



REVISTA CIENTÍFICA TRIMESTAL DE CUBASOLAR

**REVISTA CIENTÍFICA de las
FUENTES RENOVABLES de ENERGÍA**

7



Mejoras en la estimación de las externalidades de la generación eléctrica en Cuba.....	1
Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos.....	12
La gestión del agua y su vinculación con el ahorro de energía.....	23
Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica.....	34
Dispersión local de contaminantes atmosféricos con los modelos de Berlyand e ISCST.....	43
Control de la calidad de los conjuntos de datos sobre clima.....	59

Mejoras en la estimación de las externalidades de la generación eléctrica en Cuba

Improvement on Externality Estimation of Power Generation in Cuba

Elieza Meneses Ruiz

Leonor Turtós Carbonell

Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía (CUBAENERGÍA)

Enrique Molina Esquivel

Instituto Nacional de Higiene, Epidemiología y Microbiología (INHEM)

Resumen

Internacionalmente ha aumentado la importancia de la determinación de las externalidades asociadas al uso de la energía en cualesquiera de sus formas, como una vía segura para la reducción del impacto ambiental provocado por esta actividad: promover el uso de fuentes de energía menos contaminantes y contribuir a alcanzar el tan deseado desarrollo sostenible. Actualmente, en aquellos países donde ya se han dado pasos previos en su estimación y se han obtenido resultados concretos, se trabaja por la mejora de éstos con vistas a que puedan ser empleados de forma directa en la toma de decisiones para el desarrollo energético.

El objetivo de este trabajo es la estimación de las externalidades de la generación eléctrica en Cuba para tres casos de estudio partiendo de la actualización de los datos técnicos de las plantas, mejoras en la estimación de las concentraciones de los contaminantes en el aire, la selección de un nuevo conjunto de funciones exposición-respuesta y la actualización de los datos de costo.

Palabras clave: Externalidades, impacto ambiental, generación eléctrica.

Abstract

Importation on the determination of associated externalities on energy use on any of its forms, as a dependable way for the reduction of the environmental impact caused by this activity: to promote the use of less contaminant energy sources and thus to contribute to reach the desired sustainable development. The countries which have already taken some steps in its estimation and have obtained concrete results, are working for their improvement to be used directly in decision-making for energy development.

This paper is aimed at estimating the externalities of power generation in Cuba for three study cases, taking from technical-data updating in plants, improvement on air-contaminant concentrations estimations, the choice of a new set of presentation-answer functions and cost data updating.

Key words: Externalities, environment impact, electric generation.

Introducción

La determinación de los costos externos de la generación de electricidad y en general del uso de la energía ha aumentado su importancia a nivel mundial, pues estos pueden contribuir a la disminución del impacto ambiental, aun cuando no sean internalizados; basta con tomarlos en cuenta en las decisiones del despacho de las unidades generadoras y en la expansión electroenergética y se crearán condiciones más favorables para la introducción de fuentes de energía menos contaminantes. Además, es importante conocer los costos del impacto para encontrar soluciones económicamente ventajosas con vistas a disminuirlos.

En la década de los noventa se llevó a cabo, por parte de los países miembros de la Unión Europea, el proyecto ExternE, cuyo objetivo fue determinar los costos externos o externalidades asociadas a las cadenas energéticas, incluida la cadena de combustible nuclear. En el marco de este proyecto se desarrolló la metodología Vías de Impacto, que se considera en la actualidad la aproximación más exacta para determinar los costos externos; sin embargo, para su aplicación se requiere una amplia gama de datos y estudios preliminares que limitan su aplicación, sobre todo en países en vías de desarrollo donde existe poca disponibilidad de datos.

Ante la imposibilidad de dichos países de aplicar esta metodología y la necesidad de realizar estudios comparativos desde el punto de vista económico entre las distintas fuentes de energía, incluyendo las energías renovables y la nuclear, el Organismo Internacional de la Energía Atómica propuso a finales de la pasada década las llamadas metodologías simplificadas, surgidas a partir de simplificaciones realizadas a la metodología Vías de Impacto y que permiten la estimación de los costos externos de una manera más sencilla, al alcance de todos los países interesados. Estas metodologías la componen diferentes modelos, entre ellos el AIRPACTS, que nos permite evaluar las externalidades de la generación eléctrica por el impacto de los contaminantes aéreos en la salud humana, cosechas agrícolas y materiales de construcción [Spadaro, 2003].

En estudios preliminares llevados a cabo en Cuba se emplearon las metodologías simplificadas en su forma más compleja y se obtuvieron los costos del impacto de los contaminantes aéreos en la salud para las centrales termoeléctricas (CTE) de mayor capacidad de generación del país; para ello fue requerida una gran cantidad de datos de las plantas, fundamentalmente técnicos y meteorológicos. Sin embargo, muchos otros valores fueron asumidos iguales a los valores obtenidos para Europa debido a la ausencia de datos y estudios preliminares en el país, los cuales no se ajustan a los valores locales; tal es el caso de las funciones exposición-respuesta y los costos unitarios del daño, principalmente.

El objetivo de este trabajo es la estimación de las externalidades ambientales atmosféricas de la generación eléctrica en Cuba para tres casos de estudio a partir de mejoras realizadas en los datos necesarios; incluye la actualización de los datos técnicos de las plantas, mejoras en la estimación de las concentraciones de los contaminantes en el aire, la selección de un nuevo

conjunto de funciones exposición-respuesta y la actualización de los datos de costo. Esto contribuirá a mejorar la exactitud de los resultados y por tanto al aumento de la aceptación de los resultados por parte de los tomadores de decisiones, y a su inclusión en las decisiones para el desarrollo energético.

Actualización de los datos necesarios

La metodología para la evaluación de las externalidades requiere de un número elevado de datos en cada una de sus etapas [Spadaro, 1999]. En este trabajo se siguieron las metodologías descritas en trabajos anteriores [Turtós, 2000], se actualizaron los datos de entrada con la información disponible más actualizada y se establecieron criterios de selección de funciones exposición-respuesta.

Datos de las plantas

Se seleccionaron tres centrales termoeléctricas representativas del Sistema Electroenergético Nacional (SEN): la central Otto Parellada (Tallapiedra), localizada en la Ciudad de La Habana; la central Carlos Manuel de Céspedes ubicada en la provincia de Cienfuegos, y la central Este-Habana, en el municipio Santa Cruz del Norte en la provincia Habana.

En el caso de la central termoeléctrica (CTE) de Tallapiedra, el motivo de su selección radicó en que se encuentra ubicada en el centro de la ciudad de La Habana, donde residen alrededor de dos millones de habitantes, y sus impactos son elevados debido a esta situación especial. La termoeléctrica de Cienfuegos fue seleccionada porque en el momento que se realizaron los cálculos era una de las pocas plantas del SEN que utilizaba fuel oil para la generación y se encontraba en planes de adaptación para la quema de crudo nacional, el cual tiene un alto contenido de azufre (entre 6 y 7 %).

La CTE de Santa Cruz del Norte se seleccionó porque para esta planta se realizaron los cálculos detallados complejos de la dispersión local de contaminantes y los resultados fueron empleados en la estimación de las externalidades.

En la tabla 1 se muestran las principales características de las plantas, necesarias para la estimación de las emisiones de los principales contaminantes del aire, así como otros parámetros importantes para realizar la dispersión local de contaminantes atmosféricos.

Tabla 1. Características de las plantas

Características	Unidades	Santa Cruz del Norte	Cienfuegos	Tallapiedra
Tipo de combustible		Crudo	Fuel oil	Fuel oil
Capacidad neta	MWe	300	316	64
Horas de trabajo a plena carga	h/año	5 565	5 507,8	4 559,5
Emisiones				
SOx	ton./año.	65 146,3	30 794,9	6 288,3

NOx	ton./año	3 620,3	3 342,8	741,1
Partículas (PM10)	ton./año	759,4	441,5	89,9
Velocidad de los gases	m/s	12,7	8,12	6,4
Temperatura de los gases	°C	150	110,5	148
Altura de la chimenea	m	180	100	45,7
Diámetro de la chimenea	m	6	6	4,56
Latitud	°	23,16	22,16	23,12
Longitud	°	81,95	80,45	82,35

La metodología propuesta en el sistema DECADES [IAEA, 1999] fue utilizada para estimar las emisiones de contaminantes aéreos (SOX, NOX y partículas) en cada uno de los casos de estudio.

Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos necesarios para la implementación del modelo ISCLT2, propuesto por el modelo AIRPACTS para realizar la dispersión local de contaminantes aéreos [Spadaro, 1999], fueron tomados de las estaciones meteorológicas localizadas en un área cercana a la ubicación de cada una de las plantas, donde las condiciones geográficas fueran similares.

Para las centrales de Santa Cruz del Norte y Tallapiedra se tomaron datos reportados por la estación meteorológica de Casa Blanca, mientras que para la planta de Cienfuegos se consideraron los datos reportados por la estación de Cienfuegos. El modelo requiere datos meteorológicos que incluyen: velocidad del viento (m/s), dirección del viento (en grados) y la temperatura ambiente (en grados Kelvin) para un año completo; para la estación de Casa Blanca fue posible obtener los datos horarios, mientras que para la de Cienfuegos solamente datos trihorarios están disponibles. Para el caso de la termoeléctrica de Santa Cruz del Norte se completaron los datos meteorológicos de la estación de Casa Blanca con la altura de la capa de mezcla y las clases de estabilidad atmosférica, las que se obtuvieron a partir de las metodologías descritas por Turtós *et al.* [2003]. Para este trabajo la altura del anemómetro fue considerada como 10 m en todas las estaciones.

Velocidades de decaimiento

Otro parámetro de importancia lo constituyen las velocidades de decaimiento (k), claves para la estimación del impacto regional de los contaminantes atmosféricos; esto se realiza a partir de una ecuación muy simple, propuesta en las metodologías simplificadas [Spadaro, 2003], donde la obtención de unas velocidades de decaimiento adecuadas tiene una elevada importancia.

Por ausencia de valores para Cuba, por el momento fueron empleadas las velocidades de decaimiento obtenidas para Europa (Tabla 2), con las que se obtienen los valores más altos de impactos [Spadaro, 2003].

Tabla 2. Velocidades de decaimiento

Contaminantes	Velocidades de decaimiento (k) (m/s)
SOX	0,73
NOX	1,05
PM10	0,67
Sulfatos	1,72
Nitratos	0,76

En este momento ya se ha logrado implementar la dispersión regional de contaminantes atmosféricos de forma detallada y se comenzarán los trabajos para la obtención de valores de velocidades de decaimiento para la región de Centroamérica y el Caribe.

Funciones exposición-respuesta

Las funciones exposición-respuesta (FERs) escogidas para el estudio fueron obtenidas mediante un proceso de análisis, el cual en su primera etapa incluyó la recopilación y análisis de los estudios epidemiológicos más importantes llevados a cabo en Cuba en los últimos veinte años. Para esta primera etapa se partió de la hipótesis de que a partir de los estudios ya realizados en el país era posible obtener funciones que pudieran ser empleadas en las evaluaciones de externalidades [Molina y Meneses, 2003].

El resultado de esta etapa concluyó que no era posible la utilización de ninguno de los resultados, debido a las múltiples limitaciones encontradas en ellos. Por lo tanto, se decidió la selección de un conjunto preliminar de funciones aplicadas a una serie de efectos para los cuales los estudios epidemiológicos nacionales mostraron asociaciones significativas. Estas últimas fueron seleccionadas a partir de una amplia serie de estudios relevantes más recientes, realizados principalmente en los Estados Unidos y Europa.

En el caso de las partículas en suspensión (PM10), las FERs fueron seleccionadas de las propuestas por Ostro [1996], publicada por la Organización Mundial de la Salud. En tanto, las FERs relacionadas con SO₂, NO₂, sulfatos y nitratos fueron tomadas de las propuestas en la base de datos de las FERs por el Proyecto ExternE [Ralb, 2002], en ambos casos, basadas en rangos de exposición a dichos agentes comparables con los reportados en los estudios cubanos. En esta selección fueron incluidos indicadores de morbilidad agudos y principalmente crónicos.

No existen estudios nacionales que aporten evidencia en los casos de mortalidad general y por causas específicas atribuidas a la contaminación atmosférica; sin embargo, dada la importancia y peso que tienen estas funciones en los resultados finales se decidió tomar los valores de mortalidad obtenidos en estudios internacionales. Ello se fundamenta en el hecho de que tanto la expectativa de vida como el perfil epidemiológico de mortalidad del país

se comportan de forma similar a los de los países desarrollados de donde provienen estas funciones.

Se asumió que las FERs son funciones lineales, tal como se asumió en el proyecto ExternE, con concentraciones como parámetro independiente sin umbral; esto quiere decir que no existe ningún valor límite de concentración por debajo del cual el impacto en la salud desaparece.

Si bien la metodología aplicada anteriormente en la determinación de las externalidades sólo nos permitía tomar el valor de pendiente de las FER (SFER) empleadas en otros estudios, fundamentalmente para la morbilidad, existe una metodología propuesta por Ralb [2002] y Ostro [1996] que nos permite acercarnos más a las condiciones de cada país, transfiriendo solamente las relaciones entre las variaciones en la ocurrencia de un efecto dado y las variaciones en los niveles de concentración de un contaminante en específico (y) (ver ecuación 1).

$$\text{SFER} = y \text{ fpop lref} \quad (1)$$

Donde:

G: Relación entre el riesgo relativo y el incremento en la concentración; tiene unidades de tanto por ciento por $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y se obtiene de los reportes de los diferentes estudios epidemiológicos.

FPLP: Fracción de la población afectada.

INEF: Tasa de incidencia base y tiene unidades casos por personas al año. Por lo tanto, utilizando el valor de pendiente obtenido en la ecuación 1, los casos anuales se podrán expresar de la forma siguiente (ecuación 2):

$$I = \text{SFER} (POP_j) (\Delta C_j) \quad (2)$$

Donde:

I: Número de casos anuales POP_j , es el número de receptores en la localización j .

ΔC_j : Cambio anual en las concentraciones de un contaminante dado en el área j .

En la tabla 3 se muestran los valores de las pendientes de funciones exposición-respuesta seleccionadas para el estudio.

Tabla 3. Valores SFER seleccionadas para PM10 y SO2

Efecto	Receptores	Contaminante	SFER
Mortalidad crónica	Total	PM10	0,000192*
Mortalidad aguda	Total	SO2	0,00000163*
Admisiones hospitalarias (respiratorias)	Total	PM10	0,0000120
Días de actividad restringidos	Mayores de 18 años	PM10	0,042

Bronquitis aguda	Niños	PM10	0,000384
Bronquitis crónica	Adultos	PM10	0,0000465
Crisis aguda de asma	Asmáticos	PM10	0,00473
Síntomas respiratorios	Total	PM10	0,180

Donde:

* Los resultados están expresados en años de vida perdidos (YOLL) en lugar de casos al año, considerando que una muerte crónica ~10 YOLL, y una muerte aguda ~ 0,5 YOLL. Se consideran que las PM10 constituyen el 0,55 de las PTS, y que las PM2,5 pueden ser convertidas en PM10 multiplicándolas por 0,625 [Ostro, 1996]. Para los sulfatos y nitratos se asumió que la pendiente de la función exposición-respuesta (SFER), en el caso de los primeros es igual a la de las PM2,5, mientras que para los segundos es la misma que para las PM10 [Ralb, 2002].

Estimación de los valores monetarios

En ausencia de costos unitarios para evaluar el costo del impacto de los principales contaminantes emitidos, como valor preliminar fueron empleados los datos reportados por ExternE., transferidos a las condiciones de Cuba de acuerdo con la expresión [Markandya, 1998]:

$$\text{Daño}_y = \text{Daño}_x \cdot \left(\frac{PPP\ GNP_y}{PPP\ GNP_x} \right)^E \quad (3)$$

Donde el *PPP GNP* es el poder de la paridad de compra del Producto Nacional Bruto,

y *E* es la elasticidad del daño con respecto al *PPP GNP* que depende de lo que estarían dispuesto a invertir las personas del país y en obtener beneficios en salud similares a las del país *x*. *Daño_y* es el costo transferido para el país, y *Daño_x* es el costo del país *x*, el cual resulta conocido y puede ser el costo estimado para la Unión Europea o los Estados Unidos.

Nuestras estadísticas oficiales no incluyen el *PPP GNP* utilizado en la expresión antes mencionada. Por esta razón los datos del *PPP GNP* fueron tomados de las páginas del Banco Mundial para el año 2001, donde un *PPP GNP* es reportado para la región de Latinoamérica y el Caribe, el cual fue de 3 580 USD/persona, mientras que el de la Unión Europea fue de 20 670 USD/persona, de ahí el factor de escala de 0,17. En la tabla 4 se muestran los valores empleados en los cálculos.

Tabla 4. Costos unitarios del daño

Efecto en salud	Costo unitario
Mortalidad crónica	17 170
Mortalidad aguda	29 580
Admisiones hospitalarias (respiratorias)	771,8

Días de actividad restringidos	19,72
Bronquitis crónica	30 226

Existen otras FER que podrían emplearse, pero desafortunadamente hasta el nivel de conocimiento actual no se han podido estimar los costos unitarios del daño para estos efectos, por lo que sólo pueden ser empleadas hasta el nivel de impacto (casos/año).

Datos de población

De acuerdo con los requerimientos de las metodologías simplificadas, las densidades locales y regionales de población fueron calculadas para cada central termoeléctrica (Tabla 5), así como también se obtuvo la población en una resolución de 5 x 5 km, tomando como centro cada una de las centrales termoeléctricas; esto fue posible mediante el empleo de sistemas de información geográficos. Los datos de población fueron actualizados por el *Anuario Estadístico de Cuba* para el año 2001 [ONE, 2002].

Tabla 5. Densidades de población

Densidad de población (personas/km ²)	Santa Cruz	Cienfuegos	Tallapiedra
Densidad local	236	61	267
Densidad regional	12		

Además, se actualizaron los grupos de riesgo con los datos del anuario estadístico de salud para el año 2001 (Tabla 6).

Tabla 6. Grupos de riesgo

Grupos de riesgo	%
Adultos (> 16)	76
Adultos > 18	76
Niños	24
Asmáticos	8,03

Resultados

Para los cálculos se empleó el modelo AIRPACTS [Spadaro, 2003]. Los resultados de costos del daño, así como los costos específicos en USD/tonelada de contaminante emitida y los costos específicos en ¢/kWh para cada una de las plantas seleccionadas están mostrados en la tabla 7.

Tabla 7. Costos del daño para los casos de estudio

Planta	Costo total del daño (MM US\$/año)	Costos específicos en \$/ton.			Costos específicos en cent./kWh
		SOX	NOX	PM10	
Tallapiedra	2,6	264	277	7 920	0,88
Santa Cruz del Norte	14,5	200	277	582	0,87
Cienfuegos	7,19	198	278	366	0,41

Los resultados obtenidos muestran que la contribución del impacto local a los costos externos totales para la central termoeléctrica de Tallapiedra, localizada en un área muy poblada como lo es la Ciudad de La Habana, fue de 44 %, debido principalmente al impacto local de las PM10, mientras que para las de Cienfuegos y Santa Cruz de Norte, localizadas en un área rural, fue de 4 y 5 %, respectivamente.

Del análisis es evidente que la mortalidad tiene una mayor contribución a los costos totales que la morbilidad, en un rango de 59-66 % del impacto total. El impacto debido a la mortalidad crónica representa alrededor de 55 % del impacto total, mientras que la bronquitis crónica y los días de actividad restringidos representaron 24 y 14 %, respectivamente.

Los costos totales del daño mayores le correspondieron a la termoeléctrica de Santa Cruz del Norte (14,5 MM US\$/año, a causa fundamentalmente de su capacidad de generación y a que en la actualidad utiliza el crudo nacional para la generación, mientras que los mayores costos específicos fueron para la de Tallapiedra.

Comparación con resultados obtenidos en trabajos previos

En resultados previos para la CTE de Tallapiedra la contribución al impacto local de los costos totales fue de 47 %; esto se debió a que en estudios iniciales se tuvieron en cuenta FERs de mortalidad y morbilidad para los NOx, los cuales tienen su influencia local fundamentalmente, y no fueron tomadas en cuentas en el análisis actual.

Algo parecido sucede con la contribución a la mortalidad que en los estudios anteriores tuvo un mayor aporte (97 % del impacto total); ahora solamente 66 %, debido a la no inclusión de las funciones de mortalidad aguda para los NOx y a la inclusión de un efecto de morbilidad crónica (bronquitis crónica) para los contaminantes analizados. De los resultados mostrados en la tabla 8 se puede apreciar que no existen diferencias significativas con los actuales para las termoeléctricas de Cienfuegos y Tallapiedra; solamente para el caso de Santa Cruz del Norte, donde la actualización de los datos tuvo gran influencia, pues en los estimados previos se consideró que la planta utilizaba para la generación el llamado fuel 900, que consistía en una mezcla de crudo y fuel oil, al considerar lo que en la actualidad utiliza (crudo nacional 100 %); evidentemente, todos sus impactos serán mayores por ser un combustible con un alto contenido de azufre.

Tabla 8. Costos del daño obtenido en trabajos previos

Planta	Costo total del daño (MM US\$/año)	Costos específicos en \$/ton.			Costos específicos en cent./kWh
		SOX	NOX	PM10	
Tallapiedra	2,4	254	404	4 130	0,72
Santa Cruz del Norte	8,1	165	361	685	0,51
Cienfuegos	6,2	158	358	423	0,36

Cambio de combustible en la CTE de Cienfuegos

Otro aspecto que se analizó fue en cuánto aumentarían los costos totales al introducir

un nuevo combustible en la CTE Carlos Manuel de Céspedes, de Cienfuegos. Como puede apreciarse en la tabla 9, los costos totales se incrementan en 2,3 veces. El crudo nacional es un combustible beneficioso desde el punto de vista estratégico; sin embargo, por su baja calidad es muy dañino para el medio ambiente. Es bueno señalar que solamente se ha tenido en cuenta el impacto que tienen estos contaminantes en la salud humana para un número limitado de efectos; aún faltan por considerar otros efectos probados en salud y los efectos de estos contaminantes en las cosechas agrícolas, materiales de construcción, ecosistemas marinos y acuáticos, etc., donde es aún limitado el nivel de conocimiento actual acerca de cómo evaluar los impactos.

Tabla 9. Resultados para la CTE de Cienfuegos

Tipo de combustible	Costo total del daño (MM US\$/año)	Costos específicos en \$/ton.			Costos específicos en cent./kWh
		SOX	NOX	PM10	
Fuel oil	7,19	198	278	366	0,1
Crudo	16,8	198	277	367	0,96

Conclusiones

Como puede apreciarse, los efectos de la contaminación atmosférica son elevados aún teniendo en cuenta un número bajo de efectos en la salud. Nos queda preguntarnos en cuánto aumentarían estos efectos de considerarse los impactos en otros receptores, como lo son las cosechas agrícolas, los materiales de construcción, bosques; ecosistemas, marinos y terrestres; cambio climático, etc., impactos

que todavía no han sido lo suficientemente bien evaluados por lo complejo que resulta su determinación a nivel del conocimiento actual.

Existen muchas limitaciones e inexactitudes a la hora de estimar los costos del daño; lo que resulta indudable es que lo estimado está por debajo del impacto real que provoca el uso de estos combustibles para el medio ambiente y la salud humana de forma general.

Los resultados obtenidos muestran que para las centrales termoeléctricas seleccionadas los costos totales oscilan entre 2,6 y 14,5 millones de dólares anuales que hacen que el costo del kWh se eleve de 0,41 a 0,88 cent./kWh.

En el marco de este trabajo se emplearon FERs seleccionadas de acuerdo con criterios establecidos que no estaban considerados en la metodología inicial, lo cual constituye un paso de avance.

Los trabajos realizados con anterioridad han sido mejorados, hasta donde nuestro conocimiento actual y nuestras posibilidades nos lo han permitido. Sin embargo, el proceso de perfeccionamiento y mejora de los resultados continúa. Actualmente se han iniciado los trabajos de implementación de la dispersión regional de contaminantes atmosféricos, lo que nos permitirá la determinación más exacta del impacto regional. Se han obtenido resultados preliminares del impacto en las cosechas agrícolas y se espera que a corto plazo puedan ser considerados otros receptores, además de la salud.

Bibliografía

- DECADES Tools, User's Manual for Version 1.0, IAEA, Vienna, 1999.
- IAEA, 2002, Final Report on Research Contract No CUB-11209, «Estimation of externalities in Cuba using simplified methodologies», Submitted to IAEA, Research Co-ordinate Program: «Estimating the cost of externalities in developing countries using simplified methodologies», Havana, February, 2002.
- MARKANDYA. *The Indirect Costs and Benefits of Greenhouse Gas Limitations*. Economics of Greenhouse Gas Limitations Handbook Reports, prepared for the UNEP Collaborating Centre on energy and Environment, Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1998.
- MOLINA, E. Y E. MENESES. «Análisis de estudios epidemiológicos nacionales para la obtención de funciones exposición-respuesta». *Revista Contribución a la educación y a la protección ambiental*. vol. 4. La Habana: Ed. Academia, 2003.
- ONE. *Anuario Estadístico de Cuba*, Oficina Nacional de Estadísticas. Ministerio de Economía y Planificación, 2002.
- OSTRO, B. «A methodology for estimating air pollution health effects», Geneva: WHO, 1996.
- RABL, A. AIRPACTS exposure response functions. Austria: International Atomic Energy Agency, 2002.
- SPADARO, J. Quantifying the Health Impacts of Air Pollution. Prepared for the International Atomic Energy Agency, Planning and Economics Studies Section, Nuclear Division, Vienna, Austria, 1999.
- . AIRPACTS Model Version 1.0. April, 2003.
- TURTÓS, L. Y E. MENESES. «Metodología para la determinación de los datos a utilizar en la evaluación de las externalidades». La Habana: VI Taller Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, 2000.
- TURTÓS, L.; A. ROQUE, R. SOLTURA Y M. SÁNCHEZ GÁCITA. «Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos». La Habana: VIII Taller Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN, 2003.

Herramientas de análisis para simulación de sistemas híbridos

Analysis Tools for Hybrid Systems Simulation

Omar Guillén Solís

*Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Energías No Convencionales,
Avenida Reforma 113, Temixco, Morelos, CP 62490, México.*

Tel.: +52 (777) 362-38-11 Ext. 7771.

Fax + 52 (777) 362-38-06.

e-mail: oguillen@iie.org.mx

Resumen

Para facilitar y simplificar el desarrollo y análisis de un sistema híbrido en lo referente a diseño, construcción, operación y mantenimiento, resulta óptimo efectuar la simulación de éste por medio de software, con lo cual se obtiene una reducción significativa en los costos de inversión. Dada la mezcla de tecnologías de generación eléctrica que están involucradas en un sistema híbrido es muy importante disponer de una herramienta integrada con paquetes especializados de cómputo (software), que permitan efectuar las tareas de simulación del funcionamiento operacional de estos sistemas, sin dejar de considerar características de funcionamiento, facilidades al usuario, claridad en los resultados obtenidos y la posibilidad de su validación con respecto a prototipos instrumentados en campo; asimismo, la identificación de tareas involucradas con relación al lugar de instalación de esta tecnología de electrificación. Actualmente la tecnología de sistemas híbridos se encuentra todavía en etapa de desarrollo en el plano internacional, y existen limitaciones importantes en cuanto a la disponibilidad de metodologías y herramientas ingenieriles para el diseño óptimo de estos sistemas. Con el desarrollo de este trabajo se pretende contribuir al avance de la tecnología y contar con herramientas propias para resolver la problemática descrita. En este artículo se describen las actividades que más impacto tienen en el diseño y desarrollo de sistemas híbridos, así como la identificación de variables, características principales y forma de validación de herramientas en la integración de una metodología para la simulación de estos sistemas, lo que facilita su diseño y desarrollo.

Palabras clave: Sistemas híbridos, software, herramienta de análisis, metodología.

Abstract

For facilitating and simplifying hybrid system development and analysis regarding design, construction, operation and maintenance, it is convenient to make its simulation by using a software system, resulting in a significant reduction in investment costs. Given the blend of electric generation technologies involved in a hybrid system, it is very important to have an integrated tool with specialized software that allows to make the operational simulation tasks of these systems, not losing time considering operational characteristics, facilities for the user, clear view of the results obtained and the

possibility of its validation in prototypes made on the field. Likewise, tasks identification are performed on the installation site of this electrification technology. Hybrid system technology is currently on a development stage in the international field, still significant limitations are found in tool methodologies and engineering to achieve an optimal design of these systems. This paper is aimed at contributing to the progress of this technology and to count on tools to solve the abovementioned problem. This paper describes the activities that have a strong impact on hybrid systems design and development, as well as on variables identification, operational characteristics and validation form of the tools used in the integration of a methodology for the simulation of these systems, thus facilitating its design and development.

Key words: Hybrid systems, software, analysis tools, methodology.

I. Antecedentes

Los sistemas híbridos son sistemas de generación de energía eléctrica que emplean alguna combinación de fuentes renovables de energía, como la eólica, solar, hidráulica, biomasa, etc.; opcionalmente auxiliadas con alguna fuente de generación a base de combustibles fósiles y con almacenamiento en baterías. El funcionamiento de un sistema híbrido es difícil de verificar por la intermitencia de recursos renovables, por la necesidad de equiparar el suministro eléctrico con la demanda, y por el gran número de combinaciones y tamaños de componentes que darán pie a configuraciones potenciales.

México es un país en el que actualmente existen comunidades donde el suministro eléctrico se proporciona solamente por unas cuantas horas al día por medio de generadores diesel, por lo que sus aplicaciones y actividades productivas son muy limitadas.

Para solucionar en gran parte esta problemática, el Instituto de Investigaciones Eléctricas desde hace algunos años tiene establecida una línea de investigación en la cual trabaja para desarrollar esta tecnología en aplicaciones productivas a nivel experimental.

II. Requerimientos y características que tienen más impacto en el diseño y desarrollo de sistemas híbridos

Para el desarrollo de sistemas híbridos ya se ha identificado una serie de requerimientos específicos y características para el abastecimiento de energía eléctrica; específicamente en comunidades rurales, gran parte de estos requerimientos se utilizan como una guía para definir y establecer el diseño de un sistema que garantice el abastecimiento energético requerido, a bajo costo, y sobre todo aceptado por la comunidad beneficiada. A continuación se mencionan algunos de los requerimientos más importantes para que el sistema sea sostenible:

- Uso de energías renovables en sitios remotos y la disponibilidad de recursos energéticos locales.
- Potencia requerida definida y constante.
- El menor costo nivelado posible de la energía generada.
- Operación y mantenimiento.
- Operación desatendida.

- Aceptación local.
- Seguridad.
- Vida útil en servicio.
- Flexibilidad y facilidad de expansión de la capacidad.
- Funcionalidad ante severas condiciones ambientales.
- Reproducibilidad.
- Creación de las estructuras de organización en la comunidad para procurar cuidados al sistema.

Otros aspectos no menos importantes se presentan en la instalación, donde gran parte de la problemática es atribuible, al igual que en el diseño, a la falta de una guía metodológica y herramientas de software; por mencionar algunos se tienen los aspectos técnicos y los no técnicos.

Aspectos técnicos

- Falta de conocimiento suficiente respecto a la disponibilidad de recursos renovables (principalmente viento) en algunos proyectos, que conduce al subdimensionamiento de los sistemas.
- Selección de componentes sin tomar en cuenta el medio ambiente del lugar de instalación de los sistemas, que conduce a fallas prematuras de partes y componentes (principalmente en zonas costeras).
- En algunos diseños no se toma en cuenta el aumento en el consumo de energía una vez que los usuarios se acostumbran al servicio eléctrico.

Aspectos no técnicos

- No se dejan partes de repuesto y componentes críticos de los sistemas en las comunidades.
- Servicios técnicos especializados y refacciones provenientes del extranjero, sin representación en México.
- Algunos de los sistemas implementados han sido únicos en su tipo.
- La cuota pagada por el servicio eléctrico en las comunidades solamente cubre los costos de operación.
- En varias comunidades beneficiadas con sistemas híbridos no se crearon estructuras organizacionales.
- Costo del sistema.

III. Tecnología informática (software) aplicable a la simulación de sistemas híbridos

Para efectuar el análisis de identificación y funcionamiento de las herramientas de cómputo (paquetes especializados de software), se procedió a investigar por diversos medios cuáles paquetes especializados efectúan alguna o varias actividades para la simulación y dimensionamiento de los sistemas híbridos de electrificación a nivel mundial; y como resultado de este análisis se identificaron tareas que resultaron muy interesantes para establecer una metodología, algunas de ellas críticas e imprescindibles; y otras de tipo complementario:

- Factibilidad técnica y económica de un sistema híbrido (*crítica e imprescindible*).
- Funcionamiento operacional: Simulación (*crítica e imprescindible*).
- Cálculo de las emisiones contaminantes evitadas por el uso de tecnologías limpias (*complementaria*).

- Simulación de pequeñas redes eléctricas de distribución (*complementaria*). La identificación de las tareas fue resultado del análisis de cada uno de los paquetes especializados. Así se determinó que los paquetes de cómputo que resultaron más favorables en la integración de una metodología para simulación de sistemas híbridos son en cada caso: HOMER, HYBRID2, RETScreen y ViPOR; respectivamente.

III.1. Factibilidad técnica y económica de un sistema híbrido

Para cubrir la necesidad de una herramienta de planificación técnica y económica de valoración de sistemas híbridos, donde se pueda analizar y evaluar un gran número de opciones, así como la factibilidad de éstas de una manera simple y obtener una configuración óptima del sistema requerido, se identificó y comprobó que el paquete de software que más se ajusta a las necesidades antes descritas es HOMER.

HOMER es el significado en inglés de Modelo de Optimización para Sistemas Híbridos Eléctricos con Base en Energías Renovables (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*) desarrollado por NREL (*National Renewable Energies Laboratory, Estados Unidos*).

Como una de las características principales de HOMER, éste se identifica como una herramienta útil para determinar el menor costo de la energía generada a las comunidades remotas (\$/kWh). Esto es realizado mediante simulaciones de cada hora de funcionamiento de miles de sistemas potenciales analizando los costos del ciclo de vida útil. También realiza análisis de sensibilidad para evaluar el impacto de un cambio en cualesquiera de los parámetros de entrada y proporciona resultados anuales, de cada hora, y en forma tabular y gráfica.

Entre las características principales del paquete se destacan las siguientes:

- Optimizar el diseño, llegando a la configuración del sistema con el costo mínimo de energía nivelado.
- Considerar generación hidráulica, biomasa e hidrógeno.
- Comparar sistemas híbridos a extensión de red convencional.
- Considerar mezclas de cargas en corriente alterna y corriente directa.
- Realizar análisis de sensibilidad.

Entre los datos proporcionados por HOMER, las principales variables indicativas de cada configuración son: Valor presente neto del sistema (\$) y costo nivelado de energía generada (\$/kWh), en la que la configuración óptima resulta la de menor costo nivelado.

III.2. Funcionamiento operacional (simulación)

Para realizar la simulación del funcionamiento y operación de un sistema híbrido se identificó una herramienta ya utilizada en diferentes tipos de sistemas y en distintas condiciones de operación, así como de aplicaciones. Para utilizar esta herramienta es necesario establecer como características principales de entrada que se realice una evaluación preliminar de los componentes del sistema híbrido, como paneles fotovoltaicos, aerogeneradores y moto-generadores a diesel, controlador e inversor de carga

(este último, si se requiere). También se debe realizar una evaluación y caracterización de los recursos disponibles de energías renovables y

establecer un patrón de consumo energético de la aplicación en análisis: la demanda eléctrica de una comunidad o de un proceso productivo.

La herramienta identificada para estos fines es HYBRID2. Este paquete de cómputo emplea un análisis estadístico para hacer más preciso su cálculo durante el intervalo de tiempo de registro de los datos, y puede modelar sistemas con series de tiempo de cualquier tamaño (días, horas, minutos, etc.). HYBRID2 también fue desarrollado por NREL.

Entre las características principales del paquete se destacan las siguientes:

- Simular sistemas con más de un generador diesel.
- Realizar simulaciones con tiempos de análisis menores a una hora.
- Considerar variabilidad del recurso y valores de carga dentro de un solo intervalo de tiempo.
- Simular mezclas de cargas en corriente alterna y corriente directa.
- Simular más estrategias de suministro.

Con la utilización de este programa se pretende disminuir los costos inherentes al diseño y desarrollo (proyecto de ingeniería) de los sistemas híbridos, dado que no es necesario implementar físicamente un prototipo para validar un diseño; y una sola persona puede manejar en la computadora el paquete de cómputo.

III.3. Emisiones contaminantes evitadas por el uso de fuentes renovables para generación eléctrica

Sobre este rubro, que resulta de gran importancia actualmente, es indispensable calcular los gases contaminantes no emitidos a la atmósfera por utilizar fuentes renovables de energía. Estos cálculos son la base para promover y en su caso solicitar instrumentos de financiamiento para el desarrollo y operación de los sistemas, como son los bonos de carbono de la Organización de Naciones Unidas (entre otros mecanismos); además de contribuir a la mitigación de gases de efecto invernadero.

La herramienta identificada para realizar esta tarea es RETScreen. Este programa se distribuye gratuitamente (previo registro) por los sitios Web del Gobierno de Canadá, a través de su Ministerio de Recursos Naturales (CANMET) y su Laboratorio de Investigación en Diversificación de Energía (CEDRL).

El programa está diseñado en hojas de cálculo interactivas de Microsoft-Excel®. Provee una plataforma común, tanto para toma y soporte de decisiones como para propuestas de incremento de capacidad de generación ante sistemas ya construidos. Evalúa y analiza la producción de energía, costos en el ciclo de vida útil y emisiones evitadas de gases de efecto invernadero; todo para las distintas tecnologías de generación eléctrica

disponibles con base en energías renovables: solar (fotovoltaico y térmico), eólica, biomasa e hidráulica; cada una con su propia hoja de cálculo y por separado.

Entre las características principales del paquete resaltan:

- Algunos costos de equipos ya cargados por definición.
- Análisis de emisiones evitadas de gases de efecto invernadero por utilizar fuentes renovables de energía.
- Flujos de caja (ingresos y egresos en el tiempo).
- Tipos de cambio monetario para varias divisas de trabajo.
- Acceso a su propia base de datos climatológicos mundiales, en línea.
- Acceso a la base de datos climatológicos mundiales de la NASA, en línea.

Es importante resaltar que cada uno de los módulos de RETScreen está diseñado para analizar una tecnología de energía renovable por separado; es decir, si se analiza un proyecto híbrido, tendrán que ingresarse las características de la componente fotovoltaica en el módulo correspondiente, las componentes eólicas en otro módulo, y así con las otras fuentes de energía, para finalmente obtener como resultado la suma de todos los efectos.

III.4. Simulación de pequeñas redes eléctricas de distribución

Se consideró útil incluir esta tarea como integración completa del sistema híbrido a las comunidades que vayan a ser objeto del proyecto de electrificación. Una vez configurado y construido un sistema híbrido, deben concebirse también los medios para hacer llegar su energía a las aplicaciones requeridas: electrificación general a una pequeña comunidad, sistemas de bombeo de agua, telecomunicaciones, etc. Para tal fin, es necesaria una herramienta de cómputo que simule la optimización de la pequeña red de distribución transportadora del fluido eléctrico a las aplicaciones solicitadas.

La herramienta identificada para realizar esta tarea es ViPOR. Este es un modelo de optimización para sistemas de electrificación de pequeñas comunidades. ViPOR significa modelo de optimización para electrificación de pequeñas comunidades con energías renovables (*Village Power Optimization Model for Renewables*). También fue creado por NREL.

Dado un mapa de la pequeña comunidad e información sobre los tamaños de carga y costos de equipos, ViPOR determina cuáles viviendas deben alimentarse por sistemas aislados, generalmente fotovoltaicos (FV); y cuáles deben ser incluidos en la red centralizada de distribución. La red de distribución se diseña de manera óptima con consideración a costos y topografía del sitio.

El paquete también efectúa comparaciones de una minired optimizada con respecto a electrificar la comunidad en estudio con sistemas aislados domiciliarios únicamente. Estos sistemas son generalmente fotovoltaicos.

IV. Metodología para la simulación y evaluación de sistemas híbridos

Una vez concluida la revisión de las herramientas de cómputo, se procedió a conformar una metodología que involucrara el software evaluado, mediante pasos establecidos con base en el análisis habitualmente realizado para el

diseño, desarrollo y pruebas experimentales, así como también el análisis de factibilidad técnica y económica de proyectos de esta naturaleza.

Se concibió como el objetivo principal en el desarrollo de la presente metodología, la sistematización de una serie de pasos por módulos que conlleven al diseño y dimensionamiento de un sistema híbrido para electrificación rural, considerando como premisas tener un rendimiento óptimo y funcional. Dentro de la serie de pasos principales para el establecimiento de una metodología, queda implícita la aplicación de los paquetes de cómputo en el módulo correspondiente; se tiene así la estructura siguiente:

Módulo 1. Información

- Conocer las necesidades de electrificación.
- Obtener de alguna fuente o generar información de los recursos energéticos aplicables.
- Procesamiento de la información.
- Visitas de campo para la obtención de información de proyecto.
- Cálculo de las necesidades de energía.
- Obtención de costos de componentes de sistemas de electrificación rural.
- Diseño preliminar de las instalaciones necesarias.

Módulo 2. Ejecución de programas (software)

- Análisis de sensibilidad de costos. Obtención de costos nivelados de energía (*utilización de HOMER*).
- Simulación preliminar del sistema. Obtención de la configuración óptima (*utilización de HOMER*).
- Simulación operacional. Refinamiento del sistema (*utilización de Hybrid2*).
- Análisis económico y financiero.
- Análisis de mitigación de gases de efecto invernadero (*utilización de RETScreen*).
- Si se requiere diseño e implementación de la pequeña red de distribución eléctrica (*utilización de ViPOR*), deberá definirse al inicio de la aplicación de la metodología, es decir, cuando se definen las necesidades de electrificación.

Módulo 3. Resultados

Presentación del anteproyecto

En este último módulo se describe un anteproyecto completo con su análisis técnico y económico, listo para desarrollar un proyecto ejecutivo y posteriormente establecer los convenios para su desarrollo y operación.

En el siguiente diagrama de flujo se muestran, de manera secuencial, los pasos de la metodología.

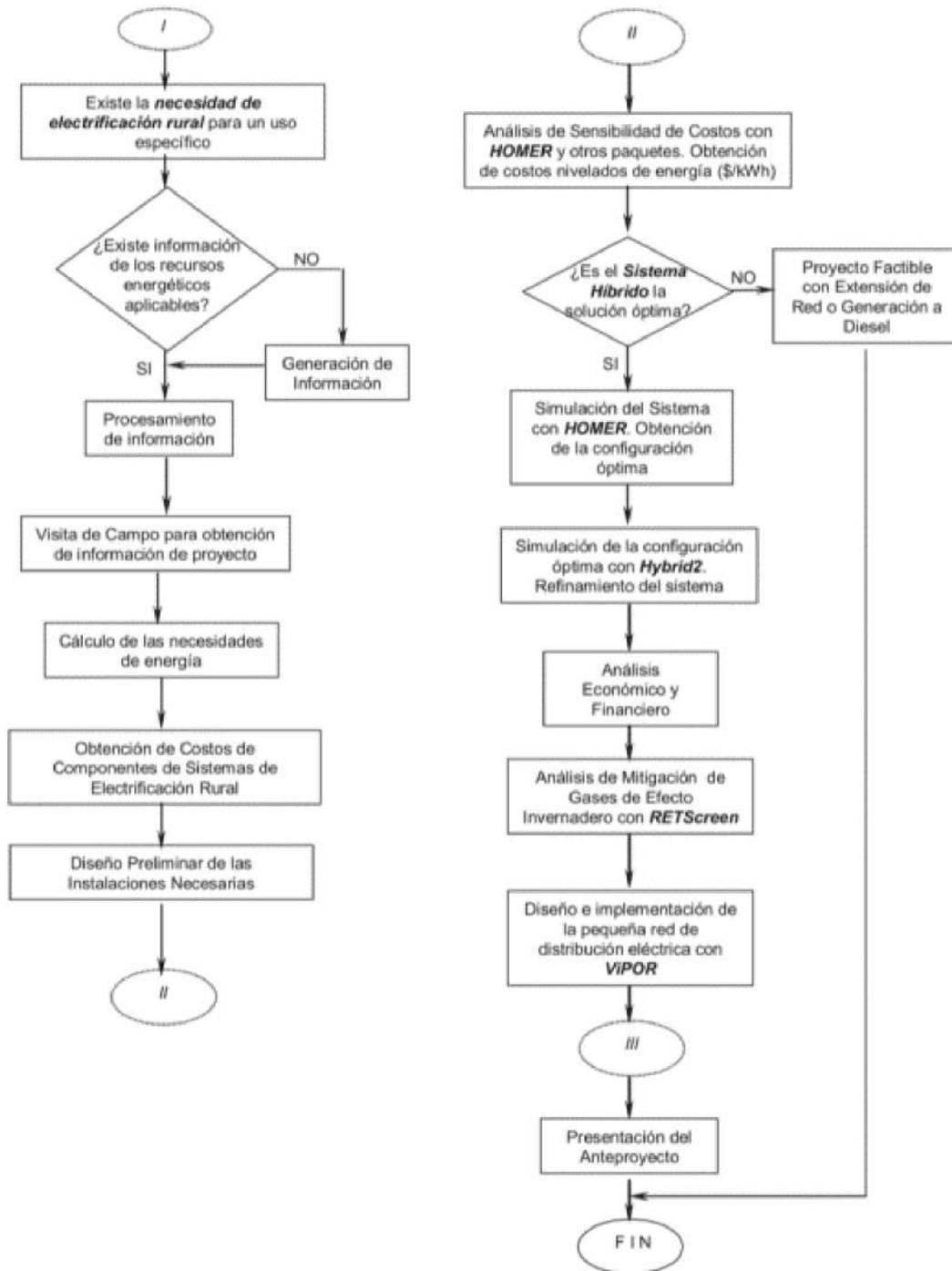


Fig. 1. Diagrama de flujo de la metodología.

V. Aplicación de la metodología

Para ejemplificar la aplicación de la metodología se realizó una comparación entre la información generada por un programa y la obtenida de un sistema híbrido experimental.

Se efectuó una comparación general de los parámetros generados en campo en un sistema híbrido experimental y datos generados por el software HYBRID2 y se compararon ambas fuentes de información por medio de

diferencias absolutas y relativas; se obtuvieron, de esta manera, indicadores estadísticos y gráficas del análisis efectuado.

El sistema híbrido experimental contra el cual se compara la información generada por software está ubicado en la ciudad de Pachuca, estado de Hidalgo; a 70 km al Norte de la ciudad de México; y tiene una capacidad instalada de 2,7 kW en paneles fotovoltaicos, 2,5 kW en pequeñas turbinas eólicas, un banco de baterías de 1 500 Ah a 12 V, y un motogenerador de gasolina de 6,4 kW.



Fig. 2. Sistema híbrido experimental ubicado en la ciudad de Pachuca, Hidalgo.

Los parámetros de comparación entre el sistema experimental y el programa de simulación HYBRID2 corresponde a la variables de radiación solar (W/m^2), generación FV (W), velocidad del viento (m/s), generación eoloeléctrica (W), temperatura ($^{\circ}C$), potencia de entrada a las baterías (W), potencia de salida de las baterías (W).

Para poder realizar la comparación entre ambas fuentes de información se definieron dos condiciones que utilizan el cálculo de diferencias entre valores: La diferencia absoluta parte de la diferencia en valor absoluto entre valores de una misma variable para ambas fuentes de información y en un mismo período de análisis. Posteriormente se calculan los promedios de los valores obtenidos.

Por otra parte, la diferencia relativa se obtiene calculando la diferencia, en tanto por ciento, entre valores de una misma variable de ambas fuentes de información. Estos valores, de manera adimensional, permiten calcular promedios de comportamiento entre distintas variables, y también poder estimar un índice de comportamiento general del sistema híbrido.

Otro parámetro necesario en la validación es la definición del índice de confiabilidad entre fuentes de información, que equivale al complemento de la diferencia relativa para llegar a 100 %.

Para entender mejor estos conceptos se utiliza un ejemplo: Hybrid2, donde se estimó una temperatura de $12^{\circ}C$ en un intervalo, y el sistema experimental reportó para el mismo período de análisis una temperatura de $14^{\circ}C$. La diferencia absoluta entre estos dos valores es de $2^{\circ}C$, y la relativa es de 14 %.

El complemento a 100 % de este último valor es 86 %, y precisamente éste es el índice de confiabilidad entre ambas fuentes de información.

Una confiabilidad entre fuentes más cercanas a 100 % indica una menor diferencia comparativa entre datos calculados (Hybrid2) y datos colectados en campo (sistema híbrido de Pachuca). A mayor diferencia, menor confiabilidad entre fuentes, y viceversa.

Para el caso de la variable temperatura, el análisis arrojó los resultados mostrados en la siguiente gráfica:

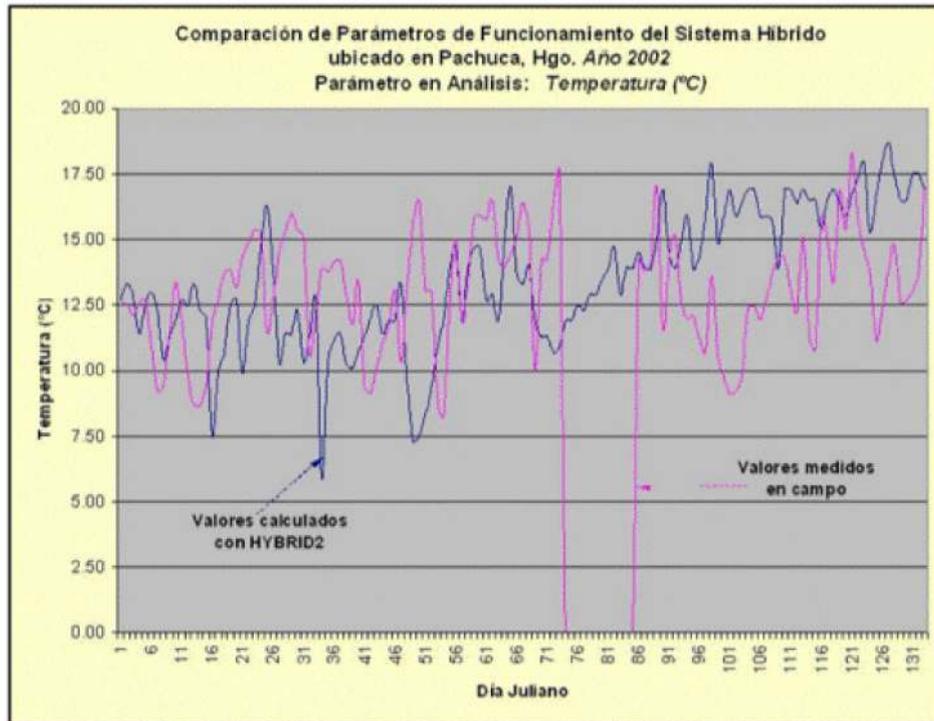


Fig. 3. Comparación gráfica entre parámetros de funcionamiento de la variable temperatura.

En este caso particular, la diferencia promedio entre fuentes de información para la variable temperatura es de 20 %, con una correspondiente confiabilidad de 80 %.

VI. Conclusiones

La metodología de trabajo expuesta estará en constante proceso de revisión, ya que es susceptible de actualizarse o adaptarse según las necesidades de quien la aplique. En el análisis comparativo, HYBRID2 no toma en cuenta algunos sucesos de variables que se ven en las gráficas, como la probabilidad de que se presenten ráfagas instantáneas de altas velocidades de viento, frecuentes en Pachuca.

Es destacable que la mayoría de los paquetes utilizados provienen de NREL (National Renewable Energies Laboratory, Estados Unidos). Esto no significa que se esté haciendo una abierta propaganda hacia esta institución, pero es de

hacer notar la disponibilidad de acceso a sus herramientas de cómputo y la claridad con la cual es posible trabajar con ellas, que ninguna otra institución mostró dentro del análisis. Otras instituciones poseen paquetes a nivel experimental, sin disponer de versiones comerciales o de evaluación, por lo que no fue conveniente incluirlas en el desarrollo de la metodología de diseño e implementación de sistemas híbridos de electrificación aislada de la red convencional.

Las herramientas de análisis (software) deben tomarse como ayudas que facilitan efectuar las tareas pesadas del diseño y evaluación de los sistemas híbridos. Tales herramientas permiten afinar el criterio y la sensibilidad para juzgar los resultados que presentan y canalizarlos así a un buen diseño. Con base en la experiencia se mejora este criterio.

VII. Bibliografía

AVIA ARANDA, FÉLIX. *Principios de conversión de la energía eólica*. CIEMAT, Madrid, España, 1994.

BORJA, MARCO A., ET AL. «Estado del arte y tendencias de la tecnología eoloeléctrica». México: Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) y Programa Universitario de Energía-Universidad Nacional Autónoma de México (PUE-UNAM), 1998.

COMISIÓN FEDERAL DE ELECTRICIDAD. «Manual de diseño de obras civiles». Área de Estructuras. Criterios de Diseño, C.1.4 Diseño por viento. México: 1983.

Comisión Nacional para el Ahorro de la Energía, a través de su página en Internet: www.conae.gob.mx.

Comisión Nacional para el Desarrollo de los Pueblos Indígenas (CONADEPI), a través de su página en Internet: www.ini.gob.mx.

ENRÍQUEZ HARPER, GILBERTO. *Fundamentos de sistemas de energía eléctrica*. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. México: Instituto Politécnico Nacional (ESIME-IPN). Ed. Limusa, 1985.

«Integración de un sistema de adquisición de datos base, para evaluación de comportamiento

y seguimiento operacional de sistemas convertidores de fuentes no convencionales de energía orientados a la generación de electricidad». Informe IIE/FE/FNCE/5520/I07/P, enero de 1995.

MCMULLAN, J. T., ET AL. *Recursos energéticos*. Barcelona: Ed. Blume, 1981.

Norma internacional: IEC 61724, «Photovoltaic system performance monitoring-Guidelines for measurement, data exchange and analysis». 1998a.

Norma internacional: IEC 61400-12, «Wind turbine generator systems-Part 12: Wind turbine power performance testing». 1998b.

Notas recabadas por Omar Guillén Solís en el Módulo Presencial de la «IV Maestría en energías renovables: Aplicaciones al ámbito rural», Universidad Internacional de Andalucía, Santa María de La Rábida, España, 1999.

Paquete de cómputo del Gobierno de Canadá, Ministerio de Recursos Naturales (CANMET), Laboratorio de Investigación en Diversificación de Energía (CEDRL).

Programa del Medio Ambiente de las Naciones Unidas, RETScreen 2000®.

Paquetes de cómputo de NREL (National Renewable Energies Laboratory, Estados Unidos): HOMER®, Hybrid2® y ViPOR®.

SOLÍS, OMAR GUILLÉN. «Manual de cálculo y proyecto de instalaciones híbridas para electrificación rural en México». Tesis de Maestría. España: Universidad Internacional de Andalucía, 2001.

La gestión del agua y su vinculación con el ahorro de energía

Water Management and Its Link with Energy Saving

□

Dr. Eduardo López Bastida

Dr. Wilfredo Francisco Martín

Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba.

Tel.: (432) 511963.

e-mail: kuten@fmec.ucf.edu.cu; kkuten2002@yahoo.com

□

Resumen

En este trabajo se presenta una metodología para la realización de auditorías de ahorro y uso racional del agua en empresas de producción y servicios y la aplicación de un plan de gestión. También aparecen herramientas generales que permiten determinar el comportamiento en la eficiencia del uso del agua en las diversas actividades de las empresas y sus posibles potenciales de ahorro de agua y la energía vinculada a su uso, así como herramientas específicas para los sistemas que más usan agua y gastan más energía asociada, como son generadores de vapor, sistemas de enfriamiento, sistemas de bombeo, piscinas, etc. Se ejemplifica con varios ejemplos de casos la aplicación de esta metodología y sus potenciales reales de mejorar la gestión, tanto económica como ambiental, de las empresas estudiadas. Al final del trabajo se hace una valoración de las barreras y condicionantes necesarias dentro de una empresa para aplicar una correcta política de producción limpia, vinculada con el agua y su energía asociada.

Palabras clave: Gestión del agua, ahorro de energía, distribución.

Abstract

This paper contains a methodology on saving audits and water rational use in production and services enterprises in Cuba and on the implementation of an action plan. General tools are also described which determine efficiency in water use in different activities of these enterprises and their potential water potential savings and energy-related use, as well as specific tools for the systems which consume most associated water as is the case of vapor generator, cooling systems, pumping stations, pools and so forth. Several examples are provided on the implementation of this technology on some cases and its real potential on improving management in the enterprises under study, both economically and environmentally. An assessment is made at the end of this paper on the conditions and limitation within an enterprise to implement a right policy on clean production, linked to water and associated energy.

Key words: Water management, water saving, distribution.

Introducción

Teóricamente, el agua debería considerarse como una materia prima cualquiera utilizada en un proceso de producción o servicio. Sin embargo, razones históricas lo han impedido y por muchos años se consideró un

elemento común e ilimitado, de poca consideración en los balances económicos de las empresas de producción y servicio y en la cual gran parte de los residuales de un producto, proceso o servicio iban a parar. No obstante, en las últimas décadas esta situación ha cambiado debido a la escasez cada día mayor de las fuentes de abasto y el deterioro de ríos, lagos y océanos debido al vertimiento en ellos de grandes volúmenes de contaminantes; hoy en día la gestión eficiente de este recurso es un factor clave en la ecoeficiencia de las empresas de producción y servicio.

El agua es necesario analizarla desde dos puntos de vista: el cuantitativo y el cualitativo, el primero porque se consume en prácticamente todas las actividades productivas y de servicios, el cualitativo porque no todas requieren las mismas calidades y eso es lo que determina la necesidad de uno u otro tratamiento y el costo en que se incurre.

El sistema de gestión de agua en una organización empresarial es parte de la gestión general de la organización, que incluye la estructura organizativa, las actividades de planificación, responsabilidades, prácticas, procedimientos, procesos y recursos para desarrollar, implantar, revisar y mantener la política sobre el ahorro y uso del agua, y forma parte de su sistema de gestión ambiental.

Objetivos de la gestión del agua

La gestión del agua debe contemplar al menos los objetivos fundamentales siguientes:

1. La necesidad de tomar medidas para la conservación de este recurso tan importante para la vida.
 2. El agua debe ser reciclada y reutilizada dentro de las propias producciones, y cuando finalmente deban ser dispuestas como un efluente no deben causar impacto negativo sobre el medio ambiente de acuerdo con el cumplimiento de los aspectos legislativos vigentes.
 3. Las aguas tanto residuales como para su uso en la industria y los servicios deben ser controladas desde los puntos de vista de sus cantidades y calidades.
 4. Es necesario particularizar cada utilización del agua para decidir la calidad que se requiere y su volumen.
 5. El agua debe verse vinculada a los consumos de energía, ya que un aumento de su consumo o un mal tratamiento o utilización de ésta son responsables de un aumento considerable de los gastos energéticos de las empresas.
 6. Identificar los puntos que signifiquen ahorros inmediatos con pequeñas inversiones.
 7. Localizar posibles ahorros de mayor cuantía que requieran inversiones y evaluar su rentabilidad.
 8. Crear una cultura y educación empresarial sobre la necesidad del uso racional del agua y evitar su contaminación con residuales de diferentes tipos.
- En el presente trabajo se pretende recopilar la experiencia en la aplicación de planes de gestión de agua en más de quince empresas de producción y servicio a partir de una metodología elaborada por el Centro de Estudios de Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos, centrando sus objetivos fundamentales en las medidas para el control y uso racional de este

recurso y su relación con la disminución de la eficiencia energética de las empresas investigadas. El tema de la gestión de los residuales líquidos y su correcta depuración, aunque forma parte importante de la gestión del agua, no es tratado en el trabajo por merecer un estudio aparte por su complejidad.

Propuesta de metodología para la gestión de agua en empresas de producción y servicio. La gestión del agua debe tener un punto de vista global que considere el ciclo del agua en la industria: abastecimiento, proceso productivo y depuración.

Abastecimiento. La gestión de abastecimiento tiene por objeto garantizar la cantidad y calidad del agua destinada a cada uso específico de la industria y los servicios. Otro objetivo es definir los tratamientos previos requeridos y los costos que ellos implican.

Proceso productivo. La gestión del proceso productivo está orientada a la optimización del uso del agua como medida de la reducción del volumen y minimización de los elementos contaminantes.

Para lograr esto es necesario un profundo conocimiento del proceso productivo y de las operaciones auxiliares relacionadas ambas con la utilización del agua.

Depuración. La gestión de la depuración ha de garantizar la adecuación del efluente a la normativa vigente, maximizar la protección del medio hídrico y minimizar la inversión y el costo de explotación de las plantas de depuración.

La metodología utilizada es un proceso continuo que consta de diferentes pasos:

Diagnóstico

El diagnóstico o auditoría inicial brindará una información de los usos del agua, su cantidad y calidad y determinará dónde se centran los principales potenciales económicos y ambientales para una buena gestión de agua. En el análisis siempre debe estar presente el personal del Centro, pues conoce la tecnología y las instalaciones de producción o servicio, aunque se considera aconsejable la utilización de personal especializado junto al personal del Centro, ya que éste puede aportar una visión crítica, sin prejuicios creados que garanticen objetividad e imparcialidad. Las principales etapas son:

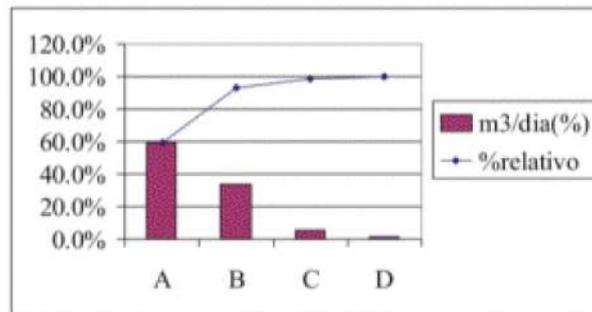
- Recolección de datos base, tales como cantidad y calidad del agua consumida en los distintos procesos, evaluación técnico-económica de la eficiencia (incluyendo la energética) de los sistemas de agua, costo de los tratamientos, etcétera.
- Identificación de lagunas de datos.
- Desarrollo de balance de materia y energía.
- Tabulación de los datos.

Para la realización de estos balances se utilizan herramientas generales y herramientas específicas para los sistemas que contienen las empresas auditadas.

Herramientas generales

Diagrama de Pareto, gastos de agua e insumos energéticos asociados a su uso

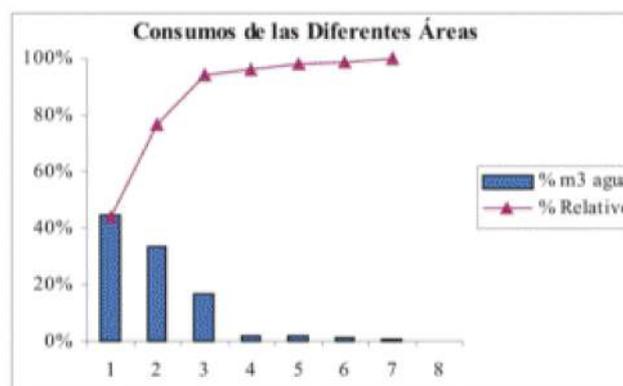
Esta herramienta se seleccionó porque permite observar de forma muy clara dónde se encuentran las potencialidades de ecoeficiencia y predice o determina la efectividad de una mejora. Está basado en el principio de los pocos vitales y muchos útiles; o sea, que permitirá conocer cuáles de 20 % de las causas producen 80 % o más de los efectos.



Ejemplo de Diagrama de Pareto de consumos de agua de un hotel □

Parámetros		m³/día		% relativo	m³/día (%)
Módulo habitacional	A	160	A	0,596	59,6
Cocina-restaurantes	B	90	B	0,931	33,5
Otros	C	14,5	C	0,985	5,4
Sistema tratamiento agua	D	4	D	1	1,5

Del análisis de este diagrama podemos decir que en los módulos habitacionales y la cocina se centra 93 % de los consumos de agua, por lo tanto tienen la mayor prioridad de estudio.

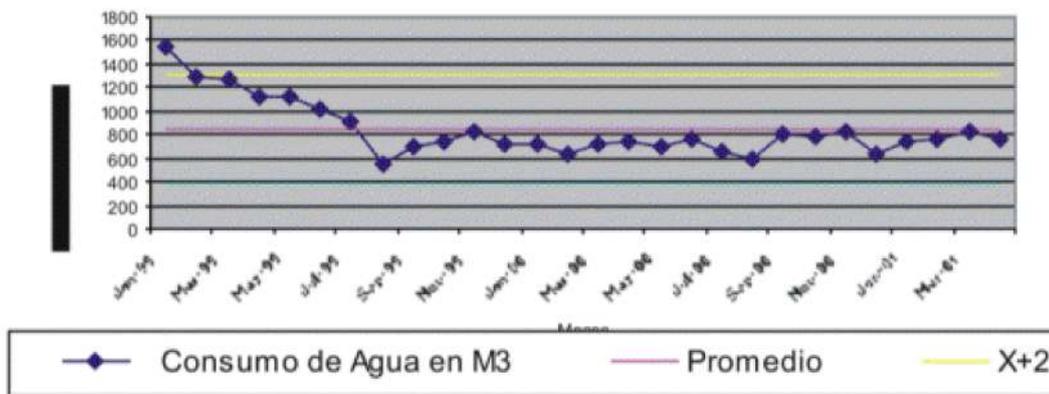


Ejemplo de diagrama de Pareto para consumo de agua de una empresa farmacéutica.

En el análisis de este diagrama podemos ver cómo más de 94 % de los consumos del Centro se concentran en tres áreas fundamentales, que son los edificios de investigación-producción (44 %), el área de los peces (33 %) y el área de generación de vapor con sus subsistemas asociados (16,7 %), lo que implica concentrar la mayor atención de la gestión de agua en estos lugares.

Diagramas de control para los consumos de agua y energía asociada

Los gráficos de control de parámetro son diagramas lineales que dan la posibilidad de observar el comportamiento del parámetro seleccionado, lo que facilita determinar si el parámetro está en control. Esto nos permite conocer los límites en que se puede considerar una variable, identificar comportamientos no aleatorios que influyen en la ecoeficiencia y conocer la influencia de acciones correctivas ejecutadas.

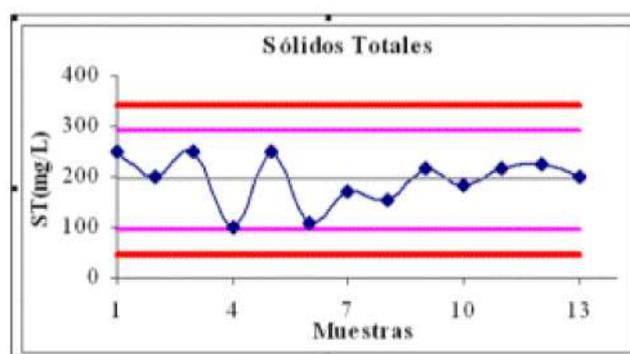


Ejemplo de diagrama de control de consumos de agua de una universidad.

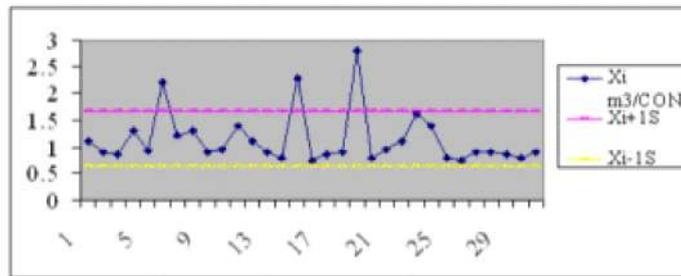
Del análisis del gráfico podemos decir:

- No existen aproximaciones al límite.
- Existe una seguidilla de puntos desde el mes de enero de 1999 hasta agosto del mismo año, en la cual la disminución de los consumos fue drástica.

- A partir de agosto de 1999 hay una secuencia marcada, la cual se debe a la influencia de los períodos de mayor presencia de estudiantes en la variable estudiada.



Ejemplo de diagrama de control del comportamiento de la conductividad en el agua de entrada de un papelera.



Ejemplo de gráfico de control de los m³/HNO de agua en un hotel.

Del análisis del gráfico podemos ver cómo en varios meses el consumo de agua por HNO fue mayor que lo normal, y se buscaron las causas.

Diagrama causa-efecto o diagrama de Ishikawa

Esta herramienta representa de una forma ordenada todos los factores causales que pueden originar un efecto específico; deben realizarse los cinco pasos requeridos para el análisis de las causas:

- Definir el efecto. Éste debe ser claro, preciso y medible.
- Identificar las causas. Mediante una tormenta de ideas con el personal que puede aportarlas y brindar información.
- Definir las principales familias de causas. Agrupar las causas y subcausas.
- Trazar el diagrama. Se traza la línea central y las que representan las causas principales.

Se aportan ideas alrededor de cada causa principal.

- Seleccionar la causa. Concluido el diagrama se obtienen todas las posibles causas y mediante una selección ponderada se determinan las de mayor importancia.



Ejemplo de diagrama causa-efecto de una industria farmacéutica.

Ejemplo de diagrama efecto de índice de consumo de agua; m³ agua/CNO.



Ejemplo de diagrama efecto de índice de consumo de agua: m³ agua/CNO.

Diagrama de correlación entre dos parámetros

Su objetivo es mostrar la correlación entre dos parámetros y si existe su carácter. Es de gran utilidad para definir si son válidos los indicadores de control o buscar nuevos y la influencia de distintos factores en los consumos de agua y electricidad.

Balance de agua y energía

Esta herramienta es fundamental en las etapas de diagnóstico, compatibilización y contabilización y sus resultados son fundamentales en el análisis de datos, en cualquier sistema de gestión de agua. Al final del balance usted debe ser capaz de responder:

- Cuánta agua y energía asociada usamos.
- Cuáles son sus costos.
- Qué cantidad se desperdicia y qué contaminación producen y de dónde provienen.

Es frecuente la falta de algunos datos para completar el balance, lo que hace necesario su cálculo por alguna vía. También pueden, si es necesario, utilizar otras herramientas generales, como son diagrama índice de consumo contra producción, gráfico de tendencias o sumas acumulativas, gráficos de estratificación, etcétera.

Herramientas específicas

Para algunos sistemas se hace necesario utilizar determinadas herramientas específicas, entre las que se encuentran: sistemas de bombeo y distribución de agua, sistemas de generadores de vapor y sistemas de enfriamiento.

Sistemas de bombeo y distribución de agua

- Valorar las mejoras que reducen el consumo de agua y el uso de energía asociada.
- Dimensionamiento correcto del sistema.
- Selección adecuada de la bomba.

- Selección adecuada del motor.
- Determinación del diámetro óptimo de la tubería.
- Control de los salideros.
- Adecuación del funcionamiento al punto óptimo (máximo rendimiento).
- Acoplamiento de bombas en serie y en paralelo.
- Utilización de motores para dos velocidades.
- Funcionamiento a flujo constante con depósito de acumulación.
- Desplazamiento de las horas de funcionamiento.
- Valorar mejoras que abaraten el costo de bombeo.
- Determinación de la potencia eléctrica adecuada.
- Selección de la tarifa eléctrica óptima.
- Mejora del factor de potencia.
- Minimizar los consumos en horario pico.
- Redimensionamiento de los depósitos.

Sistema de generadores de vapor

- Valorar el tratamiento externo del agua.
- Cumplimiento de los parámetros de calidad del agua a la salida y entrada de la planta de tratamiento externo.
- Control de índices de consumo específico de productos químicos para el tratamiento.
- Control de consumo específico de los equipos de tratamiento de agua.
- Comparación de la capacidad útil de las resinas utilizadas en relación con su valor inicial.
- Nivel cultural de los operadores de tratamiento de agua.
- Control de la calidad del agua durante los procesos de tratamiento.
- Cumplimiento de los planes de mantenimiento y operación de la planta.
- Valorar el tratamiento interno del agua.
- Cumplimiento de los parámetros de calidad del tratamiento interno del agua.
- Cumplimiento del plan adecuado de purgas de la caldera.
- Evaluación de salideros dentro del generador de vapor.
- Funcionamiento y mantenimiento adecuado del sistema de aeración.
- Aprovechamiento de todos los condensados posibles y de no hacerlo saber sus causas.
- Limpieza química de calderas cuando éstas no cumplan los parámetros de incrustación establecidos.

Sistemas de enfriamiento

Aunque las medidas dependen del tipo de sistema utilizado, entre las más comunes se encuentran:

- Selección adecuada del sistema de enfriamiento según la utilización.
- Método adecuado para determinar económicamente el momento óptimo de la limpieza.
- Dosificación adecuada de tratamientos para evitar incrustaciones, corrosión y crecimientos biológicos.
- Método adecuado para controlar las tendencias de incrustantes o corrosivos del sistema.
- Control de las purgas necesarias de los sistemas que eviten corrosión, erosión e incrustaciones o pérdidas de agua y calor.

- Recuperar el agua de las purgas por métodos de filtración, clarificación u otros y reincorporarlas al sistema.
- Evitar y eliminar periódicamente las incrustaciones en los intercambiadores de calor.

Procesos de producción y servicio

- Valorar toda el agua que sea posible de reciclar o recuperar.
- Instalación de equipos o recipientes para recuperar derrames o exceso de caudal.
- Segregación de fuentes de agua.
- Reducción en origen de consumos en procesos, servicios o productos.
- Limpiezas de agua a presión en lugar de tanques de inmersión.
- Instalación de sistemas de cierre automático, limitaciones de caudal, límites de descarga.

Evaluación y selección de técnicas

Una vez conocido los datos del diagnóstico se hace necesario evaluar éste por toda una serie de instrumentos que nos permitan determinar las prioridades a corto, mediano y largo plazos. Para ello se realizan los pasos siguientes:

- Evaluación de la importancia.
- Identificación de oportunidades.
- Evaluación técnica de soluciones.
- Evaluación económica de las mejores técnicamente.
- Elaboración de fichas alternativas.

Implantación y control de programa

Con los resultados de las evaluaciones se debe hacer un plan de implantación que conste dentro del plan general de la Empresa; éste debe contar con políticas, metas, tareas, responsables y fechas de cumplimiento y ser aprobado por el máximo nivel de la Empresa. Dentro de esta etapa es muy importante definir la obtención de los fondos para realizar las implantaciones.

Verificación de los resultados y medición de progreso

Se hace necesario un plan de seguimiento para el control de los resultados. Este plan de seguimiento debe contar con un plan de monitoreo de control que permita evaluar correctamente el programa.

Reevaluación de casos y nueva auditoría

El plan puede estar sometido periódicamente a revisiones, críticas y ajustes a partir de la experiencia práctica que se va obteniendo. En un período aceptable, que no debe ser mayor de tres años, se debe repetir el diagnóstico para, hacer del proceso de gestión un ciclo continuo de mejora.

Consideraciones generales sobre la problemática energética en las empresas de producción y servicio estudiadas

Aunque con diversos grados, fueron comunes en la mayoría de las empresas estudiadas las problemáticas siguientes:

Existen en todas las empresas potenciales de ahorro de agua y su energía asociada, los cuales se calcularon entre 5 y 20 % de los consumos de agua y 5 y 15 % de su energía asociada.

- Los controles de los consumos de agua en la mayoría de los casos son deficientes; entre las causas principales está la existencia de pocos medidores para contabilizar el agua por área, la no existencia o incorrecta aplicación de indicadores que relacionan este consumo con parámetros productivos, los bajos costos de agua en algunas empresas y la no existencia de chequeos periódicos ni gestión integrada de su uso.
- El control de la energía asociada al consumo de agua, aunque tiene mayor atención por parte de las empresas, es por lo regular el área menos estudiada y problemática, sobre todo en la pequeña y mediana empresa, dado el desconocimiento de los técnicos que atienden la actividad energética de esta materia.
- En el área de generación de vapor de la mayoría de las empresas se encuentran grandes potenciales de ahorro de agua y energía asociada, dado fundamentalmente por violaciones en tratamientos internos y externos de las calderas, deficientes mantenimientos y operación en las plantas de tratamiento, condensados y otras corrientes que no se recuperan, casi nula aplicación de lavados químicos a calderas, existencia de salideros de agua y vapor, y escasa cultura de los operadores de tratamiento de agua.
- En los distintos sistemas de enfriamiento existen también altos potenciales de agua y energía asociada dadas fundamentalmente por la falta de existencia de métodos adecuados para determinar el tiempo óptimo y la calidad de las limpiezas, violaciones en la dosificación de productos y el control de productos para evitar incrustaciones, corrosión o crecimientos biológicos, incorrecta aplicación del sistema de purgas.
- En los distintos procesos de producción o servicio los principales potenciales se encuentran en la posibilidad de reutilizar o reciclar muchas aguas, el poco conocimiento y acceso de nuevas tecnologías ahorradoras, la no segregación de fuentes y la existencia de salideros con deficiencias en los mantenimientos.
- La evaluación técnica y económica de mejoras en el plan de gestión de agua, dentro de las empresas presentan deficiencias fundamentalmente dadas por deficiente información técnica, no adecuadas valoraciones económicas, ambientales y sociales, poca comprensión del análisis de riegos, y bajos niveles de inversión en la materia. Existen pocos trabajos de investigación-desarrollo del ciclo de vida de productos y ecodiseños con relación al ahorro de agua por parte de universidades y centros de investigación.
- La motivación, concienciación, capacitación de la mayoría de los trabajadores de la Empresa con relación a la gestión integrada de agua es baja, siendo necesario su incremento en todas las formas de acuerdo con las características de la Empresa.

Condiciones necesarias en una empresa para aplicar la ecoeficiencia en materia de agua

- Voluntad expresa y demostrada de las administraciones para lograr los objetivos.
- Clara definición de qué se entiende por gestión integral del agua.
- Nivel de información sobre la gestión del conocimiento en materia de agua.

- Capacidad de identificar oportunidades y analizar viabilidades técnicas, económicas y ambientales.
- Existencia de instrumentos de planificación, control, organización y dirección de agua, residuales líquidos y su energía asociada.
- Nivel cultural en la materia, de todos, de acuerdo con sus necesidades.

Conclusiones

1. La única vía para lograr la ecoeficiencia de una empresa de producción o servicio en materia de agua, sus residuales y la energía asociada es mediante la aplicación de un sistema de gestión integrado por un paquete de procedimientos y herramientas técnicas organizativas que aplicadas de forma continua tienen como objetivo reducir los efectos ambientales y disminuir los costos económicos de la empresa.
2. Se aplicó una metodología de sistema de gestión de agua a quince empresas de producción y servicio en Cuba, que consta de diagnóstico, evaluación y selección de técnicas; implantación de programas de control, verificación de los resultados y medición del progreso, y reevaluación de casos y nueva auditoría, basada en las tendencias actuales de la gestión empresarial.
3. Para desarrollar esta metodología se utilizaron herramientas generales y específicas para los distintos sistemas. Se ejemplifican algunas metodologías generales y se proponen metodologías específicas en relación con el ahorro de agua y su energía asociada para diferentes sistemas en diversos sistemas.
4. Se demuestra la existencia de todas las empresas estudiadas de potenciales de ahorro de agua y la energía asociada, fundamentalmente a partir de la aplicación de medidas de planificación, control, organización, dirección y capacitación.
5. Se enuncian las principales barreras y condicionantes necesarias para aplicar la eficiente y eficaz gestión de agua en una empresa de producción y servicio en Cuba.

Bibliografía

- CASTRO DÍAZ-BALART, FIDEL. *Ciencia, innovación y futuro*. La Habana: Ediciones Especiales, 2001.
- CENTRO DE ESTUDIOS DE ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE. *Gestión energética empresarial*. Cienfuegos: Ed. Universidad de Cienfuegos, 2002.
- CONAE. *Agua: Su relación con la energía y medio ambiente*. México, 1999.
- FREEMAN HARRY, M. *Manual de prevención de la contaminación*. México: Ed. McGraw-Hill, 2000.
- JUNTA DE ANDALUCÍA. *Río + 10*. Ed. Consejería de Medio Ambiente. 2003.
- LÓPEZ BASTIDA, E. *Instrumentos de gestión ambiental*. Cienfuegos: Ed. Universidad de Cienfuegos, Cuba, 2002.
- . «La ecoeficiencia en las empresas de producción y servicio en América Latina». *Memorias de la III Convención Medio Ambiente Siglo XXI*. Villa Clara: Universidad Central de Las Villas, nov., 2003.
- LÓPEZ BASTIDA, E. Y FRANCISCO MARTÍN F. *Tratamiento de agua para manejo integral de zonas costeras y la energética*. Cienfuegos: Ed. Universidad de Cienfuegos, 2003.
- PNUD. «La energía después de Río: Perspectivas y retos». Naciones Unidas, 1999.
- RIGOLA, M. *Las producciones más limpias*. España: Ed. Universidad de Girona, 2000.

Horas-grado, un criterio realista para caracterizar climatológicamente una región con propósitos de uso eficiente y ahorro de energía eléctrica

Hour-Degree, a Realistic Opinion to Characterize A Region Aimed at Achieving An Efficient Use of Energy and Power Saving from a Climatological Standpoint

*Carlos Pérez Tello
Héctor E. Campbell R.
Instituto de Ingeniería, Universidad Autónoma de Baja California, México.
Aníbal Borroto Nordelo
José Monteagudo Yanes
Centro de Estudios en Energía y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos, Cuba.
e-mail: cperez@iing.mxl.uabc.mx,
hecr@iing.mxl.uabc.mx,
aborroto@fmec.ucf.edu.cu,
jpmynes@fmec.ucf.edu.cu*

Resumen

Se presenta la descripción de una metodología generalizada para caracterizar el comportamiento climático de una región con propósitos de relacionar el clima al consumo y la demanda máxima de electricidad. La variable utilizada se denomina horas-grado y representa el efecto de la temperatura ambiente local, el tiempo de duración de dicha temperatura durante un período y su correlación con los requerimientos energéticos por climatización. Debido a la escasez de información de variables climatológicas horarias en países como México y Cuba, y en especial en zonas con climas cálidos y que requieren del uso intensivo de la climatización, se presentan los resultados obtenidos de correlacionar el consumo y demanda máxima de dos casos de estudio en edificios, uno en la ciudad de Mexicali, B. C. México y el segundo en la ciudad de Cienfuegos, Cuba.

Palabras clave: Eficiencia energética, medio ambiente, factores del clima, confort.

Abstract

This paper deals with the description of a generalized methodology to characterize the climatic behavior of a region, aimed at linking weather to consumption and to the highest power demand. The variable used is termed "hour-degree" and represents the effect of local environmental temperature, duration of this temperature for a certain period and its correlation with energy requirements by air-conditioning. Due to lack of information on hour-weather variables in countries as Mexico and Cuba and especially in areas of hot weather which require the intensive use of air-conditioning, data obtained are presented on the correlation in consumption with the highest power demand in

two study cases in buildings, one in the city of Mexicali, B.C. Mexico and the second in the city of Cienfuegos, Cuba.

Key words: Energy efficiency, environment, weather factors, comfort.

Introducción

Desconocer, o no conocer a fondo los patrones de consumo y demanda máxima de los diferentes sectores que emplean el fluido eléctrico, es siempre motivo de preocupación de las empresas suministradoras de energía eléctrica, así como de los propios usuarios.

Esta situación conlleva la necesidad de realizar estudios, con diferentes niveles de detalle de diagnóstico y evaluación de factores, variables, comportamientos característicos que permitan establecer escenarios y potenciales medidas de ahorro

y eficiencia energética. Finalmente, los resultados esperados de este tipo de acciones deben reflejarse no sólo en energía ahorrada, disminución de demanda o ahorro en facturación, sino también, y de gran importancia, en el nivel de calidad de vida de los beneficiarios, traducido esto como el incremento en oportunidades de acceso a los satisfactores básicos, al mejor aprovechamiento de los recursos, al mayor poder adquisitivo y de aprovechamiento de la energía disponible, a hacer más limpio el ambiente por las mayores eficiencias de conversión, y al desarrollo sustentable.

Conocer a fondo los factores y variables que inciden en el consumo mensual de electricidad y la demanda máxima, y por ende, la facturación esperada a fin de mes por estos conceptos, ha sido motivo de preocupaciones y de estudios con diferente grado de profundidad. Generalmente se recurre a las técnicas de gestión energética que involucran una etapa de diagnóstico en la que se revisan todas aquellas variables que se consideran importantes, una etapa de inventario de posibles efectos y sus relaciones con tales variables, los registros históricos de consumo y demanda máxima, el análisis de estos comportamientos y el planteamiento de posibles medidas.

En ocasiones es posible recurrir a la simulación numérica, lo cual ya implica un mayor nivel de capacidad en el manejo de información y de sistematización. Sin embargo, todo ello involucra diversos grados de complejidad en la utilización de dicha información, y especialmente en los resultados y recomendaciones que de ella se obtengan.

Las preguntas principales en todos los casos van generalmente orientadas en el siguiente tenor: ¿Cuál es la influencia real del clima en el consumo y demanda eléctricas de un sistema?; ¿cómo pueden relacionarse éstas?; ¿es posible comparar una región con otra climatológicamente y relacionarlas con las necesidades energéticas?; ¿cuáles son los principales factores del clima que afectan y cómo impactan de manera individual en el comportamiento energético de un sector o un sistema?; ¿cuáles son los requerimientos reales de climatización y cuáles las mejores medidas de ahorro y uso eficiente de la

energía?; ¿cómo afectan el medio ambiente y cuál es el impacto social y económico sobre la población?; ¿cuáles son los beneficios esperados?

Las respuestas no siempre están asequibles de manera sencilla, y en este sentido, en el Área de Sistemas Energéticos del Instituto de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) se ha venido desarrollando el empleo del criterio de horas-grado buscando una forma simple de relacionar el impacto del clima de una región con las respuestas a las preguntas planteadas anteriormente, aplicándola a los sectores residencial, público y de servicios de Mexicali. Asimismo, recientemente se ha iniciado su aplicación al sector turístico de Cuba en colaboración con el Centro de Estudios en Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos, en especial dirigido al rubro hotelero, donde los requerimientos de climatización son importantes.

Horas-grado

La temperatura ambiente de una región se registra de manera horaria durante un determinado tiempo. Mientras más se aleje dicha temperatura de las condiciones de confort, mayor es la necesidad de climatización de un espacio, y esto puede ocurrir tanto en un sentido o en otro, es decir, puede requerirse enfriamiento en climas cálidos o calefacción en climas fríos.

Por tanto, las horas-grado reflejan no sólo el alejamiento de las condiciones de confort, sino también el tiempo que cada nivel de temperatura permanece en el ambiente. De manera formal, las horas-grado se definen como:

$$HG = \int_{T_{ref}}^{T_{ext}} \int_{t=1}^{24} T(t) dt dT \quad (1)$$

donde T_{ref} y T_{ext} son la temperatura de referencia o de confort, y la temperatura ambiente exterior, respectivamente. La integración se efectúa para cada día por lo que el intervalo del tiempo es de la hora 1 a la 24 en intervalos de 1 hora. En la figura 1 se muestra el concepto de horas-grado en forma gráfica, en el que TH y TL definen las temperaturas límite consideradas de confort en verano e invierno, respectivamente.

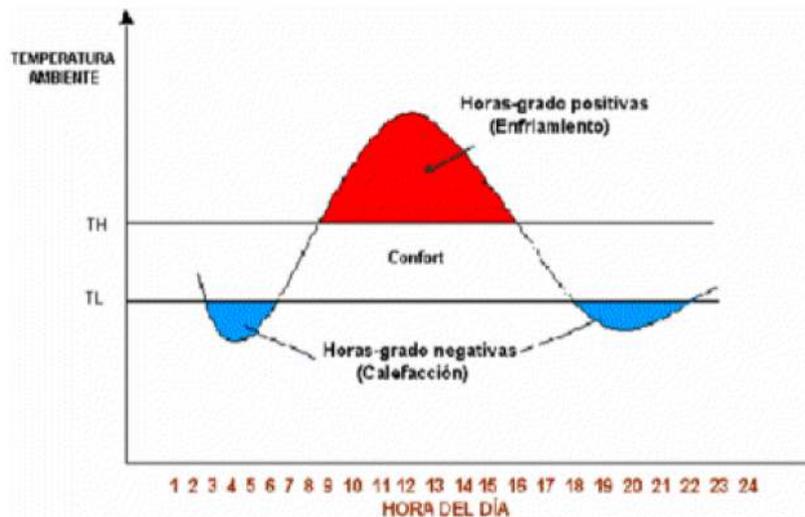


Fig. 1. Visualización gráfica del concepto de horas-grado.

Aplicación a casos de estudio

Los requerimientos de energía para climatizar un espacio son entonces función de la temperatura ambiente y su consecuente impacto sobre la potencia de enfriamiento o calefacción. Pero cada región particular presenta características propias; así, por ejemplo, en Mexicali, Baja California, durante el verano la variación de temperatura puede ser bastante drástica, un día cualquiera puede alcanzar una temperatura ambiente máxima de 48 °C y una mínima de 30 °C; esto es, una variación de 18 °C el mismo día; como sea, ambas temperaturas se encuentran fuera de la zona de confort y la climatización es indispensable. Por su parte, en Cienfuegos ni las temperaturas ni la variación entre la máxima y la mínima alcanzan los niveles de Mexicali, pero sí se encuentran fuera de la zona considerada de confort en el día, aunque por la noche pueden alcanzarse condiciones confortables, lo que no ocurre en Mexicali.

Un problema particular que surge en estos casos es el de saber cuándo, en qué horario y de qué magnitud será la demanda máxima de electricidad. Junto a ello la siguiente pregunta que hay que responder es cuánto será el consumo eléctrico asociado al efecto del clima, cómo puede cuantificarse éste sin necesidad de costosas mediciones y, en especial, cómo puede predecirse el comportamiento de consumo y demanda eléctricas atribuibles al clima, cuando se incorporen elementos pasivos en los sistemas constructivos, cuando se tomen acciones de ahorro energético o cuando se analice el efecto de una variación en eficiencia energética de los equipos de climatización.

Caso 1. Edificio de una central telefónica en Mexicali

Para el análisis del comportamiento energético de un edificio de una empresa telefónica de la ciudad de Mexicali, B.C. se utilizó el concepto de horas-grado para relacionar el consumo y la demanda máxima eléctrica con el efecto del clima. El edificio se encuentra climatizado en su totalidad y además hay ciertas áreas que son críticas respecto a la temperatura que debe mantenerse para el mantenimiento de la operación apropiada de los equipos de telefonía.

En las figuras 2 y 3 se muestran la demanda máxima y el consumo mensuales calculados a partir de la correlación con horas-grado y los valores reales

medidos en el edificio. Esto permitió estimar potenciales de ahorro mensual y anual, así como el costo e impacto de acciones de ahorro de energía. El estudio se realizó durante 1995 [Campbell, et al., 1995] y se efectuaron acciones que consistieron en aislamiento térmico en las caras este y oeste del edificio, cambio de luminarias y optimización de la operación del edificio. Los datos reportados en estas figuras, a partir de marzo de 1996, corresponden al edificio una vez aislado y puesta en marcha de las medidas de ahorro recomendadas. Para el consumo mensual, las desviaciones observadas máximas fueron de 20 % en los meses de diciembre a abril cuando el edificio no contaba con medidas de ahorro. Sin embargo, el promedio de desviación para los meses sin medidas de ahorro (14 meses) fue de 6 %. La desviación promedio de los meses posteriores fue de 2 %.

En el caso de la demanda máxima, la desviación máxima mensual observada fue de 20 % en un solo mes (octubre). La desviación promedio sin medidas de ahorro fue de 2 %, y la promedio de todo el período, de 1 %. Lo que indican los resultados anteriores es que el criterio de horas-grado puede emplearse de manera confiable para estimar consumos y demanda máxima anualizados y con una aproximación que puede variar hasta en 20 % en la estimación mensual.

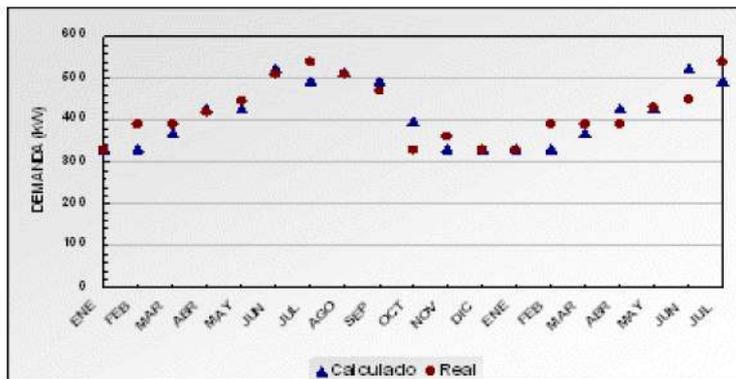


Fig. 2. Demanda máxima mensual calculada vs. real con el criterio de horas-grado.

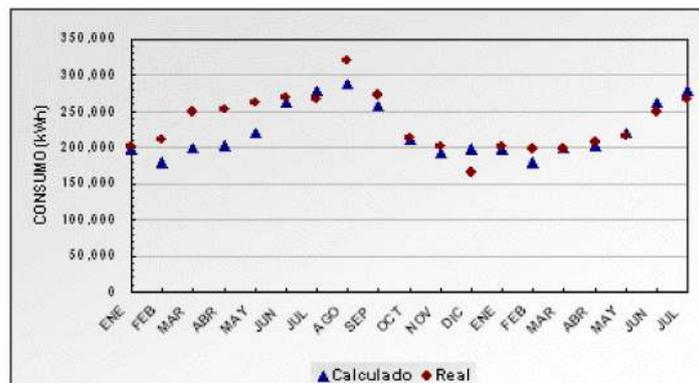


Fig. 3. Consumo mensual calculado vs. real con el criterio de horas-grado.

Al edificio anterior se incorporó un edificio anexo, lo que representó una demanda adicional del orden de 12 %, el cual se contabiliza en el mismo medidor. Por esa razón, los resultados pueden resultar afectados; no obstante, los valores calculados y los reales no difieren grandemente y se cumplieron las predicciones de ahorro pronosticadas originalmente y que fue del orden de 11 % en consumo anual.

Caso 2. Hotel La Unión, Cienfuegos

En Cuba el sector turístico, y en especial el hotelero, representa uno de los rubros importantes de generación de divisas, pero al mismo tiempo y debido a las características climáticas del país, el aspecto de climatización es uno de los principales factores de consumo eléctrico. Una de las prioridades en este sector es la de aprovechar lo más eficientemente la energía eléctrica disponible. Recientemente, y como resultado de la colaboración entre el Área de Sistemas Energéticos de la UABC y el Centro de Estudios en Energía y Medio Ambiente de la Universidad de Cienfuegos, se ha incorporado el criterio de horas-grado en el análisis de su comportamiento energético a fin de establecer índices que permitan plantear las bases de los programas de eficientización, así como de planeación y gestión energética.

Como caso ejemplo se muestra el del hotel La Unión de la ciudad de Cienfuegos. Los registros históricos indican que la climatización del edificio representa aproximadamente 60 % del consumo de electricidad en el período de verano. Actualmente se ha venido empleando como indicador de uso de la energía eléctrica el término de consumo por habitación/día ocupada equivalente (HDOeq.). Esto es, se ha buscado correlacionar el consumo total del edificio con respecto al número de habitaciones ocupadas por día, ponderando aquellos factores que marcan diferencias entre habitaciones del mismo edificio, por otras cargas no asociadas con las habitaciones ocupadas, etcétera.

Sin embargo, este índice no ha mostrado todavía un grado de correlación aceptable y se ha revelado no ser mayor a 60 %. Por esta razón, se decidió incorporar el criterio de horas-grado en el índice HDOeq. Para ello se hace la consideración de que este índice depende no sólo de la ocupación del hotel, sino también del efecto del clima; es decir, separar el consumo eléctrico por causa atribuible a los hábitos de los huéspedes y personal del edificio, del clima por sí mismo.

Con el criterio de horas-grado es posible determinar si un mes fue más (o menos) caluroso que en otra ciudad o que en otro año y cuánta energía se requiere por climatización en base a una temperatura de referencia considerada de confort. Además, se ha encontrado que el impacto de la humedad relativa no va más allá de 5 a 10 % con respecto al efecto de la temperatura ambiente para sistemas climatizados, a menos que exista una infiltración extremadamente alta, lo cual no sucede en edificios como los analizados.

De esta manera, el índice HDOeq. puede ser corregido utilizando un factor debido al efecto del clima y obtenido del criterio de horas-grado haciendo uso de un modelo de Fourier a partir de registros de temperatura ambiente máxima y mínima diarias [Pérez, *et al.*, 1996]. Los parámetros del modelo se calcularon de información de temperatura ambiente horaria registrada en la terraza del hotel desde abril a junio de 2001. En la figura 4 se muestra la correlación obtenida de consumo eléctrico mensual contra horas-grado para el período de verano comprendido de mayo a octubre en Cienfuegos.

El coeficiente de regresión para estos seis meses es de 0,89, lo cual constituye una mejora sustancial con respecto a los índices manejados anteriormente. A partir de estos datos se obtiene un factor de corrección Ft que permite establecer la relación entre HDOeq. y el consumo mensual del hotel. Esto se muestra en la figura 5. El grado de correlación ($R^2 = 0,74$) aún puede considerarse satisfactorio dado el índice anterior, que no rebasó 50 %.

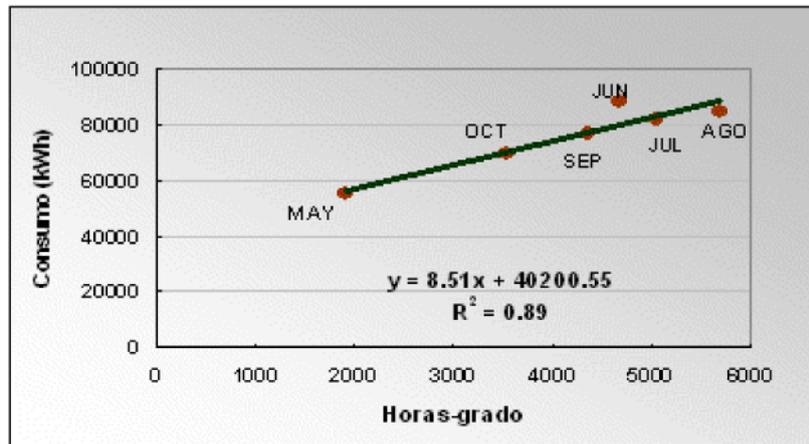


Fig. 4. Consumo mensual en meses de verano vs. horas-grado.

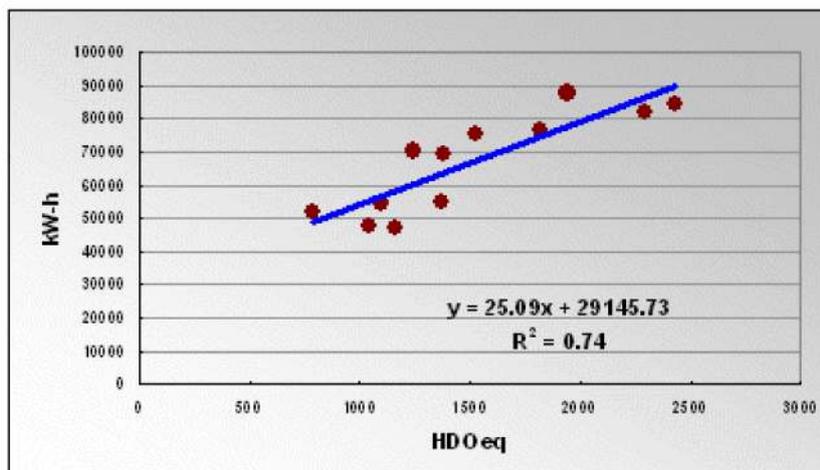


Fig. 5. Consumo mensual vs. habitación día ocupado equivalente. Hotel La Unión, 2001.

En la figura 6 se muestran los consumos mensuales reales y los calculados mediante la correlación con el índice HDOeq. corregido por horas-grado. La desviación máxima se observa en el mes de diciembre y fue de 24 %. Sin embargo, el resto de los meses la desviación es menor y el valor promedio anual de ésta es del orden de 1 %. Esto indica que, a pesar de las variaciones, que son normales por los comportamientos puntuales en cada mes particular, en forma anualizada (anualizada) la predicción es excelente. Estos valores concuerdan en los órdenes de magnitud y en el comportamiento observado en el edificio de telefonía presentado anteriormente, en el cual las desviaciones máximas mensuales fueron de 20 % y el promedio anualizado fue de 2 %. Esto indica la robustez de la metodología de horas-grado para caracterización del comportamiento energético de edificios donde la climatización es importante.

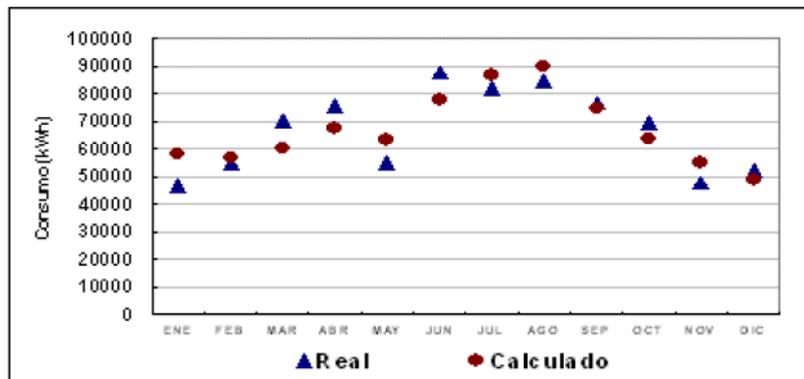


Fig. 6. Consumo real y calculado mensual a partir de la correlación con horas-grado. Hotel La Unión, Cienfuegos.

Conclusiones

Los resultados presentados permiten concluir que la metodología basada en el criterio de horas-grado para caracterizar el comportamiento energético en edificios donde la climatización representa una buena parte del consumo y demanda eléctrica, produce resultados más confiables que los índices tradicionalmente aceptados, como son el de habitación/día ocupada o índices mensuales por unidad de área, etc. Se concluye asimismo que donde el efecto del clima es importante, este criterio permite explicar más de 80 % de la variación de los índices y comportamiento energético, pues es el factor determinante en consumo y demanda.

Ha mostrado ser un método robusto y simple, ya que se requiere contar con registros de temperatura ambiente horaria, y máxima y mínima, el historial de consumo y demanda del edificio y, si se cuenta con la tipología y características de operación del edificio, pueden establecerse escenarios basados en criterios de gestión energética, así como la planeación a futuro garantizando el mejor aprovechamiento de los recursos tanto energéticos como financieros. Con la aplicación de esta metodología es posible evaluar acciones, planes, estrategias y metas de uso racional y eficiente de la energía en prácticamente cualquier sistema que tenga que ver con acondicionamiento ambiental y confort. Ha mostrado también que es aplicable a diferentes regiones y que los resultados producidos son consistentes y reproducibles.

Bibliografía

1. CAMPBELL, R. H. E.; T. C. PÉREZ, L. N. VELÁZQUEZ, M. J. GARCÍA E I. R. RAMOS. «Estudio técnico-económico del envolvente del Edificio Árbol-3 de Telnor». Reporte Técnico, 1995.
2. PÉREZ, T. C.; R. H. E. CAMPBELL, L. N. VELÁZQUEZ Y M. J. GARCÍA. «Modelamiento de temperatura ambiental en Mexicali, B.C. para su utilización en diagnósticos energéticos». XVII Encuentro Nacional de la AMIDIQ, 1996.

Dispersión local de contaminantes atmosféricos con los modelos de Berlyand e ISCST

Local Dispersion of Atmospheric Contaminants with Berlyand and ISCST

*Leonor Turtós Carbonell
CUBAENERGÍA, Calle 20 No. 4111 e/ 18-A y 47, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba.
Tel.: 2027527. Fax: 2041188
e-mail: leonort@cubaenergia.cu
Alfredo Roque Rodríguez
Instituto de Meteorología.*

Resumen

El trabajo consiste en la comparación detallada de los resultados (concentraciones de contaminantes en el aire ambiente), obtenidos al modelar la dispersión local de contaminantes atmosféricos con las versiones del modelo de Berlyand para 24 horas y el modelo ISCST3, usando opciones similares. También se presenta una comparación preliminar entre el modelo de Berlyand y el SCREEN3. Estas comparaciones tienen el objetivo de determinar qué modelos proponer como de uso regulatorio en el país para estudios detallados y de sondeo de dispersión local de contaminantes atmosféricos.

Palabras clave: contaminantes atmosféricos, dispersión local

Abstract

This paper contains a detailed comparison between the results (air pollution concentrations), obtained to model local pollutants dispersion, using around-the-clock Berlyand model and that of ISCST3, by means of comparable options. A preliminary comparison between Berlyand and SCREEN3 models is also presented. Both comparisons are aimed at determining which models should be chosen for regulatory use in Cuba for detailed studies and for local dispersion screening of atmospheric contaminants.

Keywords: atmospheric pollutants, local dispersion

Introducción

Uno de los criterios fundamentales que determinan el impacto ambiental de cualquier centro industrial u otra fuente de contaminación es la afectación que este centro provoca en la calidad del aire en sus alrededores (impacto local). Esta afectación puede ser determinada a través de mediciones de la concentración de los contaminantes emitidos en el aire o calculada usando una metodología previamente validada.

En determinadas condiciones sólo es posible determinar dicho impacto modelando la dispersión a escala local de los contaminantes y usando una metodología de cálculo apropiada; por ejemplo, cuando la fuente emisora en cuestión se localiza cerca de otras fuentes en una zona que no dispone de

estudios de las concentraciones de fondo, o durante etapas previas a la operación, cuando es preciso otorgarle la licencia ambiental.

La evaluación de la calidad del aire permite verificar el cumplimiento de las correspondientes normas de calidad del aire, responsables del control de la contaminación atmosférica. Aun cuando un centro industrial haya sido diseñado o esté operando, cumpliendo las normas de emisión correspondiente (en caso de que dichas normas existan, que no es el caso de Cuba), es imprescindible una evaluación del aporte relativo del centro a la contaminación atmosférica.

Estas modelaciones pueden efectuarse mediante el uso de diferentes tipos de modelos. La *Norma Cubana de Calidad del Aire* recomienda usar el modelo de Berlyand para 20 min. Este modelo ha sido adaptado por autores cubanos para determinar también concentraciones promedio en 24 horas. Sin embargo, aun con estas modificaciones el modelo tiene múltiples limitaciones: es aplicable sólo a regiones llanas o ligeramente onduladas, además de no tener en cuenta algunos parámetros típicos de la capa fronteriza planetaria.

En el contexto internacional el modelo más usado para estos fines es el ISCST3, propuesto como regulatorio por la Agencia de Protección del Medio Ambiente de los Estados Unidos [EPA], el cual incorpora algunas de las últimas investigaciones en el campo de la parametrización de la capa fronteriza planetaria. Por tanto, el objetivo de este trabajo es realizar para nuestro país una comparación de ambos modelos mediante la estimación de las concentraciones de contaminantes atmosféricos emitidos por una fuente puntual. También se presenta una comparación preliminar entre el modelo de Berlyand y el SCREEN3.

Estas comparaciones tienen el objetivo de determinar qué modelos proponer como de uso regulatorio en el país para estudios detallados y de sondeo de dispersión local de contaminantes atmosféricos.

Selección y datos de la fuente

Todos los cálculos se realizaron para la Central Termoeléctrica de Santa Cruz del Norte. Esta planta fue seleccionada como foco emisor para el experimento de evaluación de los modelos por su cercanía a la Ciudad de la Habana, alta disponibilidad, existencia de una sola chimenea y ausencia de focos contaminantes cercanos.

Los datos principales de la planta aparecen en la tabla 1. Los receptores se ubicaron en una red polar de 16 rumbos (22,5; 45; 67,5...; 360) con paso de 1 km de 1 a 60 km, lo que hace un total de 960 receptores. Se usaron la serie de datos meteorológicos de la Estación de Casa Blanca de 1993 a 1995, pues en ese período se realizaron sondeos de aire, superiores. Estos permitieron combinar el Método de Holzworth con la parametrización de los datos de superficie para calcular la altura de la capa de mezcla, según la metodología descrita en Turtós, *et al.* [2003].

Tabla 1. Datos de la central termoeléctrica de Santa Cruz del Norte usados en los estudios

Características	Unidad	100 H
Combustible		Crudo
Capacidad Bruta	MWe	300
Factor de utilización de la potencia instalada	h/año	5 565
Emisiones		
SOx	ton./año	65 146,3
NOx	ton./año	3 620,3
Cenizas	ton./año	759,4
Velocidad de los gases de escape	m/s	12,7
Temperatura de los gases de escape	°C	150
Altura de la chimenea	m	180
Diámetro de la chimenea	m	6
Latitud	°	23,16
Longitud	°	81,95

Criterios para evaluar los modelos

La desviación fraccional se seleccionó como la medida básica para la comparación y evaluación de modelos porque tiene dos rasgos deseables. Primero, es simétrica y limitada –los valores de la desviación fraccional oscilan entre -2,0 (el extremo de sobrevaloración) y +2,0 (el extremo de subvaloración)–; segundo, es un número adimensional conveniente para comparar los resultados de estudios que involucran diferentes niveles de concentración o incluso distintos contaminantes, [EPA, 1992]. La expresión general para el cálculo de la desviación fraccional promedio (FB) se presenta en la expresión que se muestra a continuación, donde *CA* y *CB* son los promedios de los 25 valores más altos de las concentraciones calculados por los modelos que se comparan, en este caso A y B respectivamente:

$$FB = 2 \left[\frac{C_A - C_B}{C_A + C_B} \right]$$

Berlyand versus ISC

Como se describe en Turtós, et al. [2001], existen dos versiones para calcular las concentraciones promedio diarias usando el modelo de Berlyand; la versión de Rosendo Álvarez, la cual se identifica en este trabajo como A, y la de Orlando Álvarez, identificada como B. Las diferencias entre estas dos versiones están en el orden de 30 %. (La desviación fraccional promedio sobre 400 receptores es 0,26). La figura 1 muestra los resultados de ambas versiones en

dependencia de la distancia de la fuente (R) para cuatro direcciones del viento: Norte, Sur, Este y Oeste.

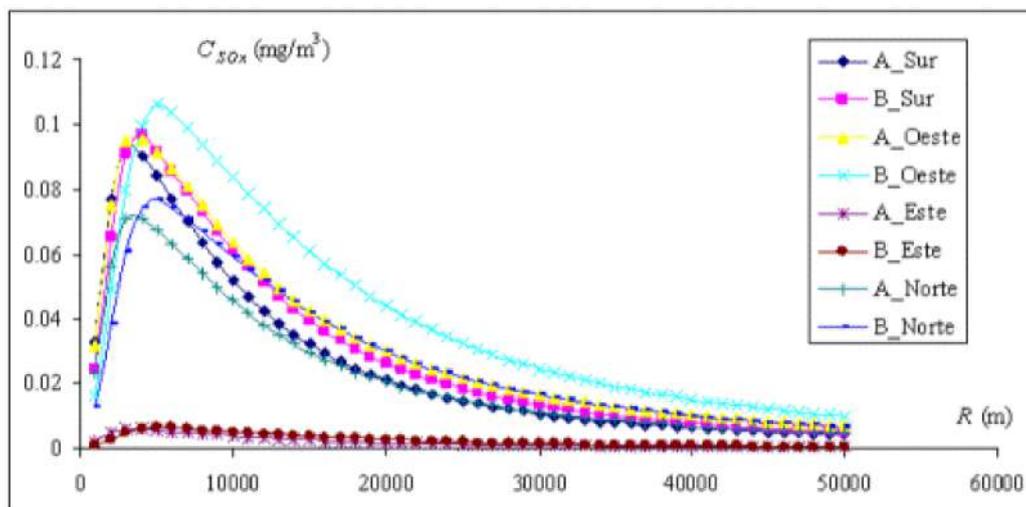


Fig. 1. Concentraciones promedio en 24 horas obtenidas con el modelo de Berlyand, Versiones A y B para diferentes direcciones del viento.

Se plantea en NC 39:1999 que el modelo de Berlyand calcula las concentraciones para condiciones meteorológicas desfavorables; por tanto, cabe esperar que las concentraciones en 24 horas obtenidas con el modelo de Berlyand estén en el orden de las concentraciones máximas en este intervalo obtenidas por el ISCST. Las concentraciones mínimas, máximas y promedios sobre todos los receptores considerados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones diarias (24 horas) mínimas, máximas y promedios sobre todos los receptores obtenidas con diferentes programas

	Berlyand_A	Berlyand_B	ISCST3
Concentración mínima $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0,27	0,39	4,1737
Concentración máxima, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	116,23	120,39	150,673
Concentración promedio, ? $\mu\text{g}/\text{m}^3$	13,9763	17,0869	23,7479

Realmente los valores antes mostrados indican que las concentraciones logradas con el ISCST superan a las obtenidas con Berlyand, pero no reflejan la contradicción fundamental entre los modelos: las diferencias obtenidas para cada receptor en particular, que provoca diferencias en la ubicación de los máximos y en el contorno de las isolíneas.

El modelo de Berlyand no calcula los promedios anuales. Para realizar las comparaciones sobre la base de estos valores se usó el factor de escala entre promedios diarios (24 horas) y anuales recomendados por la Guía para los Modelos de Calidad del Aire de la EPA [2003] para modelos de sondeo (1/5). El análisis de los resultados muestra una diferencia importante, tanto en los valores de las concentraciones como en su distribución.

Las isóneas de concentración resultantes del modelo de Berlyand son una réplica bastante aproximada de la rosa de los vientos mostrada en las figuras 2 y 3 (Figs. 4 y 5), mientras no ocurre lo mismo para el ISCST3 (Fig. 6). Para mostrar estas diferencias se escogieron los promedios anuales, pues las concentraciones máximas en 24 horas para cada receptor que se obtienen en el ISCST pueden ocurrir en días diferentes y por tanto no representan la situación de un día en específico.

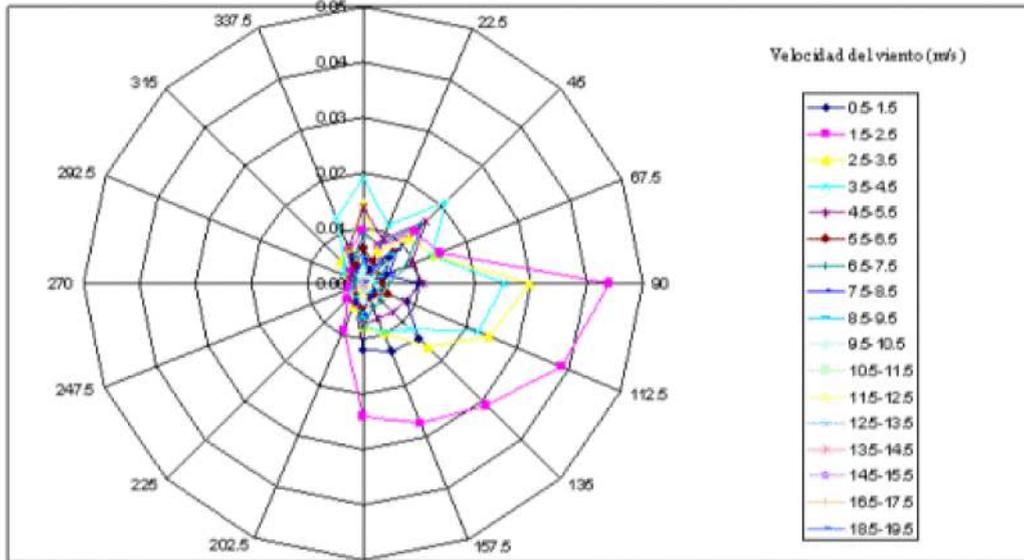


Fig. 2. Rosa de los vientos.

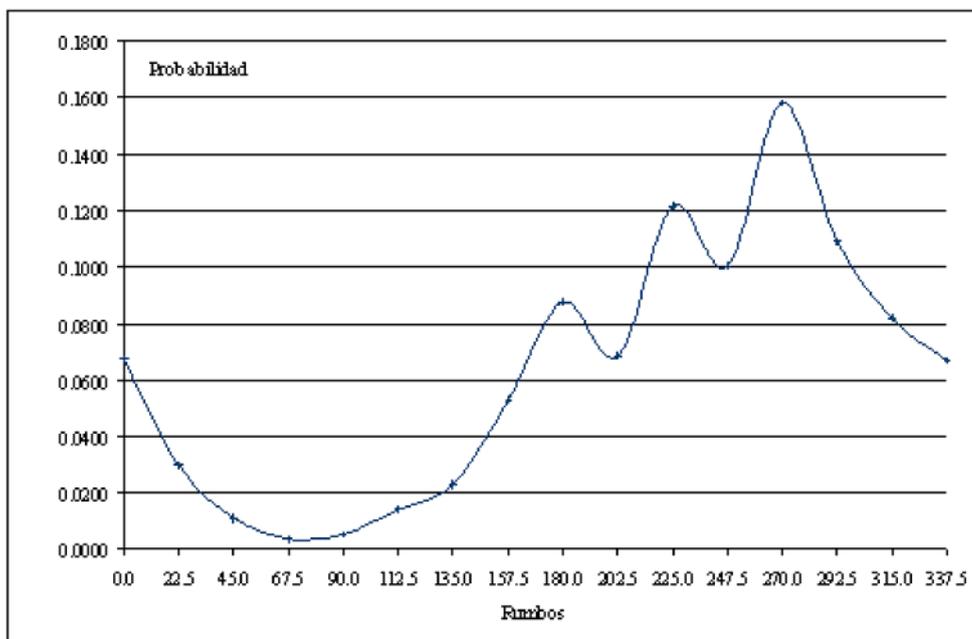


Fig. 3. Probabilidad total de cada rumbo.

De acuerdo con el modelo de Berlyand, aunque la concentración máxima se obtiene al SO, la mayor parte de los receptores con concentraciones elevadas se localizan al Oeste de la fuente. Este comportamiento se debe a que el

rumbo E es predominante para velocidades bajas, pero para altas velocidades su frecuencia disminuye drásticamente, siendo el rumbo NE el más frecuente. Se puede notar también que rumbos entre el N y ENE superan en frecuencia al E para estas velocidades. Según el ISCST3 la mayor parte de los receptores con concentraciones elevadas se localizan al Sur y al SO, a pesar de que la rosa de los vientos anual indica que el rumbo hacia el que los vientos soplan con una mayor probabilidad es el Oeste.

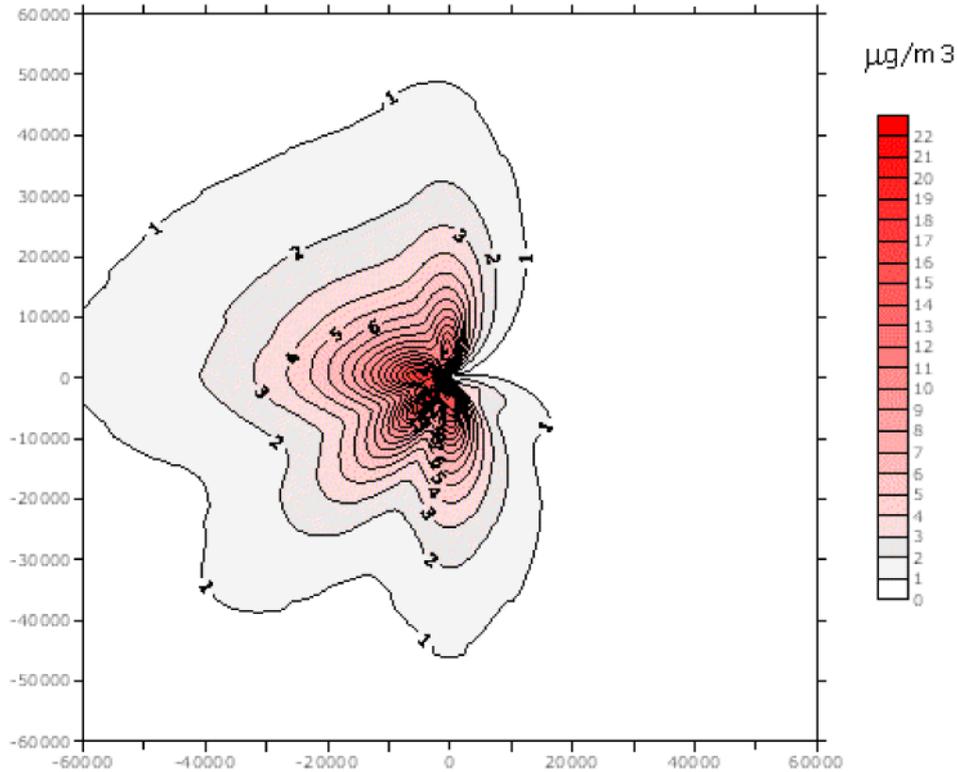


Fig. 4. Resultados de la modelación de la concentración de SOx en el aire con Berlyand versión A.

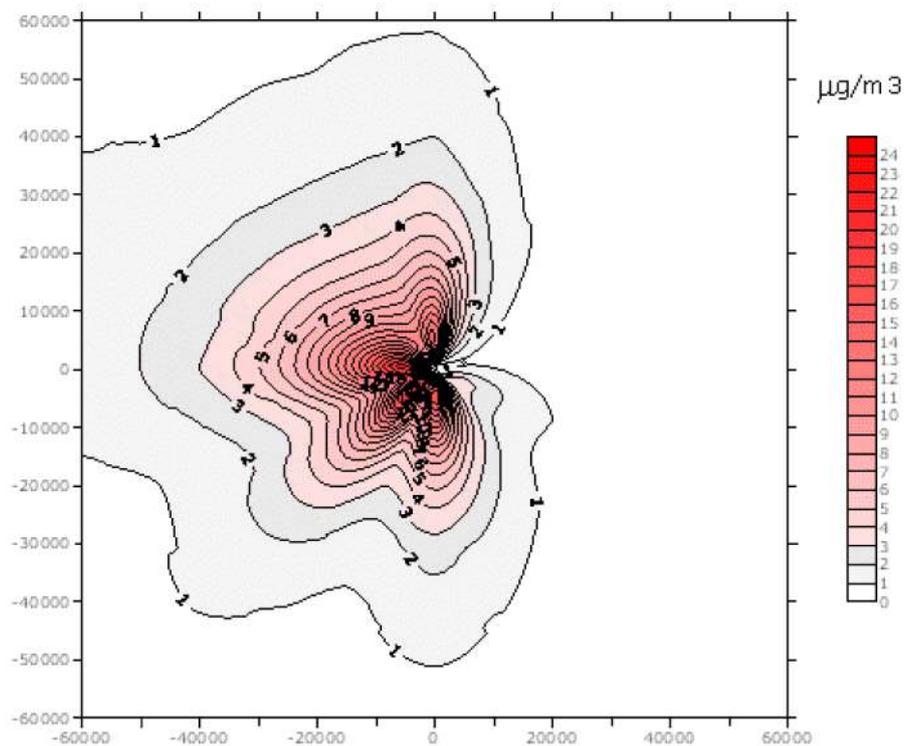


Fig. 5. Resultados de la modelación de la concentración de SOx en el aire con Berlyand versión B.

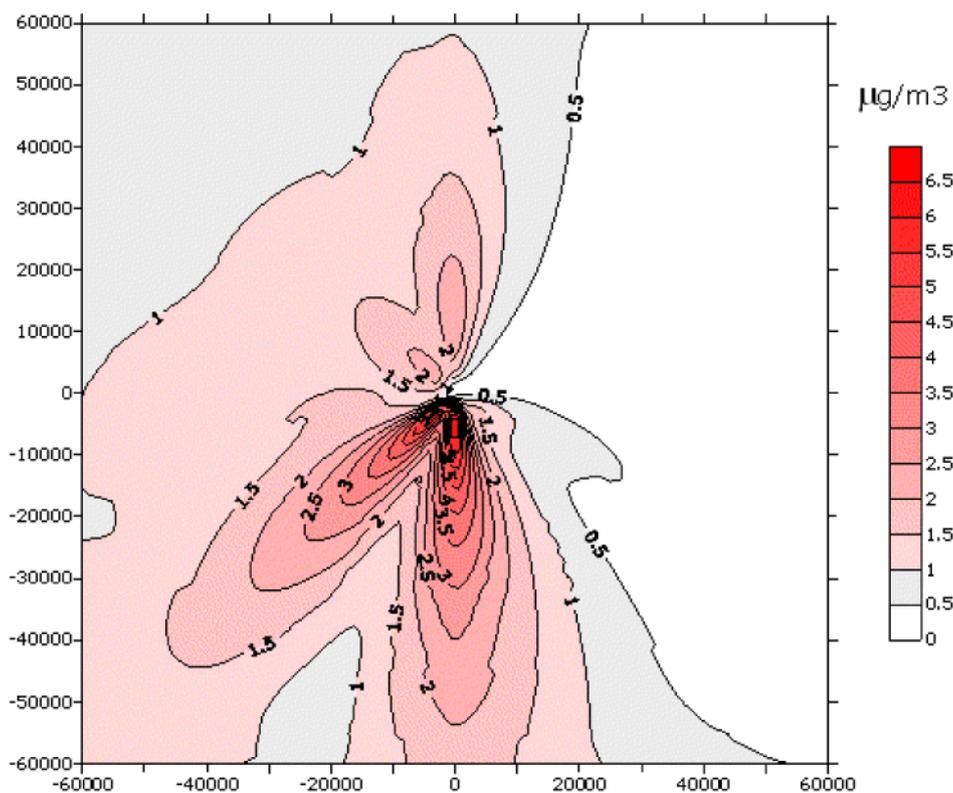


Fig. 6. Resultados de la modelación de la concentración de SOx en el aire con el ISCST.

Aparentemente los resultados del modelo de Berlyand son más lógicos. Pero antes de arribar a alguna conclusión analicemos el comportamiento de las variables meteorológicas utilizadas en el estudio para cada hora del día. La velocidad promedio y la desviación estándar por hora, la probabilidad de ocurrencia de rumbos por horas, la probabilidad de ocurrencia de cada categoría de estabilidad que corresponden a cada hora son mostrados en las figuras 7, 8 y 9, respectivamente.

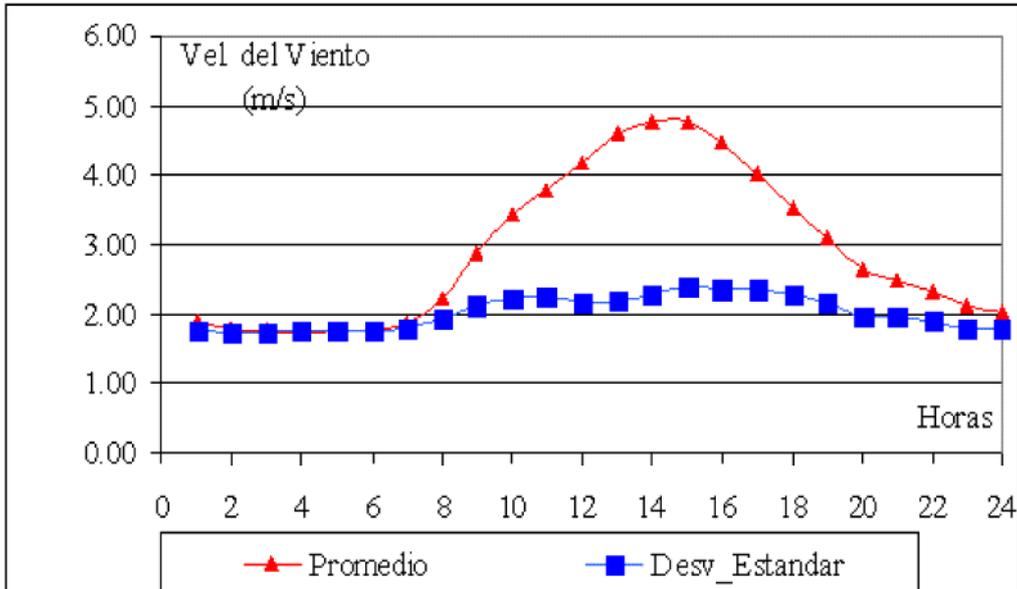


Fig. 7. Velocidad del viento.

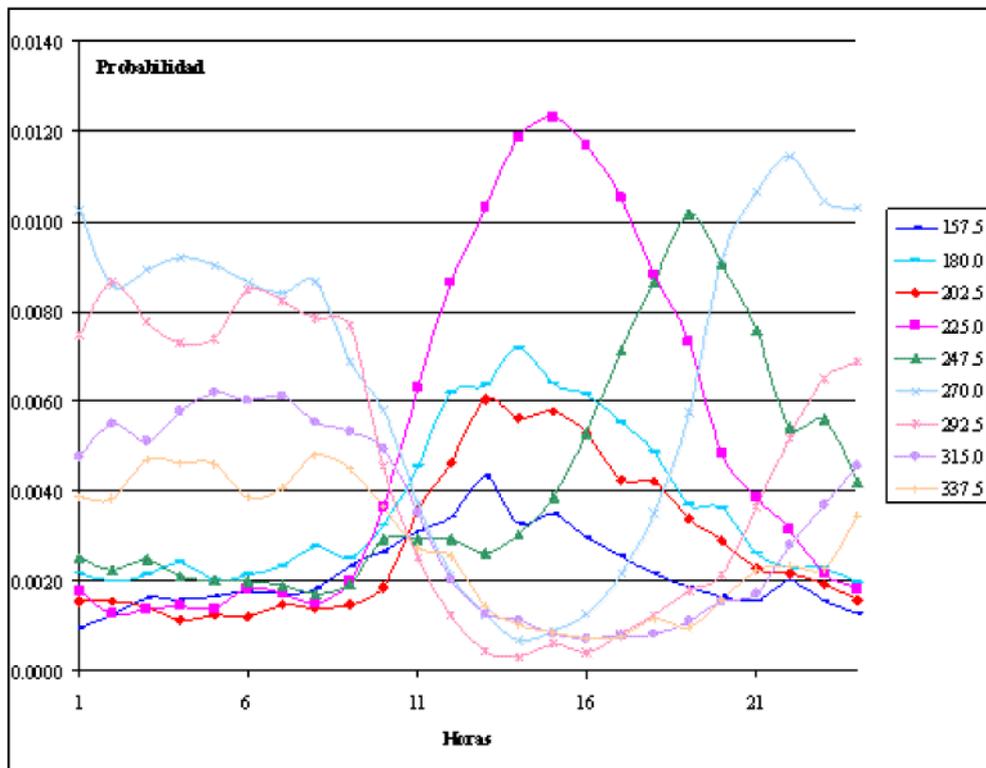


Fig. 8. Probabilidad de ocurrencia de rumbos por hora.

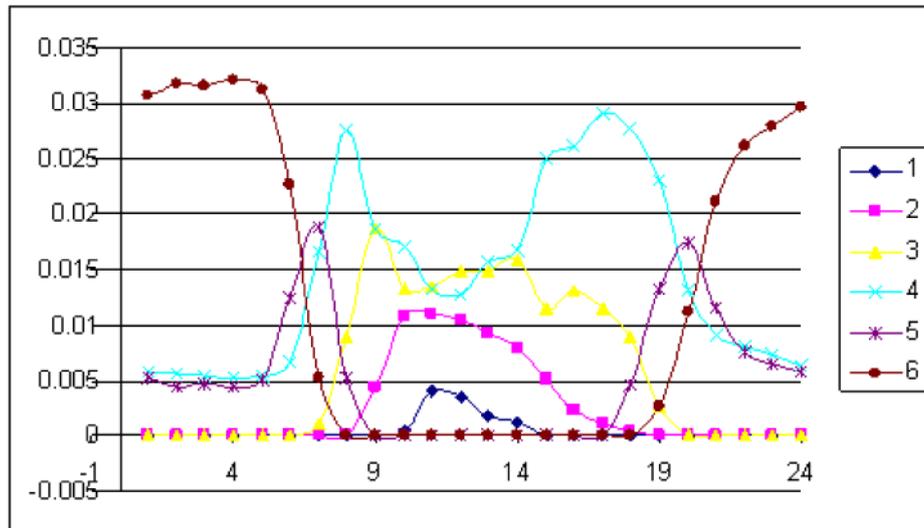


Fig. 9. Probabilidad de ocurrencia de la estabilidad atmosférica por horas.

Como puede observarse en la figura 8, durante las horas de la noche la probabilidad del viento soplando hacia el Oeste aumenta, con velocidades bajas (Fig. 7), pero en la figura 9 se muestra que durante las noches la atmósfera es estable, lo que implica valores altos del exponente del perfil de viento [Soltura, et al. 1997] (rápido aumento de la velocidad del viento con la altura) y valores pequeños de los coeficientes de dispersión del penacho [EPA, 1995^a], que favorece una fuerte advección para los contaminantes emitidos por una chimenea alta (180 m) y un penacho estrecho, de forma que las concentraciones medias anuales en los receptores ubicados al Oeste de la fuente son realmente menores que los que podríamos obtener si sólo se tiene en cuenta la rosa de los vientos anual.

Durante la tarde el viento sopla preferentemente hacia los rumbos sur-suroeste, y es precisamente en este horario donde prevalecen condiciones inestables de la atmósfera, caracterizadas además por un bajo exponente del perfil de viento y altos coeficientes de dispersión del penacho. El análisis en este caso es completamente contrario: las concentraciones medias anuales en los receptores ubicados al Sur de la fuente son realmente mayores que los que podríamos obtener si sólo se tiene en cuenta la rosa de los vientos anual.

Es interesante conocer que aunque se necesiten sólo las concentraciones promedio en 24 horas, e incluso anuales, el ISCST3 calcula las concentraciones horarias para todos los receptores, y entonces se obtienen las concentraciones en períodos mayores a una hora y promedian las concentraciones válidas de las horas incluidas en el período en cuestión. Para disminuir el volumen de cálculos se considera que la concentración horaria en los receptores es cero si:

- El receptor se encuentra a más de 50 grados del eje del penacho.
- El receptor está demasiado cerca de la fuente (a menos de un metro) o de un obstáculo que provoca estela (a menos de tres veces la altura del obstáculo).
- El receptor se encuentra a más de 80 km de la fuente.

- Si la atmósfera es estable y la altura efectiva de la pluma es superior a la altura de la capa de mezcla.
- Si el receptor está localizado a una distancia perpendicular al penacho, seis veces mayor que el coeficiente de dispersión lateral de éste.

Las diferencias entre los modelos, expresada como desviación fraccional sobre todos los receptores se muestran a continuación.

La Fig. 10 muestra la desviación fraccional entre las versiones A y B del

$$FB = 2 \left[\frac{C_{BA} - C_{BB}}{C_{BA} + C_{BB}} \right]$$

modelo de Berlyand calculada como para 16 rumbos (de 0 o 360 a 337,5° con paso de 22,5) y de 1 a 20 km. Se presentan tres situaciones:

- Para algunos rumbos, entre 1 y 2 km, FB es positiva, entre 0,5 y 1, lo que indica que $C_{BA} \gg C_{BB}$.
- Entre 2 y 4 km, FB es positiva, pero entre 0 y 0,5, indicando que $C_{BA} > C_{BB}$.
- Entre 4 y 20 km, FB es negativa, entre -0,5 y 0, lo que indica que $C_{BA} < C_{BB}$.

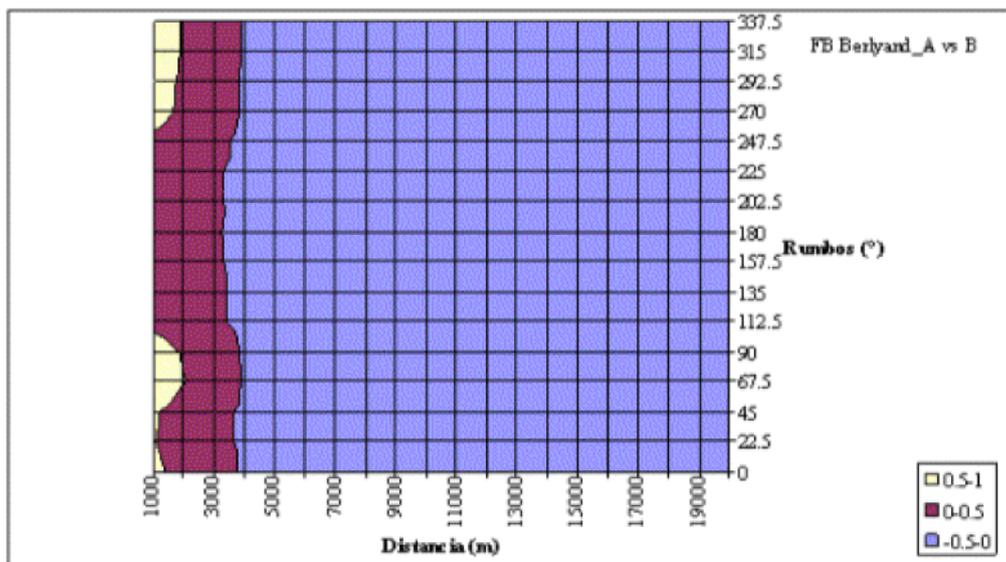


Fig. 10. FB en las concentraciones promedio anuales entre el modelo de Berlyand versión A y B.

La Fig. 11 muestra la desviación fraccional entre los resultados del ISCST3 y

$$FB = 2 \left[\frac{C_{ISC} - C_{BA}}{C_{ISC} + C_{BA}} \right]$$

la versión A de Berlyand, para 16 rumbos (de 0 o 360 a 337,5° con paso de 22,5) y de 1 a 50 km. El gráfico no es tan uniforme como el anterior, pues el contorno de las isolíneas de concentración obtenidas por ambos modelos es bastante diferente. Se pueden arribar a las conclusiones siguientes:

- Para la mayor parte de los receptores, la FB es negativa, lo que indica que $C_{BA} > C_{ISC}$. Este comportamiento se observa por lo general hasta 30 km de la fuente, aunque en algunos rumbos, como el Oeste (270°), esto se mantiene hasta los 50 km.

- Para la mayor parte los receptores localizados a menos de 10 km de la fuente CBA>>CISC, FB entre -2 y -1
- Para casi todos los rumbos, a partir de los 30 km, la FB es positiva e indica que CISC>CBA.

Aunque los cálculos se realizaron hasta 50 km, la norma cubana plantea que el modelo de Berlyand sólo es aplicable en un radio de hasta 50 veces la altura de la chimenea (para la CTE de Santa Cruz, la altura es de 180 m, por lo que las evaluaciones solo tienen validez hasta 9 km). Esta es una razón adicional para recomendar el uso de otro modelo que sea válido en todo el dominio local (generalmente considerado hasta 50 km de la fuente).

Por su fundamento teórico el modelo de Berlyand no es capaz de tener en cuenta muchas variables que definen el comportamiento de la atmósfera y consecuentemente la dispersión de los contaminantes. Las isolíneas de concentración resultantes del modelo de Berlyand son una réplica bastante aproximada de la rosa de los vientos (la dispersión de los contaminantes es determinada por la dirección y la velocidad del viento), utilizando también una constante de estratificación térmica que no refleja totalmente el comportamiento de la estabilidad atmosférica en la región de estudio.

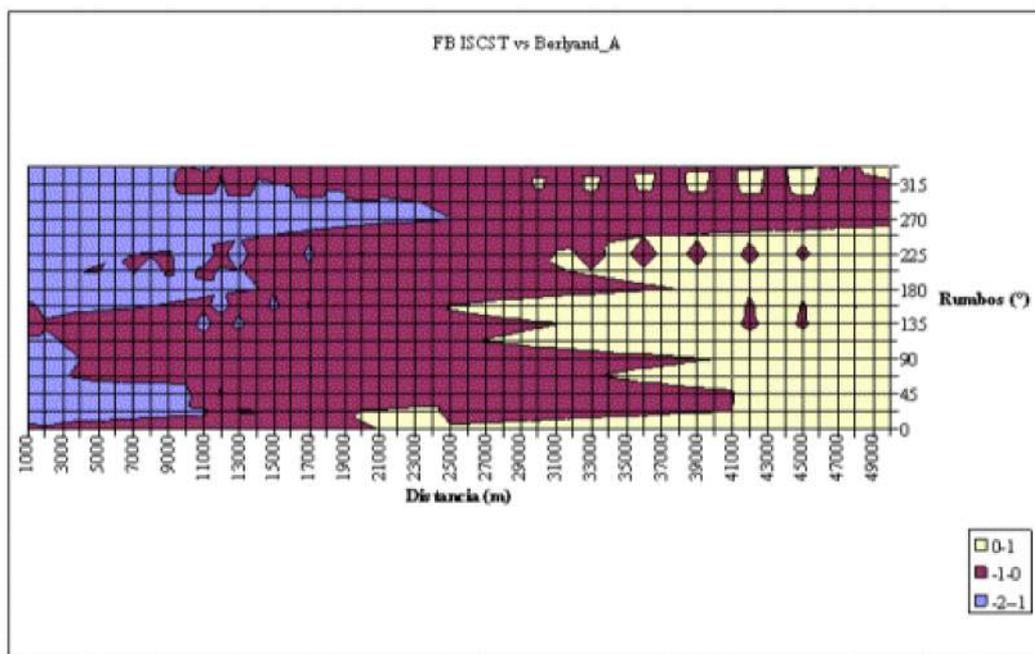


Fig. 11. FB en las concentraciones promedio anuales entre el modelo ISCST3 y Berlyand versión A.

A pesar de que el ISCST es un modelo para condiciones estacionarias, considera, además de la dirección y la velocidad del viento, qué condiciones meteorológicas las acompañan.

Esto sin tener en cuenta las posibilidades del modelo ISCST de modelar la topografía del terreno, la deposición seca y húmeda de los contaminantes, de dar un tratamiento diferenciado a gases y partículas considerando sus dimensiones, etcétera.

SCREEN3

Si se ejecuta el SCREEN con los mismos datos de entrada, los resultados para la opción de meteorología completa (determinación de las concentraciones horarias máximas y a qué distancia de la fuente se producen, para las seis clases de estabilidad y sus correspondientes velocidades del viento); se muestran en la figura 12 y en la tabla 3. Hasta 3 500 m, la concentración máxima se obtiene con estabilidad 1 (A) y dirección del viento de 2 m/seg. hasta 1 500 m; de 1,5 m/seg., entre 1 600 y 2 800 m; y de 1 m/seg., de 2 900 a 3 500. Entre 4 000 y 8 000 m la concentración máxima se obtiene con estabilidad 2 (B), y a partir de 8 000 m con estabilidad 3 (C).

La concentración máxima horaria ($1\ 699\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) se obtiene para la categoría de estabilidad A con una velocidad del viento de 2 m/seg. a la altura del anemómetro, y a 1 123 m de la fuente. Por su parte, Berlyand obtiene una concentración máxima instantánea de $385\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ con una velocidad del viento de 4,33 m/s a la altura de la chimenea y a 2 991 m de la chimenea.

Tabla 3. Resultados del SCREEN para meteorología completa

Distancia (m)	Estabilidad a la que se obtiene la conc. máx.	U_{10} (m/s)
1 000-1 500	1	2
1 600-2 800	1	1,5
2 900-3 500	1	1
4 000-5 000	2	2
5 500-7 500	2	1,5
8 000	2	1
8 500-10 000	3	2
15 000	3	1,5
20 000-50 000	3	1

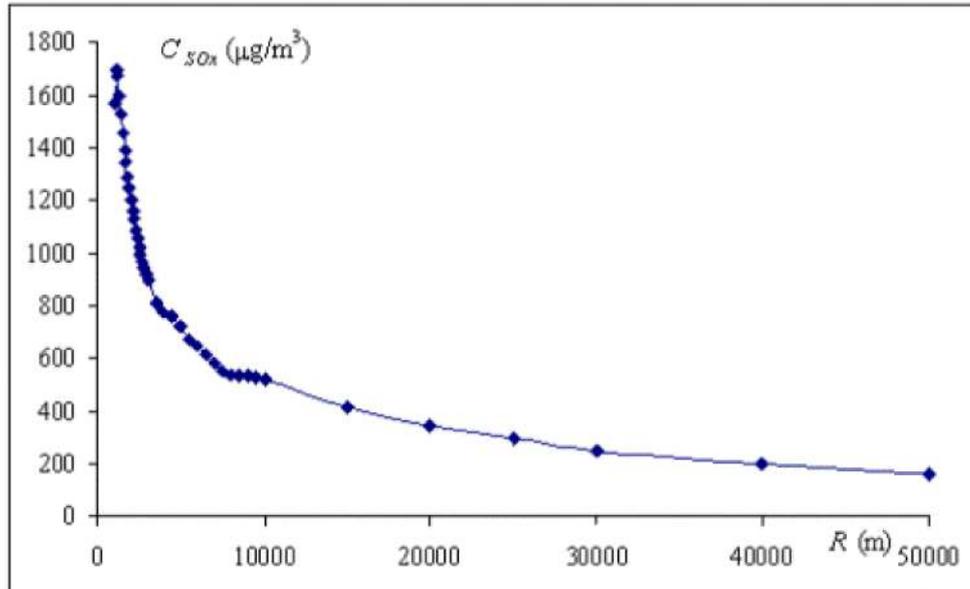


Fig. 12. Concentraciones horarias máximas de SOx en función de la distancia de la fuente.

Si tenemos en cuenta las matrices de estabilidad atmosférica-dirección-velocidad del viento anuales para los 16 rumbos (las cuales obtuvimos del fichero de entrada del ISCST) se pueden calcular las concentraciones medias anuales en cada receptor. Las isolíneas de concentración se muestran en la figura 13. Las concentraciones máximas (alrededor de $11\mu\text{g}/\text{m}^3$) se obtienen en los rumbos Sur y Suroeste (al igual que con el ISCST3) a los 6 km.

Como modelos de sondeo, el de Berlyand tiene la ventaja que obtiene directamente las concentraciones por rumbo solamente a partir de la matriz de velocidad-dirección del viento.

El SCREEN3, sin embargo, necesita la matriz de estabilidad atmosférica-dirección-velocidad del viento para a partir de los resultados directos del modelo obtener las concentraciones en cada receptor.

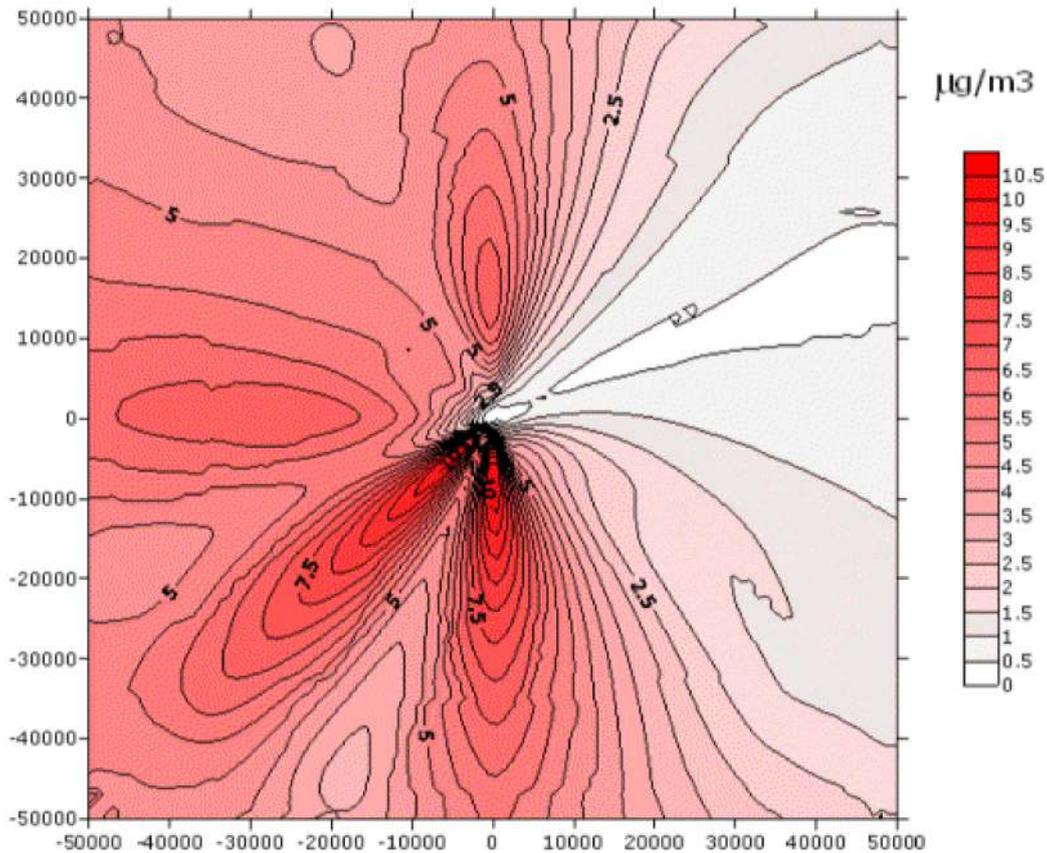


Fig. 13. Concentraciones medias anuales obtenidas con SCREEN3 y considerando posteriormente las matrices de estabilidad atmosférica-dirección-velocidad del viento.

SCREEN3, por su parte, puede realizar todos los cálculos previstos para una fuente puntual aislada a corto plazo en el documento guía para estudios de sondeo de la EPA [EPA, 1995b], incorporando además de la estimación de las concentraciones máximas al nivel del terreno y la distancia a que éstas se producen, los efectos de descenso de la pluma por presencia de edificaciones u obstáculos; las concentraciones en la zona de recirculación de cavidades, estimando las concentraciones debido a la recirculación o fumigación en la línea de costa y por rompimiento de la inversión y la determinación del ascenso del penacho para emisiones por antorchas.

El modelo puede incorporar los efectos de terreno elevado sencillo en las concentraciones máximas y calcular las concentraciones promedio en 24 horas ocasionadas por el impacto del penacho en terrenos complejos usando el modelo VALLEY para 24 horas. Las fuentes de área simples pueden modelarse con SCREEN usando un método de integración numérica, y las fuentes volumétricas sencillas mediante un procedimiento de fuente puntual virtual.

Recomendaciones

Por las consideraciones teóricas de los modelos de Berlyand e ISCST y por los resultados obtenidos proponemos que para otorgar las licencias ambientales de cualquier instalación industrial, el modelo de Berlyand y/o SCREEN, sea utilizado como modelo de sondeo, mientras que el ISCST3 sea utilizado como

modelo para estudios detallados. La decisión final respecto a qué modelo proponer para realizar las evaluaciones de sondeo requerirá de un análisis complementario.

El análisis de sondeo se utiliza para determinar de manera aproximada las concentraciones esperadas en las condiciones más desfavorables. Si las concentraciones ambientales totales de los contaminantes en estudio sobrepasan cierto porcentaje de los valores normados, que deben ser fijados más adelante (50 % en muchos países), es indispensable un estudio detallado. En caso contrario es suficiente un análisis de sondeo.

Conclusiones

Por su fundamento teórico el modelo de Berlyand no es capaz de tener en cuenta muchas variables que definen el comportamiento de la atmósfera y consecuentemente la dispersión de los contaminantes. Las isolíneas de concentración resultantes del modelo de Berlyand son una réplica bastante aproximada de la rosa de los vientos (la dispersión de los contaminantes es determinada por la dirección y la velocidad del viento); sin embargo, no considera factores tan importantes como la estabilidad atmosférica.

A pesar de que el ISCST es un modelo para condiciones estacionarias, considera, además de la dirección y la velocidad del viento, qué condiciones meteorológicas lo acompañan; esto sin tener en cuenta las posibilidades del modelo ISCST de modelar la topografía del terreno, la deposición seca y húmeda de los contaminantes, el de dar un tratamiento diferenciado a gases y partículas considerando sus dimensiones, etcétera.

En la comparación preliminar entre SCREEN3 y Berlyand se obtuvo un comportamiento similar entre SCREEN3 e ISCST3 en cuanto a distribución y valores de las concentraciones; pero en SCREEN3 se mantienen las concentraciones elevadas a distancias considerables de la fuente, lo cual requiere un análisis complementario.

Bibliografía

- COMITÉ ESTATAL DE NORMALIZACIÓN. *NC 39:1999, NORMA CUBANA*, Sistema de Normas para la protección del Medio Ambiente, ATMÓSFERA, Requisitos higiénico-sanitarios: Concentraciones máximas admisibles, alturas mínimas de expulsión y zonas de protección sanitaria, 1999.
- EPA-454/R-92-025. «Protocol for Determining the Best Performing Model, EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, Technical Support Division». 1992.
- EPA. «User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion Models». Volume II, Description of model algorithms, EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, 1995
- EPA. «Screening Procedures for Estimating the Air Quality Impact of Stationary Sources», Revised. EPA-450/R-92-019, U.S. 1995.
- EPA. 40 CFR Part 51, App. «W—Revision to the Guideline on air quality models», Federal Register/ Vol. 68, No. 72, April 15, 2003/ Rules and Regulations, 2003.

SOLTURA, R., ET AL. «Estadística y Climatología. Potenciales de generación eólico-eléctricos y bombeo eólico». *Atlas eólico de Cuba. Revista Solar*. No 33. México: 1997.

TURTÓS, L.; A. ROQUE Y E. MENESES. «Desarrollo y aplicación de la metodología para la evaluación local de la dispersión de contaminantes emitidos en centrales termoeléctricas». VII Taller Cátedra de Medio Ambiente, ISCTN. La Habana: «Contribución a la educación y a la protección ambiental», ISCTN. Volumen 2, 2001.

TURTÓS, L.; A. ROQUE, R. SOLTURA Y M. SANCHEZ. Metodología de estimación de variables meteorológicas secundarias para modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos. Contribución a la educación y la protección ambiental.

Vol. 4, 2003. pp. 266-277.

Control de la calidad de los conjuntos de datos sobre clima

Quality Control of Climate Data Sets

*Barbara Ridley and John Boland
Centre for Industrial and Applicable Mathematics
University of South Australia
Mawson Lakes Boulevard, Mawson Lakes SA 5095
AUSTRALIA
Barbara.Ridley@unisa.edu.au
Ph. +61 8 8302 3055
Fax +61 8 8302 5785*

Resumen

La evaluación del funcionamiento de un sistema, susceptible a la influencia de las variables climáticas, se puede lograr mediante varios métodos. El sistema se puede instalar, probar su eficacia y ajustar in situ. Los modelos de laboratorio se pueden construir y probar en condiciones artificiales. Otra técnica efectiva es el uso de los paquetes de simulación por computadora. Cuando se realizan dichas simulaciones, las entradas (inputs) de los datos sobre clima al modelo, deben representar el clima sobre el cual, se instalará el sistema. La mayoría de los sistemas de simulaciones usan conjunto de datos, pero irónicamente, esto puede entrañar problemas. Se supone que los conjuntos de datos disponibles reflejan correctamente las variables climatológicas. Los conjuntos de datos utilizados por el autor han presentado muchos problemas y algunos de ellos se relacionan a continuación:

- Valores que no se registran dentro del rango aceptable de la localidad y el tipo de variable.
- Entradas invalidantes, como texto en lugar de números, y lo mas importante
- Pérdida de valores individuales y, algunas veces, pérdida de días enteros.

Los errores registrados en los datos pueden ser los cometidos por la persona que introduce los datos a la base de datos, pero puede haber fallas en el equipo medidor. Se han desarrollado pruebas que verifican si los datos se encuentran dentro de los límites altos o bajos, calculados para cada una de las variables de clima, particularmente en la localidad y la relación correcta entre las variables de la radiación solar. Donde los datos fallan en una esfera particular en estas pruebas, en una esfera en particular, los registros se borran. El proceso de vaciar las células contribuirá a realizar un análisis posterior de los datos, sin que medie ningún tipo de parcialización en el análisis. Al utilizar las Series Fourier, descritas por Boland (1995), se puede realizar la

interpolación para estimar los valores que faltan. Los valores perdidos sobre la radiación difusa se tratan de forma separada, utilizando un modelo estadístico.
Palabras clave: Control de la calidad y conjuntos de datos.

Abstract

The performance evaluation of the system that is susceptible to the influence of climatic variables can be achieved by various methods. The system can be erected in situ, tested for its efficacy and adjusted. Laboratory models can be constructed and testing performed under artificial conditions. Another effective technique is the use of computer simulation packages. When performing the simulations, the climatic inputs to the model must represent the climate in which the system will be installed. Most simulations use real data sets but, ironically, this can entail problems. There is an assumption that the data sets which are available correctly reflect the weather variables for the location. The data sets employed by the authors have been found to contain many problems. These problems include:

- Values outside the acceptable range for the location and the type of variable.
- Invalid entries such as text instead of numeric and, most importantly,
- Missing individual values and sometimes entire days.

The errors in the data may be simply human error when entering the data into the database, but there may also be faults in the measuring equipment. We have developed tests that will verify that data is within the upper and lower limits calculated for each of the weather variables at the particular location and that the correct relationship between the solar radiation variables exists. Where data fail these tests, that particular field for the record will be emptied. The process of emptying the cells will allow further analysis of the data without any biasing being present. Using Fourier Series, as described by Boland (1995), interpolation can be undertaken to estimate the missing values. Missing values of diffuse radiation are treated separately using a statistical model.

Key words: Quality control and data sets

1. Introduction

Computer simulation packages that are constructed to test the performance of a system which

is influenced by climate variables require test data sets for input into their systems. Most simulations use real data sets but, these can entail problems.

There is a belief that these data sets are complete and that they are an accurate representation of the required weather for variables for the location. In this study the test data was examined and found to contain errors which include

- values outside the defined range for the location and the type of variable
- invalid entries, such as, text instead of numeric
- missing records, ranging from individual values up to entire missing days.

The cause of these errors may be simply human error in entering values into the database, but there may also be faults in the measuring equipment.

In this paper we present a methodology for inspecting the data and identifying

- missing records
- invalid data, where these values are then deleted from the record.

Time series analysis and linear regression are utilised to develop models from which we can estimate the missing data values for temperature and global radiation.

In the evaluation of the performance of solar collectors, knowledge is also required of the amount of radiation incident upon them. The available data is usually global solar radiation on a horizontal surface. The components of global radiation are direct and diffuse. Because solar collectors are not usually mounted on a horizontal surface, it is necessary to calculate the equivalent value for the tilted surface. Diffuse radiation is anisotropic over the sky dome and thus values on tilted surfaces cannot be calculated using trigonometric relationships to convert values on the horizontal. We have developed a model to predict the diffuse fraction of the global radiation on the horizontal. This model can be used to estimate values for the diffuse radiation from the global radiation and we can evaluate the direct normal radiation from both global and diffuse.

2. Validation of minute data

The dataset utilised in this study comprises four years of one minute values for a range of weather variables over the years 1998 – 2001. This data was recorded by the Built Environment Research Group (BERG) in the School of Architecture and Building at Deakin University, Victoria. BERG assists building owners and designers in reducing energy consumption and operating costs and to increase productivity through improvements to occupant comfort. The data was recorded at the Deakin University weather station.

Macros in Access were written to determine how many records were missing from each year of data. The most complete year was found to be 1999 with only 903 missing minutes, ie only 0.17% of the data is missing and of those missing minutes only 12 whole hours and no whole days were missing. For this reason 1999 has been used as an example in the time series and linear regression modelling. The variables which have been investigated are temperature, global, direct and diffuse radiation.

The validation process at the one minute level consisted primarily of range checking using the upper and lower limits that were set according to existing experience with the weather in Geelong. Any values that fell outside the limits were deleted from the record.

3. Aggregation to hourly data values

Before any further validation is performed the data must be aggregated into hourly values.

A new table called ValidDataHourly was defined and a macro was written which moves sequentially through the record set performing the following tests and calculations

- Is the next chronological minute present?
- Add the temperature value for that minute to the hourly temperature sum.
- Perform a similar operation for direct normal, global and diffuse radiation.
- Keep a sum of the number of minutes where all fields contain values.

- At the end of any hour, if the minute counter is less than 60, then all fields in the ValidDataHourly table are set to empty.
- Where all 60 values are present, then
Temperature is the value sum/60 and is entered into the ValidDataHourly table
Radiation is the sum for each variable and is converted from W/m² to kJ/(m².hr) by multiplying by 60 and dividing by 1000. The results are then entered into the ValidDataHourly table.

4. Further validation of diffuse radiation

We extend the validation studies for diffuse radiation. Are there other values of the diffuse radiation which even though they pass previous tests, can be deemed to be questionable? The diffuse fraction is used to determine values of the diffuse radiation which are considered to be beyond reasonable bounds. The diffuse fraction is defined as the proportion of the global radiation which is received as diffuse radiation. Diffuse radiation is the solar radiation received from the sun after its direction has been changed by scattering by the atmosphere [Duffie, 1991]. The diffuse fraction is used because on a very clear day it should be low, whereas on a cloudy day it would be much higher. On a graph of the relationship between the hourly clearness index k_t and the diffuse fraction, it would be expected that as k_t increases the diffuse fraction decreases. The clearness index, k_t , is defined as the proportion of the horizontal extraterrestrial radiation, H_0 , that comes through as global radiation, that is, the amount of solar radiation that arrives on earth compared to what arrives at the top of the atmosphere.

The validation studies for diffuse radiation are extended using Microsoft's Excel. The ValidDataHourly table constructed in Access is exported into Excel where the data is more easily tested.

New fields are required for the additional calculations. The new fields are

- Local clock time, LCT - the middle of the current hour starting at 0.5 hours for each day
- Equation of time, EQT, for each day N – an astronomical correction for irregularities in the earth's orbit
- Apparent solar time, AST = LCT + time zone - longitude/15 + EQT/60
Geelong's time zone is -10 and the longitude is -144.34
- The hour angle ω
- The apparent inclination of the axis of the earth's rotation toward the sun with respect to a cylinder through and perpendicular to the earth's orbit, δ
Note: δ will be positive in the northern hemisphere and negative in the southern hemisphere.
- The sine of the solar altitude, α , is calculated using the following equation
$$\sin \alpha = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta$$
where ϕ , the latitude for Geelong, is 38.090, α can then be evaluated
- The apparent extraterrestrial solar radiation I_0
- The extraterrestrial horizontal radiation H_0

All angles are calculated in degrees, however, for further calculations in Excel it is necessary to convert to radians. These new variables are then used to construct the necessary fields for validation of the diffuse radiation which are

- $k_t = \frac{I_{global}}{H_0}$

- diffuse fraction, $d = \frac{I_{diffuse}}{I_{global}}$

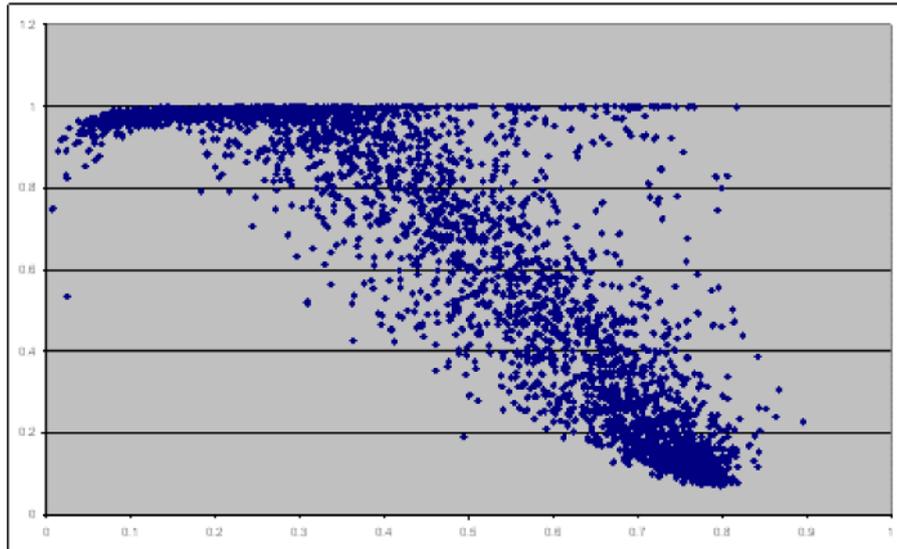


Figure 1: Diffuse fraction

A plot of d against k_t , Figure 1, shows that for this data there are a number of values in the top right hand corner of the graph. This is not considered to be feasible because when there is a high clearness index, a low diffuse fraction would be expected.

It was decided to construct 95% confidence intervals for the data and use the upper confidence interval as an upper bound for acceptable values. The process was as follows:

- A curve was fitted to the data using the equation

$$d = \frac{1 + ae^{\delta k_t}}{1 + ce^{\delta k_t}} \tag{1}$$

This curve basically provides a one dimensional mean value for the data, simply as a function of the clearness index. The form of this logistic curve is consistent with the models in Boland and Scott [1999], Boland and McArthur [2001] and Boland et al. [2001].

- Using a least squares method of optimisation and Solver in Microsoft Excel, the coefficients for the equation were found.
- The standard deviation for the diffuse fraction over each interval of 0.025 of k_t was evaluated.
- A graph of the diffuse fraction standard deviation was constructed and a cubic curve was fitted to the data as shown in Figure 2.

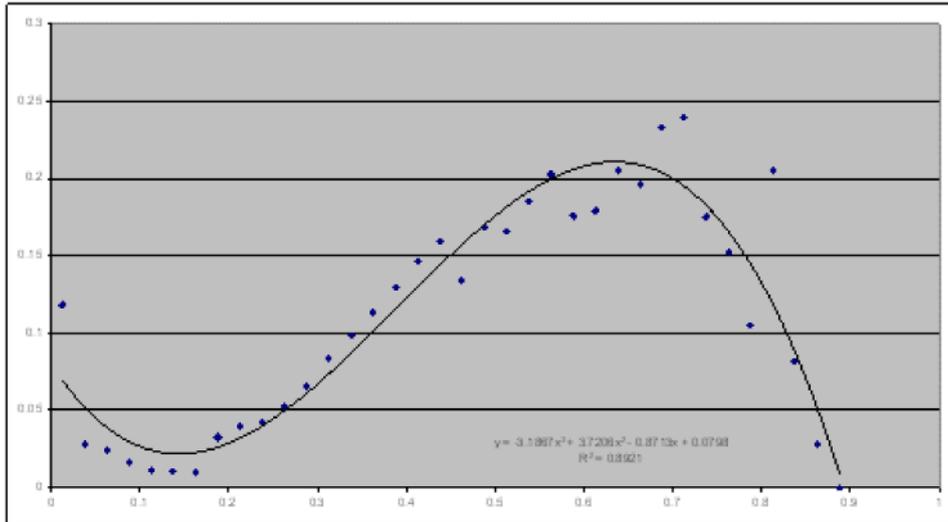


Figure 2: Diffuse fraction standard deviation cubic curve fitting

- The 95% confidence limits were evaluated using the equations generated by steps 1 and 4. The confidence limits are calculated using the mean curve for the data

$$\mu = 0.00018 + \frac{1 - 0.00018}{1 + e^{8.4042k_t - 5.0608}}$$

and the standard deviation curve

$$\sigma = -3.1867 k_t^3 + 3.7206 k_t^2 - 0.8713 k_t + 0.0798$$

The 95% confidence limits are calculated as $\mu \pm 1.96\sigma$. This approach is based on the assumption that the data is normally distributed about the mean curve.

- All diffuse radiation values, where the diffuse fraction was above the upper limit, were deleted.

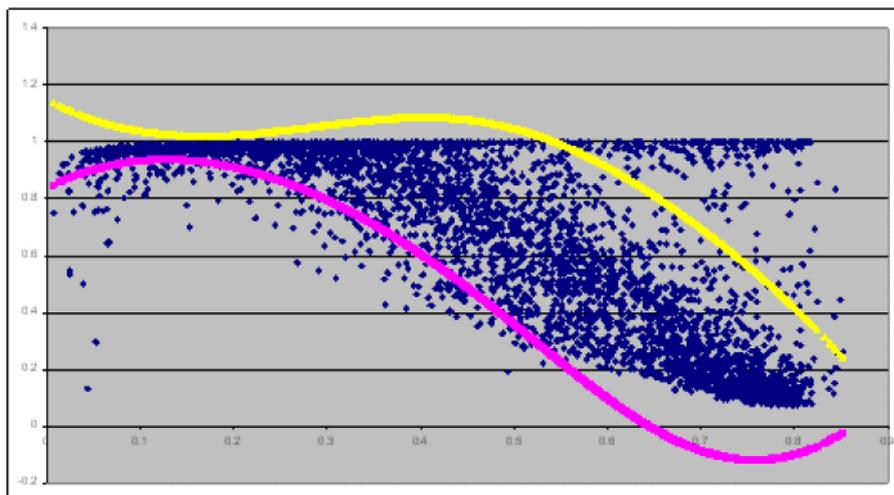


Figure 3: Raw values of diffuse fraction with confidence limits

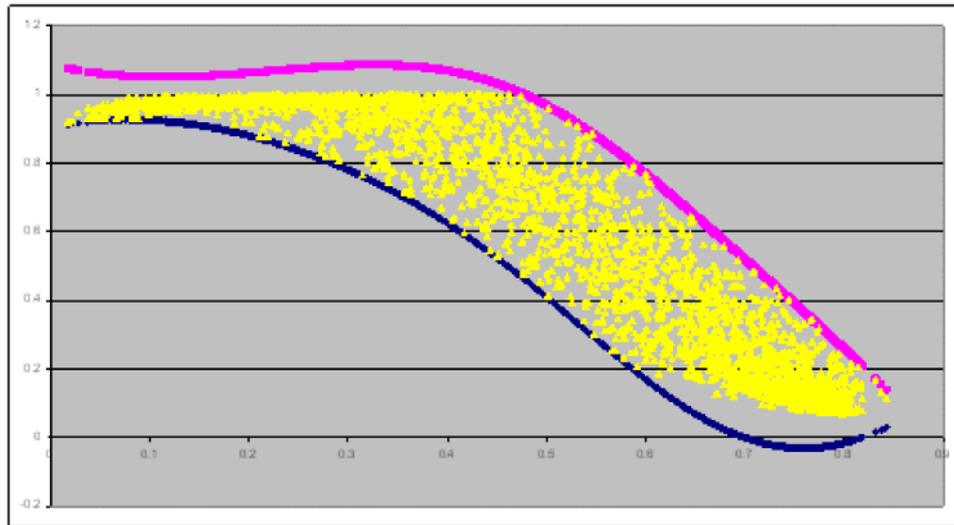


Figure 4: Diffuse fraction after removing any remaining high and low values

Figure 3 shows the confidence limits with the raw data. After removing these high (assumed) invalid values, the process is repeated to determine new confidence limits which are not being biased by the high values. The new confidence limits are then used to eliminate values both above the upper limit and below the lower limit as shown in Figure 4. Once again the diffuse radiation values corresponding to those points are deemed invalid and have been tagged and the cells have been emptied. Future work will include using a truncated Normal distribution to keep the confidence intervals between 0 and 1.

5. Fitting missing values

The initial step in fitting missing values is to use the relationship between the three radiation variables. If the global is available with either direct normal or diffuse radiation then the third variable could be calculated as follows:

- $$I_{DN} = \frac{I_{global} - I_{diffuse}}{\sin \alpha}$$
- $$I_{diffuse} = I_{global} - I_{DN} * \sin \alpha$$

5.1. Missing temperature and global radiation

An algorithm for estimating values in the situation when some hourly values are missing is now presented. The method for estimating the missing values for temperature and global radiation uses time series analysis. A Fourier transform [Boland, 1995] can be used to identify the important cycles to be used in a Fourier series which then represents the mean function for the data. Boland [1995] determined the yearly cycle, twice yearly cycle, daily cycle, twice daily and thrice daily cycle, along with the beat frequencies for each of these, to be important in modelling both temperature and radiation data. For the purpose of modelling these variables at hourly intervals over a day, it is only necessary to use the three daily cycles without the beat frequencies. The beat frequencies are not required in this application because they are only needed to explain the

change in amplitude of the daily cycles over the whole year. The equation formed is

$$y_t = \beta_1 + \beta_2 \cos\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + \beta_3 \sin\left(\frac{2\pi}{24}t\right) + \beta_4 \cos\left(\frac{4\pi}{24}t\right) + \beta_5 \sin\left(\frac{4\pi}{24}t\right) + \beta_6 \cos\left(\frac{6\pi}{24}t\right) + \beta_7 \sin\left(\frac{6\pi}{24}t\right) \quad (2)$$

where β_1 generates the daily average.

To determine the optimal values for the coefficients we have been using Excel's Solver. This is an optimisation tool which uses an iterative approach but which cannot be accessed from a macro. In order to make this method more portable and more dynamic we decided to apply the QR regression method [Pollock, 1999] for determining the coefficients.

By adding an error term ε into Equation (2) a linear regression model can be formed. This can then be translated into the matrix format:

$$y = X\beta + \varepsilon$$

where $y = [y_1, y_2, \dots, y_T]'$, $\beta = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_7]'$, $\varepsilon = [\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_T]'$, and the rows of X will be

$$1 \quad \cos\left(\frac{2\pi}{24}t_i\right) \quad \sin\left(\frac{2\pi}{24}t_i\right) \quad \cos\left(\frac{4\pi}{24}t_i\right) \quad \sin\left(\frac{4\pi}{24}t_i\right) \quad \cos\left(\frac{6\pi}{24}t_i\right) \quad \sin\left(\frac{6\pi}{24}t_i\right)$$

where each row is a specific value of t_i . The elements of ε are assumed to be independently and identically distributed with expected values of zero and a common variance of σ^2 .

The number of rows in the matrices X and y will be determined by the number of missing hours in the day, eg if a day has 3 missing hours $\Rightarrow 24 - 3 = 21$ rows in these matrices. Thus, each row of X will be for a value t_i which is one of the hours for which there is data for that day. The y matrix is formed from the corresponding actual value at time t_i for either the temperature or the global radiation. The process is run separately for temperature and global radiation.

The value of β is estimated according to the principle of least squares regression by minimising the quadratic function

$$S = \varepsilon'\varepsilon = (y - X\beta)'(y - X\beta)$$

The minimising value of β is found by differentiating the function $S(\beta)$ with respect to β and setting the result to zero which gives

$$\frac{\partial S}{\partial \beta} = 2\beta'X'X - 2y'X = 0$$

This can be rearranged to give the normal equations

$$X'X\beta = X'y$$

Matrix X may be ill-conditioned, that is, it has a determinant equal to zero. For this reason QR decomposition ($Q'X=R$) is used. Here matrix X is pre-multiplied by a series of orthonormal matrices P_1, \dots, P_k so as to eliminate the sub-diagonal elements from successive columns [Pollock, 1999]. $Q=P_1, \dots, P_k$ is known as the Householder transformations. Note that $Q'Q=I$ as $Q'=Q^{-1}$ because Q is an orthogonal matrix. R is upper triangular. This results in

$$Q'A = \begin{bmatrix} Q_r' X \\ Q_e' X \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{matrix} Q_r' X = R \\ Q_e' X = 0 \end{matrix}$$

The QR decomposition to calculate the regression estimates is performed by continuing with $Q_r' X = R$, since $Q_e' X = 0$. Pre-multiplying by Q_r ($Q_r Q_r' = I$) gives

$$\begin{matrix} Q_r Q_r' = Q_r R \\ X = Q_r R \end{matrix} \tag{3}$$

Now substituting the right hand side of Equation (3) into the normal equations $X'X\beta = X'y$ the QR regression of $y=X\beta$ is set up as follows,

$$\begin{aligned} (Q_r R)' Q_r R \hat{\beta} &= (Q_r R)' y \\ R' Q_r' Q_r R \hat{\beta} &= R' Q_r' y \\ R' R \hat{\beta} &= R' Q_r' y \\ R^{-1} R' R \hat{\beta} &= R^{-1} R' Q_r' y \\ R \hat{\beta} &= Q_r' y \end{aligned} \tag{4}$$

Since R is an upper-triangular matrix, Equation (4) can be solved for $\hat{\beta} = [\hat{\beta}_1, \dots, \hat{\beta}_7]'$ by the process of back-substitution. The elements of Equation (4) are obtained by performing the Householder transformations to the augmented matrix $[X, y]$.

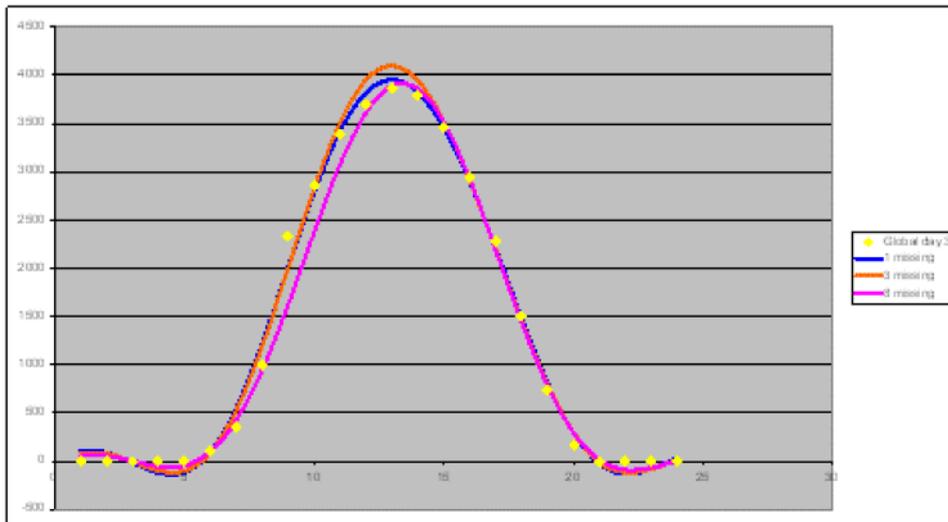


Figure 5: Test removing values from a complete day of global radiation

The Fourier equation generated by this method can then be used to estimate missing values. It was found that this method gave good results when less than 12 consecutive values for any given day were missing. Figure 5 illustrates how well this method captures the essence of the fit. Day 3 has all values present and provided a good basis for testing various scenarios of missing values. The first test involved removing one value at the peak of the day and using the method to predict the missing values, here the model closely matched the real value - overshooting it slightly. Next, three values were removed at the peak of the day, again the model matched closely but overshoot the peak a little more. Finally, 8 morning values were removed, the curve shifts slightly to the right, but the model still closely matches to the real data.

The 1999 data had only one day (day 277) when there were more than 12 consecutive values missing. The modelling for these missing values required including a day either side, thus modelling over 72 hours rather than the 24 hours usually taken, but this process was not automated. Figures 6 and 7 illustrate 3 days of filled temperature and global radiation data (inclusive of day 277) where it can be seen that this method gives very good results.

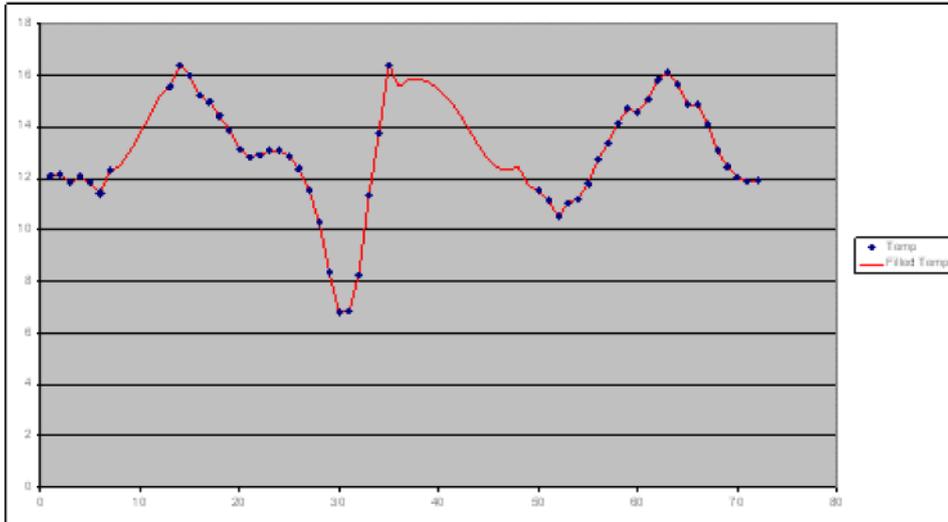


Figure 6: Temperature for 3 days of data from 1999

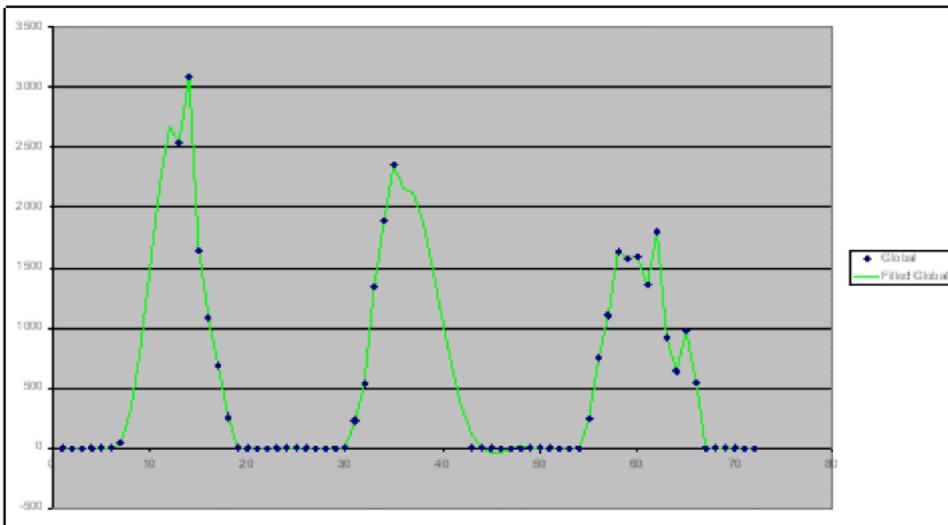


Figure 7: Global radiation for 3 days in 1999 with estimated missing values entered

5.2. Missing diffuse radiation modelling

The data remaining after eliminating values outside the confidence limits (Section 2) can then be used to construct a new model. Equation 1 is used to determine the best model to fit to the data by adding additional predictors in the following manner

$$d = \frac{1 + ae^{c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v}}{1 + c_1 e^{c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v}}$$

The expression $ae^{c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v}$ in the numerator can be deleted because a has been found to be not significantly different from zero. This allows us to rearrange the equation as follows

$$\begin{aligned}
 d &= \frac{1}{1 + c_1 e^{c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v}} \\
 \frac{1}{d} &= 1 + c_1 e^{c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v} \\
 \frac{1-d}{d} &= c_1 e^{c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v} \\
 \ln\left(\frac{1-d}{d}\right) &= c_1 + c_2 k_t + c_3 \alpha + c_4 K_t + c_5 AST + c_6 v
 \end{aligned} \tag{5}$$

Here

- d = diffuse fraction
- k_t = the hourly clearness index
- α = solar altitude
- K_t = daily clearness index
- AST = apparent solar time
- v = variability

$$= \frac{k_{t-1} + k_{t+1}}{2} \text{ except at sunrise when it equals } k_{t+1} \text{ and sunset when it equals } k_{t-1}$$

The method for finding the appropriate model from the data which remains after validation is to use multiple linear regression. Equation (5) is now a linear equation, where Excel's multiple regression analysis can be used to determine which variables should be included in the model. In order to use Equation (5) it is assumed that the diffuse fraction cannot be exactly equal to 1, since $\ln(0) = -\infty$, and all such values are set to 0.99999999. Realistically this is a sensible approach as it is essentially infeasible to get 100% diffuse radiation. The variables are added to the model one at a time (apart from always including k_t) in order to determine whether they contribute significantly. Table 1 shows a summary of this analysis including the P-value for each new variable, or group of variables, as they are added to the model. If the variable under consideration is found to be significant it is kept in the model and the subsequent variables are added and tested. For this analysis a 95% confidence level has been used and the following hypothesis is applied

$$\begin{aligned}
 H_0 : c_i &= 0 \\
 H_a : c_i &\neq 0
 \end{aligned}$$

Variable	P-value of new variable
Constant	0
k_t	0
k_t with α	0.22
k_t with k_t	0.30
k_t with AST	3.7×10^{-7}
k_t with variability	0.082

Table 1: Determining the best model

For the hypothesis testing a P-value less than 0.05 indicates that the parameter for consideration should be included in the model. The values shown in Table 1 signify that for c_1 , c_2 and c_5 we can reject the null hypothesis and that the constant, k_t and AST should be included in the model. The optimal model is

$$-6.4462 + 9.9543 k_t + 0.03716 \text{AST} = \ln\left(\frac{1-d}{d}\right)$$

which, when rearranged gives

$$d = \frac{1}{1 + e^{-6.4462 + 9.9543 k_t + 0.03716 \text{AST}}}$$

This is illustrated in Figure 8. Then, when the diffuse radiation is missing or has been invalidated, it can be calculated using the equation

$$I_{diffuse} = d * I_{global}$$

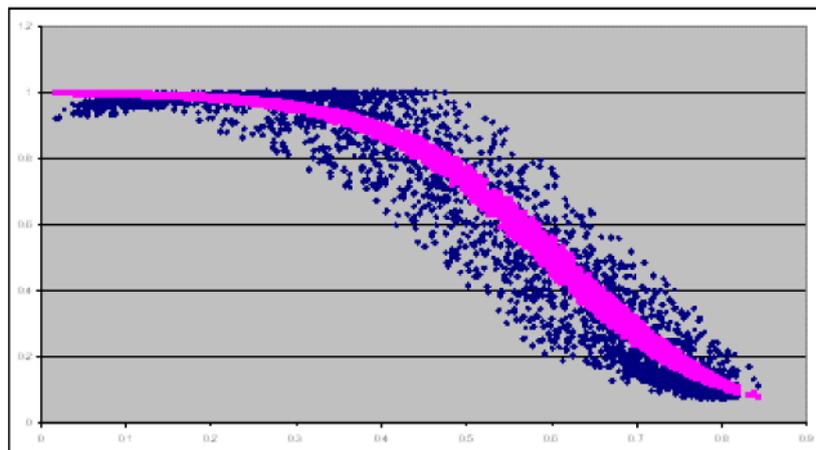


Figure 8: Diffuse fraction model using multiple linear regression

5.3. Missing direct normal radiation modelling

The final step in filling the missing data values is to calculate the direct normal radiation. This is done using the global and diffuse radiation in the following formula

$$I_{DN} = \frac{I_{global} + I_{diffuse}}{\sin \alpha}$$

6. Conclusions and further work

A methodology has been developed to validate the temperature and radiation data at different time intervals. The validation of the one minute data identifies missing records and sorts them into whole days, whole hours and minutes. Range checking is performed to identify data values beyond feasible limits. The valid minute data has been aggregated to form hourly data sets and additional fields have been calculated to allow further validation of the data.

Time series analysis and linear regression have been utilised with macros in Excel to estimate values for the missing or invalid global radiation and temperature data. Extensive validation of the diffuse radiation data has been performed by determining upper and lower confidence limits for the diffuse fraction and using these limits to eliminate seemingly infeasible values. A logistic curve in clearness index and apparent solar time has been fitted to the data remaining after this process to create a model to be used in estimating values for the missing or invalid records.

Future work will include both comparisons of this model for diffuse fraction with those in the literature and extension of this model to other locations.

7. References

- BOLAND, J. W. (1995). *Time-Series Analysis of Climatic Variables*, Solar Energy 55(5): 377-388.
- BOLAND, J. W. AND L. C. MCARTHUR (2001). *Models of the Diffuse Solar Fraction*, Unpublished.
- BOLAND, J. W. AND L. C. SCOTT (1999). *Predicting the Diffuse Fraction of Global Solar Radiation using Regression and Fuzzy Logic* ANZSES, Geelong.
- BOLAND, J. W., L. C. SCOTT, et al. (2001). *Modelling the diffuse fraction of global solar radiation on a horizontal surface*, Environmetrics 12: 103-116.
- DUFFIE, J. A. AND W. A. BECKMAN (1991). *Solar Engineering of Thermal Processes*, New York, John Wiley & Sons, Inc: 10-11.
- LUNDE, P. J. (1980). *Solar Thermal Engineering, Space Heating and Hot Water Systems*, New York, John Wiley & Sons: 63-121.
- POLLOCK, D. S. G. (1999). *A Handbook of Time-Series Analysis*, Signal Processing and Dynamics. London, Academic Press.

Eco Solar es una publicación científica electrónica trimestral para los especialistas de las fuentes renovables de energía. Se dedica a la promoción de temas relacionados con la energética, las energías alternativas, la física ambiental, la arquitectura bioclimática, el impacto sobre el medio ambiente la educación ambiental, la termoconversión, la eficiencia energética, y las energías de origen hidráulico, fotovoltaico, eólico, solar, biomasa y ciencias relacionadas.

DIRECTOR GENERAL:

Dr. Luis Bérriz Pérez.

DIRECTOR:

Lic. Manuel Álvarez
González.

EDITOR:

Lic. Alejandro Montecinos
Larrosa.

CORRECCIÓN:

M Sc. Roberto Manzano
Díaz.

Ing. Jorge Santamarina

DISEÑO ELECTRÓNICO:

D.I. Antonio Romillo Polaino.

TRADUCCIÓN:

Lic. Lázaro O´Farril Lazo.

CONSEJO ASESOR:

Dr. Luis Hernández (Energía fotovoltaica)

Dr. Conrado Moreno Figueredo (Energía
eólica)

Lic. Bruno Henríquez Pérez (Física
ambiental)

Dr. Jorge Luis Paretas (Energía hidráulica)

Dr. Dania González Couret (Arquitectura
bioclimática)

Dr. Jorge Guardado (Biomasa)

Dr. Sergio Corp Linares (Energía solar
térmica)

Lic. Leonor Turtós Carbonell (Impacto
ambiental)

Lic. Alejandro Montecinos Larrosa (Energía
humana)

Lic. Ricardo Bérriz Valle (Educación
ambiental)



**SOCIEDAD CUBANA PARA LA PROMOCIÓN
DE LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y EL RESPETO AMBIENTAL**

Calle 20 no. 4113, esquina a 47, Miramar, Playa,
Ciudad de La Habana, Cuba. Código Postal: 11300.

Teléfono: (537) 205-9949.

Apartado postal: 6611, CP: 10600, Ciudad de La Habana, Cuba.

e-mail: editora@cubasolar.cu

<http://www.cubasolar.cu>