³ /h m ²	No se usan
Superficie por persona	9	m ²	
Renovación por persona	15	m ³ /h	Tomado de HVAC System Design Handbook, R.oger W. Haines y C. Lewis Wilson, Mc Graw Hill, 1994.
Densidad del aire	1,23	kg/m ³	
Renovación por persona	18,45	kg/h	
Calor esp aire	1	kJ/kg °C	
Calor por renovación por persona	5,125	W/ °C	
Capas limites			Tomado de HVAC System Design Handbook, R.oger W. Haines y C. Lewis Wilson, Mc Graw Hill, 1994.
Conductancia term. Capa lim. Ext	4	Btu/h ft ² °F	
	19,84	kcal/h m ² °C	
	23,08	W/m ² °C	
Resistencia term. Capa lim. Ext	0,25	h ft ² °F/Btu	

	0,043	m ² °C/W	
Conductancia term. Capa lim. Int.	1,49	Btu/h ft ² °F	
	7,40	kcal/h m ² °C	
	8,61	W/m ² °C	
Resistencia term. Capa lim. Int.	0,67	h ft ² °F/Btu	
	0,116	m ² °C/W	
Resistencia capas	0,159	m ² °C/W	
Materiales			
Conductividad ladrillo macizo	0,81	W/m °C	
Conductividad vidrio	0,8	W/m °C	
Recinto por persona			
Superficie lateral	30	m ²	
Espesor pared	0,30	m	
Conductancia pared	2,7	W/m ² °C	
Resistencia pared	0,370	m ² °C/W	
Resistencia pared + capas	0,530	m ² °C/W	
Conductancia pared + capas	1,887	W/m ² °C	
UA paredes + caps	52,8	W/°C	
Ventana	2,000	m ²	
Espesor vidrio	0,003	m	
Conductancia vidrio	266,7	W/m ² °C	
Resistencia vidrio + capas	0,163		
Conductancia vidrio + capas	6,126	W/m ² °C	
UA vidrio +capas	12,25	W/°C	
UA total (envuelta)	65,1	W/°C	
Conducción +Renovación	70,2	W/°C	
Aparatos	75	W	
Disipación interna (persona+aparatos)	198,3	W	
Condensación de la humedad			
Hfg	2442	kJ/kg	Ver §6, Detalles sobre la condensación de humedad hfg a 25°C
dHa/dT	0,001	1/°C	Diferencia de hum. abs. entre el ext y el int en kg de agua /kg de aire seco 0,0011321 dT + 0,0042062 suponiendo HRext=80% HRint=50%
Ha0	0,004	*	
dM/dT	0,021	kg/h °C	Ingreso de humedad dado el regimen de renovacion, se sigue de este y la ecuacion anterior
M0	0,078	kg/h	
dCond/dT	14,2	W/°C	Calor de condensacion que se sigue del regimen de ingreso de humedad anterior y el calor de condensación
Cond0	52,6	W	
Resultados			
B	251	W	El calor (en watts) extraido por persona se calcula según
A	84	W/°C	F = 251*dT + 84
COP	2,5		
B/COP	100	W	La potencia (en watts) por persona se calcula según
A/COP	34	W/°C	P = 34*dT + 100

5 La marcha del cálculo global

El cálculo de F suponiendo distribuciones de consignas de temperatura uniforme entre 20 y 25°C y entre 18 y 23°C se ejemplifica a continuación

T	F	dF/dT									6
			0	0	1	1	1	1	1	1	
			18	19	20	21	22	23	24	25	
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	70	84	0	0	420	0	0	0	0	0	
23	154	98	0	0	504	420	0	0	0	0	
24	252	112	0	0	588	504	420	0	0	0	
25	364	126	0	0	673	588	504	420	0	0	
26	490	140	0	0	757	673	588	504	420	0	
27	631	84	0	0	842	757	673	588	504	420	
28	715	84	0	0	926	842	757	673	588	504	
29	799	84	0	0	1010	926	842	757	673	588	
30	884	84	0	0	1095	1010	926	842	757	673	
31	968	84	0	0	1179	1095	1010	926	842	757	
32	1053	84	0	0	1264	1179	1095	1010	926	842	
33	1137	84	0	0	1348	1264	1179	1095	1010	926	
34	1221	84	0	0	1432	1348	1264	1179	1095	1010	
35	1306	84	0	0	1517	1432	1348	1264	1179	1095	
36	1390	84	0	0	1601	1517	1432	1348	1264	1179	

Tabla 1: La 1ra columna indica la temperature exterior, la segunda el valor de F medio, la tercera su derivada respecto a la temperatura exterior las siguientes columnas el valor de F para consignas de 18,19,...,25°C multiplicado por un cierto peso. Sobre estas columnas se encuentra un número que es proporcional al "peso" de la consigna dentro del universo de usuarios. Así las columnas con 0 no se consideran. Nótese que se está considerando una distribución uniforme entre 21 y 25°C. El 6 arriba a la derecha es la suma de los pesos. La media F se obtiene sumando los valores de estas filas y dividiendo en este caso por 6.

T	F	dF/dT									6
			1	1	1	1	1	1	0	0	
			18	19	20	21	22	23	24	25	
19	0	70	0	0	0	0	0	0	0	0	
20	70	84	420	0	0	0	0	0	0	0	
21	154	98	504	420	0	0	0	0	0	0	
22	252	112	588	504	420	0	0	0	0	0	
23	364	126	673	588	504	420	0	0	0	0	
24	490	140	757	673	588	504	420	0	0	0	
25	631	84	842	757	673	588	504	420	0	0	
26	715	84	926	842	757	673	588	504	0	0	
27	799	84	1010	926	842	757	673	588	0	0	
28	884	84	1095	1010	926	842	757	673	0	0	
29	968	84	1179	1095	1010	926	842	757	0	0	
30	1053	84	1264	1179	1095	1010	926	842	0	0	
31	1137	84	1348	1264	1179	1095	1010	926	0	0	
32	1221	84	1432	1348	1264	1179	1095	1010	0	0	
33	1306	84	1517	1432	1348	1264	1179	1095	0	0	
34	1390	84	1601	1517	1432	1348	1264	1179	0	0	
35	1475	84	1686	1601	1517	1432	1348	1264	0	0	
36	1559	84	1770	1686	1601	1517	1432	1348	0	0	

Tabla 2: lo mismo que antes pero con una distribución uniforme de consignas entre 18 y 23°C.

De las Tabla 1 y Tabla 2 con un COP de 2,5 y tomando un número de usuarios ($8,89 \times 10^6$) que a la larga haga $dF/dT=300 \text{ MW}/^\circ\text{C}$ resulta lo siguiente

T	18-23		20-25		Ahorro
	W	dW/dT	W	dW/dT	
19	0	249	0	0	0
20	249	299	0	0	249
21	547	349	0	249	547
22	896	399	249	299	647
23	1295	449	547	349	747
24	1743	499	896	399	847
25	2242	300	1295	449	947
26	2542	300	1743	499	799
27	2842	300	2242	300	600
28	3142	300	2542	300	600
29	3442	300	2842	300	600
30	3742	300	3142	300	600
31	4042	300	3442	300	600
32	4342	300	3742	300	600
33	4642	300	4042	300	600
34	4942	300	4342	300	600
35	5242	300	4642	300	600
36	5542	300	4942	300	600

Tabla 3: T es la temperatura exterior en Celsius, W la potencia total en MW, dW/dT su derivada en MW/C. Se presentan las potencias estimadas para distribuciones uniformes de consignas de temperatura entre 18 y 23°C y 20 y 25°C. La última columna indica el ahorro de potencia en MW al pasar del primer al segundo caso.

6 Detalles sobre la condensación de humedad

La condensación de humedad (masa de agua por unidad de tiempo) no es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas. Si embargo para mantener la simplicidad se utilizó la e aproximación de la Figura 4

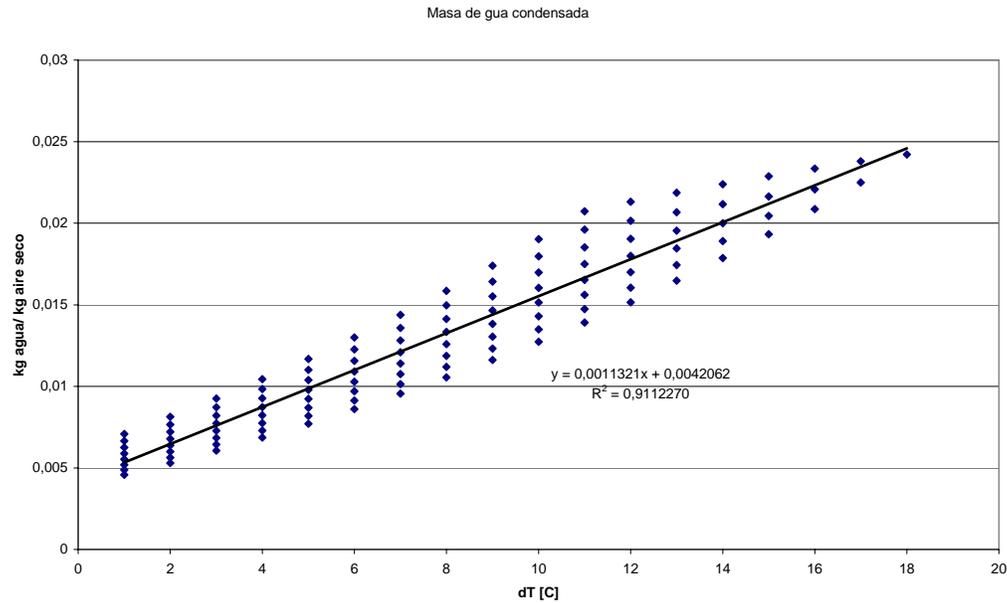


Figura 4: los puntos para cada diferencia de temperatura representan las posibles combinaciones de temperaturas interior y exterior que arrojan esa diferencia. La recta es la recta de cuadrados mínimos que se tomo en el modelo para calcular la condensación.

INTI-Energía – energia@inti.gov.ar.

Av Gral. Paz 5445 Ed. 41.

Tel (54) (11) 4753 5769