

## **MODELO PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL CAUSADO POR SISTEMAS INTEGRADOS POR TERMICOS SOLARES Y CONVENCIONALES**

**I. Blasco Lucas**

Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat (IRPHa) – Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Diseño (FAUD)  
Universidad Nacional de San Juan (UNSJ) – Av. Ignacio de La Roza y Meglioli – 5400 San Juan – Argentina  
Tel.: +54(0)264 423 2395 / 3259 – Fax: +54(0)264 423 5397 – E-mail: [iblasco@farqui.unsj.edu.ar](mailto:iblasco@farqui.unsj.edu.ar)  
Internet: <http://www.unsj.edu.ar/arquitect/FAUD.htm>

**RESUMEN:** Se presenta un modelo simple, del tipo energía-emisión, para calcular el impacto ambiental causado por el ahorro en combustibles convencionales mediante el uso de hasta 100 Sistemas Integrados (SI) compuestos por Sistemas Térmicos Solares (STS) y Sistemas Convencionales (SC), en forma conjunta, en un máximo de 20 localidades. La selección y ordenamiento de los criterios relacionales se realiza mediante la aplicación de métodos heurísticos y determinísticos. El software de soporte (MIATSOL) aplica cálculo matricial y permite obtener secuencial y separadamente, tanto la valoración económico-social en la vida útil de los SI, a través de los Costos Externos asociados, como la cuantificación anual de las emisiones producidas por tres contaminantes (CO<sub>2</sub>, Polvo, Polución Térmica) producidos por cinco tipos de combustibles (Diesel, Kerosén, Gas, Leña, Carbón). Se muestran algunos de los resultados que se obtienen en rangos de valores mínimos y máximos de costos e índices correlativos con demandas y calidades tecnológicas.

**Palabras clave:** Impacto ambiental, sistemas térmicos solares, modelo de evaluación

### **INTRODUCCION**

Un aspecto que completa el estudio de la factibilidad técnico-económica para determinar los Sistemas Térmicos Solares (STS) que son recomendables para una aplicación dada; es la confrontación con consideraciones ambientales, las cuales han adquirido en la actualidad peso propio.

Uno de los métodos de evaluación de impactos ambientales de productos, sistemas o servicios, más difundido es el método del Análisis del Ciclo de Vida (ACV). La cantidad y tipo de datos que requiere su uso en casos de cierta complejidad, hace que finalmente su aplicación sea limitada o restrictiva y en muchas oportunidades conduzca a interpretaciones erróneas de sus resultados (Arena, 1999). A diferencia del ACV, el modelo propuesto se centra en el análisis del período de uso de los sistemas y la energía directa interviniente, por ser el que generalmente alcanza mayor significación en términos de costos y energía. Para esta fase existen además una mayor disponibilidad de datos confiables. En el modelo no se consideran entonces, la energía utilizada para producir los sistemas, ni para desmantelarlos. Por otro lado se limita el campo de análisis de contaminantes a tres parámetros: CO<sub>2</sub>, polvo y polución térmica, producidos por cinco tipos de combustibles: Diesel, Kerosén, Gas, Leña y Carbón, realizando el cálculo técnico de la disminución de polución anual neta respectiva. El modelo se basa en la obtención de resultados comparativos entre los sistemas convencionales y sistemas integrados o mixtos con no convencionales.

Otros métodos de evaluación de impactos ambientales muy difundidos en los últimos años, son los basados en la valoración económico-social en el ciclo de vida de productos, sistemas o servicios, determinando Costos Sociales o Externos (Ferrá y Cortegoso, 1999). Estos presentan también incertidumbres y ausencia de datos para realizar cuantificaciones precisas. Entre los avances logrados en esta dirección se puede mencionar la definición de criterios que permiten estimar primeros valores de índices (Hohmeyer, 1990, 1991, 1992), que se encuentran aún en discusión. Se consideran Costos Sociales a todos aquellos "costos de producción y consumo que son pasados a terceras partes de la sociedad, como resultado de toda actividad económica irrestricta", entre ellos se incluyen los costos por daño forestal, daños a la salud humana, subsidios de investigación y desarrollo, subsidios gubernamentales para tecnologías energéticas, la sobrecarga por agotamiento de los recursos fósiles, los gastos por depósitos de residuos contaminantes, etc. Este es el otro tipo de evaluación que incluye el modelo propuesto, bajo las limitaciones antes descritas.

### **METODOLOGIA**

El análisis técnico de la disminución de polución anual, logrado por el ahorro en consumo de combustibles convencionales, se realiza partiendo del cálculo de las respectivas cargas térmicas anuales y de referencia para cada STS, obtenidas mediante el uso del programa FTSOL (Blasco y Garcés 1996). El consumo de combustibles considerado en el modelo es el utilizado en procesos de combustión de maquinaria mediana a pequeña, por lo tanto se toman factores de emisión promedio para cada combustible, considerándolos constantes para todos los sistemas analizados.

El análisis económico-social del modelo propuesto utiliza los mismos métodos explicados en Blasco y Garcés (1997), incluyendo en este caso los Costos Sociales o Externos, inherentes a la contaminación ambiental; a lo largo de la vida útil de los sistemas. Estos costos se obtienen a partir de los valores anuales, multiplicando la carga energética anual provista por cada Sistema Convencional (de referencia) SC, por el índice de costos sociales por unidad de energía producida, calculado por el Dr. Olav Hohmeyer. Se asume la hipótesis de complementación entre sistemas convencionales y solares, conformando Sistemas Integrados (SI), compatibilizando criterios en ambos casos, para facilitar las evaluaciones comparativas. Los resultados obtenidos, son utilizados como valores de referencia, que podrían llegar a influir en una toma de decisión, en caso de que el aspecto ambiental sea el preponderante. Adicionalmente, se adopta el criterio de utilizar valores mínimos y máximos de los costos e índices considerados, con el fin de analizar bajo este aspecto un rango amplio de posibilidades de respuestas tecnológicas económicamente adecuadas para las localidades analizadas.

La versión informatizada del modelo (MIATSOL = Micro-análisis Ambiental Térmico-Solar) está realizada en lenguaje Turbo Pascal, para ser usado en PC. Permite el cálculo conjunto de 50 (cincuenta) STS, combinados y comparados con 50 (cincuenta) SC, para 20 (veinte) localidades; y se ha desarrollado mediante trabajo en equipo con especialista en programación.

### ESTRUCTURA DE CALCULO ANUAL

La estructura del cálculo matricial anual se representa esquemáticamente en la Fig. 1. Los factores de emisión fueron extraídos de GEMIS, 1998 y se adopta el índice de Costo Social propuesto por Hohmeyer (1992).

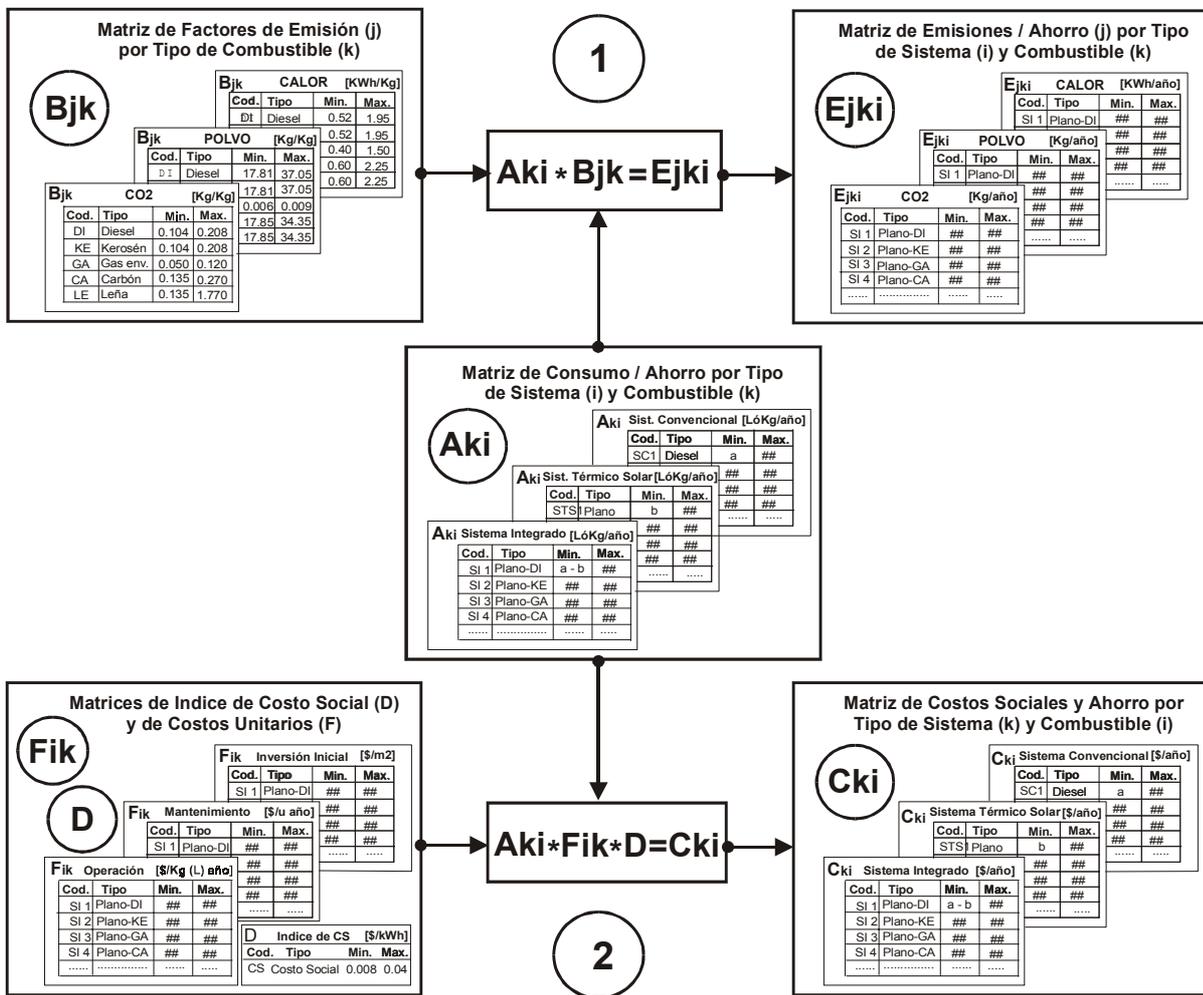


Fig. 1. Representación esquemática de la estructura del cálculo matricial anual

### PROGRAMA "MIATSOL"

La estructura del programa es de tipo modular, y la interrelación entre los módulos se esquematiza en la Fig. 2.

#### Datos de Entrada:

Se utilizan matrices de: cargas anuales térmicas de STS y referencia (salidas del Programa FTSOL); características de combustibles tradicionales (peso específico, poder calorífico, precio unitario y emisiones), rendimiento de equipos

convencionales, área de Colección de STS, precio unitario de tecnología solar, costos de los equipos convencionales, parámetros econométricos (tasas de interés, inflación y descuento), valor residual, costos de mantenimiento y reparación, vida útil e índice de Costo Social. En los resultados que se presentan, se aplica una tasa de interés del 8%, como hipótesis de variación del precio unitario de combustibles.

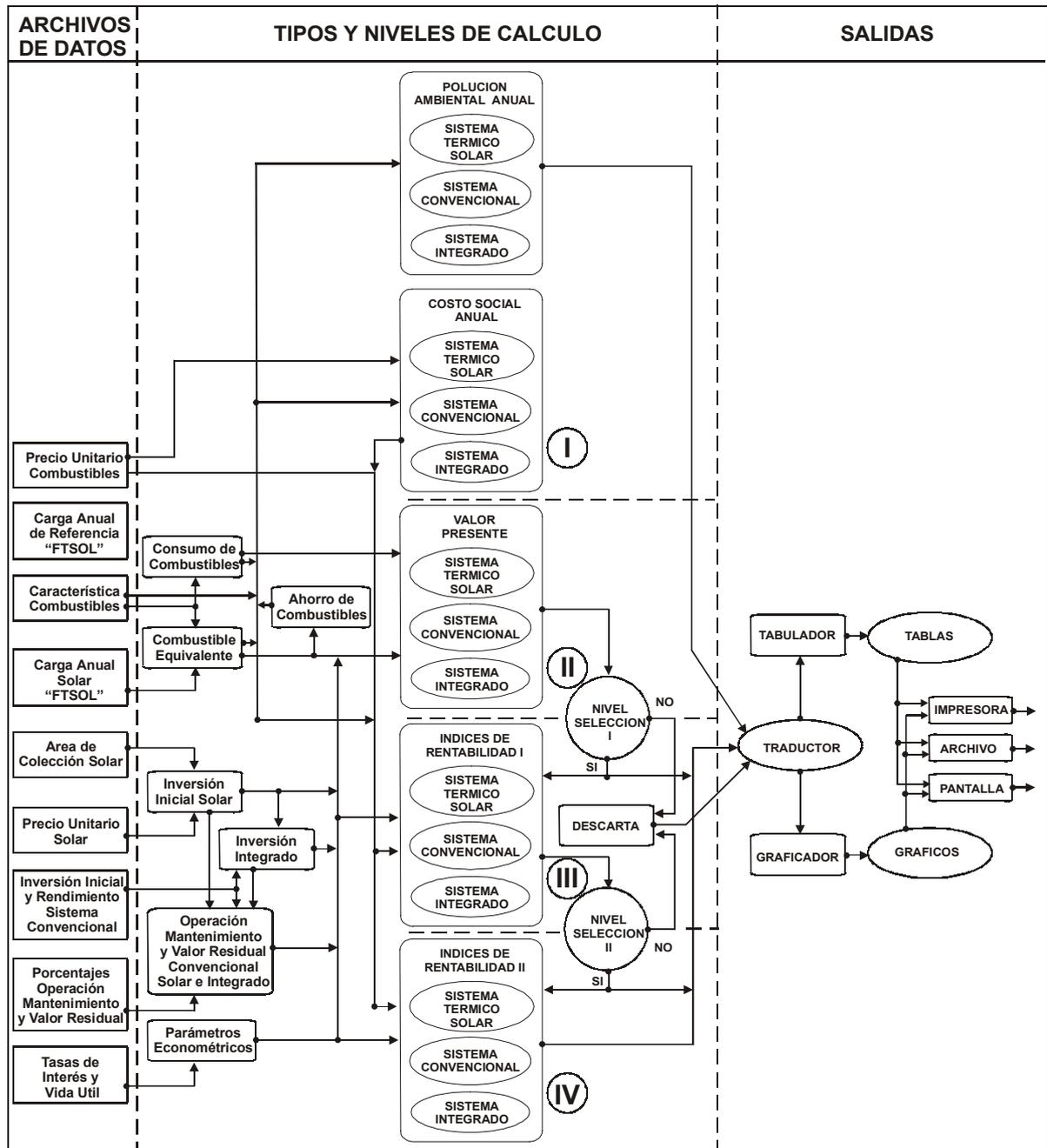


Fig. 2. Diagrama de Interrelación de módulos y flujo de datos.

**Bloques de Cálculo:**

Como puede visualizarse en la Figura 2, se ejecutan diferentes tipos y niveles de cálculo. El cálculo anual correspondiente al primer nivel, está representado en la Fig. 1, donde se puede observar los dos tipos de cálculo que realiza. Para ello hace uso de los archivos de datos de carga anual solar y de referencia obtenidos con el programa FTSOL y de las características de combustibles y obtiene los consumos anuales de combustible de SC, los equivalentes de STS y el ahorro posible con estos últimos. Con estos archivos de resultados y el archivo de características de combustibles, calcula por un lado la Polución Ambiental Anual de los STS, SC, y SI; y por otro los Costos Sociales o Externos Anuales respectivamente. El segundo nivel corresponde a la fase de uso del ciclo de vida y utiliza los archivos de resultados del primer nivel de cálculo, para obtener el valor presente (PV2) con costo social de los STS, SC, y SI; ejecutando la primera selección. El tercer nivel calcula los índices de rentabilidad (SIR2 y ROI2) a los sistemas que resultaron competitivos; efectuando la segunda selección. El cuarto nivel calcula el resto de los índices de rentabilidad a los sistemas seleccionados.

### Salidas de Resultados:

Los resultados pueden visualizarse en forma de tablas y/o de gráficos, ya que se implementaron sendos subprogramas para tales fines. A modo de ejemplo se muestran las Tablas 1 a 5 y las Figs. 3 y 4.

### EJEMPLOS RESUELTOS

Se aplica la metodología para el cálculo matricial conjunto de 21 STS, comparados con 43 SC, para satisfacer 12 demandas, conformando 79 SI. Por limitaciones de espacio es imposible incluir los datos detallados de todos, pero a modo de salvedad se utilizan los mismos ya explicitados en Blasco y Garcés, 1996, 1997. Se incluyen resultados obtenidos para la localidad 5 (Iglesia) de la Provincia de San Juan – Argentina, de las 5 localidades analizadas. Las Tablas 1 y 2 contienen códigos y descripciones de los STS y SC que resultaron seleccionados en su combinación de SI para medianos inversores (Ii: Inversión inicial > \$4000 y < \$20000).

STS	Descripción Sistema Térmico Solar
8	Colector plano de agua con termo-circulación forzada, mediante paneles, para calefacción de ambientes habitables (Sistema Activo)
15	Colector plano de aire con termo-circulación natural, mediante invernadero, para calefacción de ambientes agrícolas (Invernáculo)
17	Colector plano de aire con termo-circulación forzada, mediante paneles, para deshidratación de productos no agrícolas (Secadero solar)
18	Colector plano de aire con termo-circulación forzada, mediante paneles, para calefacción de ambientes habitables
19	Colector plano de aire con termo-circulación forzada, mediante ductos, para calefacción de ambientes habitables
21	Colector plano de aire con termo-circulación forzada, mediante ductos para deshidratación de productos no agrícolas (Secadero solar)

Tabla 1. STS seleccionados para medianos inversores

SC	Descripción Sistema Convencional
24	Estufa a Gas para Calefacción de Ambientes Habitables
27	Estufa a Carbón para Calefacción de Ambientes Habitables
32	Estufa a Gas para Calefacción de Ambientes Agrícolas
33	Estufa a Kerosén para Calefacción de Ambientes Agrícolas
34	Estufa a Leña para Calefacción de Ambientes Agrícolas
35	Estufa a Carbón para Calefacción de Ambientes Agrícolas
40	Horno a Diesel para Deshidratación de Productos
41	Horno a Gas para Deshidratación de Productos
42	Horno a Leña para Deshidratación de Productos
43	Horno a Carbón para Deshidratación de Productos

Tabla 2. SC seleccionados para medianos inversores

Las Tablas 3 y 4 contienen en la primera columna el código de SI que define la combinación de STS y SC expresada en la segunda columna. Los resultados se ordenan en forma ascendente con doble criterio, primero por la inversión inicial (Ii) y luego por el Valor Presente sin costos sociales (PV1), pudiendo visualizar la diferencia que existe respecto a los criterios de cálculo que no consideran aspectos ambientales. En la Tabla 3 se aprecian los resultados anuales mínimos de polución y costos sociales correspondientes a los SI. Las siglas indican: CO2: Anhídrido carbónico, Polvo: Partículas en suspensión, Calor: Polución térmica, ACS: Ahorro anual considerando Costo Social, GCS: Gasto anual considerando Costo Social.

Códigos		Disminución o Ahorro Anual				Polución y Gasto Anual			
SI	STS-SC	CO2 [Kg/año]	Polvo [Kg/año]	Calor [kWh/año]	ACS [\$/año]	CO2 [Kg/año]	Polvo [Kg/año]	Calor [kWh/año]	GCS [\$/año]
78	21-42	5212,22	689171,37	23165,42	9428,33	2294,05	303323,72	10195,76	4149,67
79	21-43	4562,09	603210,21	20275,97	9428,33	2007,91	265489,79	8924,03	4149,67
67	18-27	3182,30	404859,28	26519,17	19557,13	337,43	44615,59	1499,68	885,87
64	18-24	1357,90	101,84	16973,72	7822,85	70,07	8,41	560,57	354,35
77	21-41	947,38	113,69	7579,04	3771,33	417,00	50,04	3335,75	1659,87
54	15-34	3089,81	408541,74	13732,50	3315,92	2556,83	338069,92	11363,70	2743,94
55	15-35	2704,42	357583,85	12019,63	3315,92	2237,92	295902,06	9946,30	2743,94
53	15-33	736,82	126181,11	3684,12	1989,55	1019,70	174622,51	5098,50	1646,36
76	21-40	1369,36	234503,03	6846,80	5657,00	813,60	139328,56	4068,00	2489,80
52	15-32	561,61	67,39	4492,87	1326,37	464,73	55,77	3717,87	1097,58
28	8-27	782,90	103515,69	3479,52	2055,37	295,11	39020,02	1311,60	774,77
68	19-24	137,91	16,55	1103,27	697,40	85,95	10,31	687,63	434,66
25	8-24	162,58	19,51	1300,62	822,15	61,28	7,35	490,27	309,91
62	17-42	5626,87	743996,59	25008,29	10178,37	1879,40	248498,50	8352,89	3399,63
63	17-43	4925,02	651197,01	21888,98	10178,37	1644,98	217502,98	7311,03	3399,63
60	17-40	1516,42	259686,42	7582,09	6107,02	666,54	114145,17	3332,71	2039,78
61	17-41	1022,75	122,73	8181,97	4071,35	341,60	40,99	2732,82	1359,85

Tabla 3. Resultados anuales mínimos de polución y costos sociales para medianos inversores de la localidad 5

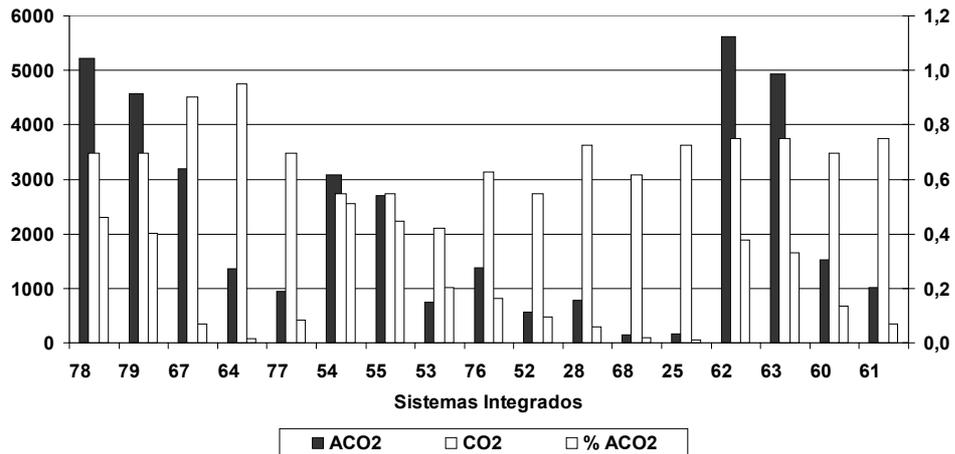


Fig. 3. Resultados mínimos de disminución de contaminación de CO2 anual, para medianos inversores de la localidad 5

En la Fig. 3 se representa la respectiva disminución en valores absolutos (ACO2) y en valores relativos (% ACO2) y la contaminación anual (CO2). En la mayoría de los casos los SI competitivos acusan una reducción de contaminación ambiental y costo social anual que varía entre el 40% y 95%.

SI	STS-SC	li [\$]	PV2 [\$]	PNS2 [\$]	AV2 [\$]	AN2 [\$]	SIR2 [-]	US2 [\$/kWh]	ROI2 [años]
78	21-42	4000	39327	46395	5265	6211	5,64	0,11	2
79	21-43	4000	45753	60995	6125	8166	7,10	0,13	2
67	18-27	4030	10211	8841	1367	1184	3,21	0,14	3
64	18-24	4177	9562	6727	1280	901	2,68	0,13	3
77	21-41	5000	44244	53285	5923	7134	6,33	0,13	2
54	15-34	5147	26735	20580	3579	2755	5,12	0,22	2
55	15-35	5147	33897	29235	4538	3914	6,85	0,27	2
53	15-33	5275	23565	16643	3155	2228	4,33	0,19	3
76	21-40	5500	35418	33230	4742	4449	4,32	0,10	3
52	15-32	5733	34439	29403	4611	3937	6,88	0,28	2
28	8-27	6100	11568	7484	1549	1002	2,25	0,15	4
68	19-24	6600	12793	3496	1713	468	1,58	0,20	5
25	8-24	6600	11039	5249	1478	703	1,88	0,14	5
62	17-42	11000	32698	53024	4378	7099	7,63	0,09	2
63	17-43	11000	37962	68786	5082	9209	9,60	0,10	2
60	17-40	12500	29836	38812	3994	5196	5,85	0,08	2
61	17-41	12500	37067	60462	4962	8095	8,56	0,10	2

Tabla 4. Resultados mínimos del cálculo con costos sociales en la fase de uso, para medianos inversores de la localidad 5

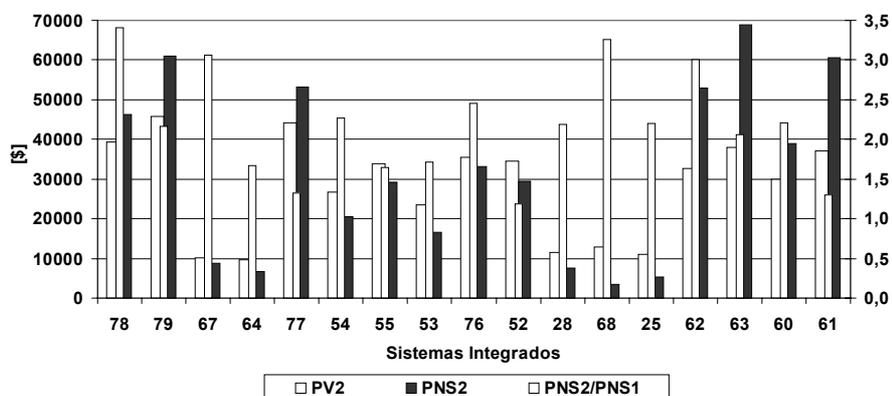


Fig. 4. Resultados mínimos de PV2, PNS2 y PNS2/PNS1, para medianos inversores de la localidad 5

Los resultados mínimos correspondientes al cálculo en la fase de uso (20 años) del ciclo de vida se muestran en la Tabla 4 y la Fig. 4. Los códigos indican: Ii: Inversión inicial; 1: sin Costo Social; 2: con Costo Social; PV: Valor Presente; PNS: Beneficio Neto; AV: Valor Anual; AN: Valor Anualizado Neto; SIR: Beneficios-Costos; US: Costo por Unidad de Energía; ROI: Tiempo de Amortización. El orden de los SI conforme a ellos, se altera respecto al mismo sin incluir costo social. En orden decreciente de importancia, los SI son competitivos ahora, cuando están complementados con tecnología convencional accionada por leña, kerosén ó diesel, carbón y gas envasado, prácticamente inverso al resultado obtenido mediante los criterios de cálculo convencionales. La Tabla 5 resume las cantidades por tipos de SI, STS y SC obtenidas por niveles de inversión en la localidad 5, los respectivos factores de mejora de los índices de rentabilidad y los valores relativos de las disminuciones (%A) de contaminación.

Inversor	Ii	SI	STS	SC	PNS2/PNS1	SIR2/SIR1	ROI2/ROI1	%ACO2	%APolvo	%AColor
Pequeño	< 4000	33	10	35	2,79	1,88	0,70	0,68	0,66	0,68
Mediano	< 20000	17	6	10	2,18	1,70	0,76	0,68	0,68	0,69
Grande	> 20000	9	3	4	2,30	1,70	0,75	0,77	0,81	0,77

Tabla 5. Resultados obtenidos por niveles de inversión en la localidad 5

## CONCLUSIONES

El modelo completa con la consideración de aspectos ambientales y económico-sociales, el análisis técnico-económico conjunto de una amplia gama de SI, STS y SC presentado en Blasco y Garcés, 1996; 1997 e iniciado en Blasco y Morales 1992; 1993. Resulta apropiado para realizar estudios de sensibilidad, variando tanto las hipótesis utilizadas, como la cantidad y tipos de sistemas estudiados. Posee gran versatilidad por su composición modular, permitiendo la introducción de cambios en la estructura del mismo para adaptarlo a la evolución tecnológica y de conocimientos. Relaciona en forma sistemática y consistente tres elementos: a) Consumo anual de combustibles, b) Emisiones anuales de 3 contaminantes producidos por 5 tipos de combustibles y c) Costo Social en el periodo de uso del ciclo de vida. El software de soporte MIATSOL posee gran velocidad de cálculo, aún usando modesto hardware. Los datos de entrada que requiere son pocos y sencillos, pudiendo ser elaborados en cualquier editor de textos. Presenta los resultados en gráficos o tablas, compatibles con planillas de cálculo (EXCEL ó similar) y bases de datos (ACCESS, etc.) para facilitar la ejecución de otros tipos de análisis. La aplicación realizada demuestra el orden de magnitud de la importancia de los efectos ambientales positivos posibles de lograr con el uso de los SI analizados.

## REFERENCIAS

- Arena P. (1999). Un Instrumento para el Análisis y Evaluación Ambiental de Productos y Tecnologías: El Análisis de Ciclo de Vida. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 3, N° 2, pp. 8.69-8.72 y 8.93-8.100.
- Blasco I. y Morales R. (1992). Elaboración de Metodologías de Análisis y Planificación para Evaluar la Contribución Real del Uso de la Energía Solar en el Balance Energético Total y Sectorial. Aplicación a Escalas Piloto. Actas XV ASADES; Vol. I, pp. 267-274, Catamarca, Argentina.
- Blasco I. y Morales R. (1993). Preparation of Analysis and Planning Methodologies to Evaluate Solar Energy Actual Contribution in Total and Sectorial Energy Balance. Application in Sample Scales. Abstracts of The ISES Solar World Congress, Vol. I; pp. 329-334, Elsevier Science, Budapest, Hungary.
- Blasco I. y Garcés F. (1996). Metodología para Determinar la Fracción Solar Mensual y Anual de una Amplia Gama de Sistemas Térmicos Solares. Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 1, pp. 49-56.
- Blasco I. y Garcés F. (1997). Método de Análisis Microeconómico de Varios Tipos de Sistemas Térmicos Solares. Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 2, pp. 33-43.
- Ferrá C., Cortegoso R. (1998). Evaluación Social de Proyectos. Fac. Ciencias Económicas, UNMza.
- GEMIS (1998). GesamtEmissionsModell Integrierter Systeme, V3.08, Ökoinstitut, Darmstadt, BRD.
- Hohmeyer O. (1990). Stand der Internationalen und Nationalen Diskussion der Sozialen Kosten Verschiedener Energietechnologien. Proceedings of the 7. Internationales Sonnenforum, Band III, Frankfurt.
- Hohmeyer O. y Ottinger R. (1991). External Environmental Costs of Electric Power. Springer-Verlag; Berlín.
- Hohmeyer O. (1992). Renewables and the Full Costs of Energy; Energy Policy. Springer-Verlag; Berlín.
- West R. and Kreith F. (1988). Economic Analysis of Solar Thermal Energy Systems, MIT Press, Massachusetts.

**ABSTRACT: MODEL TO EVALUATE THE ENVIRONMENTAL IMPACT CAUSED BY THE USE OF SEVERAL SOLAR THERMAL ENERGY SYSTEMS.** A simple energy-emission model is developed in order to calculate the environmental impact caused by saving of fuel's consumption through the use of up to 100 combined systems (SI) with solar thermal energy systems (STS) and conventional systems (SC), as a whole, in up to 20 localities. The selection and ordering of link's criteria is defined by means of heuristic and deterministic methods. The support software (MIATSOL) apply matrix calculation allowing sequentially and in separated way, the social-economic valuation of the use phase of all the analysed systems, using associated external costs, as well as the annual quantification of the pollution produced due to three emission's type and five kinds of fuels. Some of the results, which are obtained in ranges between minimum and maximum values of costs and indexes, correlated with demands and technical qualities, are showed.

**Keywords:** environmental impact, solar thermal energy systems, assessment model

**Agradecimiento:** Especial reconocimiento al programador Ricardo Morales por su importante contribución al presente trabajo.