

SISTEMA AUTÓNOMO PARA REGISTRAR LA IRRADIANCIA SOLAR

García G.N.*, Liria J.G.*, González S.*, Zarzalejo L. F.**,
Valenzuela R. X.***, Wilbert S.***

* Plataforma Solar de Almería (PSA). Ctra. de Senés, km. 4.5, E04200 Tabernas, Spain.

** Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT).
División de Energías Renovables. Avda. Complutense 40, 28040 Madrid (España).

*** German Aerospace Center (DLR). Institute of Solar Research. Ctra. de Senés, km. 4.5,
E04200 Tabernas, Spain.

RESUMEN

Presentamos un sistema de bajo mantenimiento para registrar la irradiancia solar en lugares remotos o de difícil acceso, con un piranómetro de termopila ventilado, una banda rotatoria de sombreado y una estructura con soportes móviles. Se diseña para trabajar autónomamente con medios para limpiar el cristal esférico del sensor mediante soplado con aire comprimido y cepillado; medios de guiado de la banda de sombreado y brazo de protección; medios de alimentación que comprenden una batería y un panel solar; medios de control con una tarjeta de electrónica acoplada con los medios de guiado para posicionar la banda de sombreado respecto del sensor y establecer intervalos de medida en sol y en sombra, según situación geográfica, fecha, momento del día y tiempo de respuesta del sensor. Medios de adquisición registran las medidas realizadas y se almacenan en memoria.

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Irradiancia solar, recurso solar, metrología

ABSTRACT

We present a low maintenance system to record the solar irradiance in remote places or difficult access, with a ventilated thermal pyranometer, a rotating shadowband and a structure with movable supports. It is designed to work autonomously with a cleaning device that cleans the spherical glass of the sensor by blowing with compressed air and brushing; a rotating shadowband and a protection arm; a power supply comprising a battery and a solar panel; a control device with an electronic card coupled with the guiding means to establish the position of the shading band with respect to the sensor and to establish measurement intervals in sun and shadow conditions, according to geographical location, date, time of day and response time of the pyranometer. A data acquisition device records the measurements made and these are stored in memory.

KEYWORDS: Solar Energy, solar irradiance, solar resource, metrology

INTRODUCCIÓN:

Los proyectos de plantas solares a gran escala requieren del conocimiento previo de los recursos solares existentes en las zonas donde pueden implantarse con garantía. Ello requiere un banco de datos histórico de varios años de las condiciones de irradiancia solar del lugar, que avalen la financiación necesaria para la construcción de las plantas solares.

En la actualidad hay una gran carencia de mediciones de irradiación solar en grandes y extensas zonas del planeta. Por este motivo son utilizados datos tomados desde satélite en combinación con datos de campo de un periodo corto (al menos un año) para estimar la variabilidad interanual y los valores medios a largo plazo. Las medidas tomadas en tierra son necesarias porque tienen una mayor precisión que los datos de satélite.

Es importante disponer de datos tomados en tierra para garantizar las financiaciones necesarias. Los radiómetros más exactos necesitan mantenimiento manual diario, sobre todo para la limpieza de los cristales de apertura. A menudo los lugares de interés para plantas solares grandes están aislados con dificultad de acceso y en climas secos. Por eso son necesarios sistemas de medición más robustos que requieren menos mantenimiento.

El objeto del dispositivo descrito en este documento pretende dar una posible solución a estas necesidades por lo que se propone un sistema especialmente diseñado para la medición y registro de una base histórica de datos de irradiancia solar en lugares aislados con dificultad de acceso, que pueda funcionar sin asistencia.

Este dispositivo ha sido diseñado y construido en la Plataforma Solar de Almería y, en la actualidad, CIEMAT lo tiene patentado (García et al., 2017)

ESTADO DE LA TECNICA:

Las tecnologías de concentración solar emplean la irradiancia solar directa, DNI (*Direct Normal Irradiance*) para, mediante el empleo de espejos, poder obtener altos flujos de energía solar concentrada al objeto de producir, mediante procesos térmicos a alta temperatura, grandes cantidades de energía eléctrica entre otras, de forma eficiente. Es por ello que se requiere del conocimiento de los niveles históricos de irradiancia solar directa en los emplazamientos más idóneos para su implantación, así como su medición continua durante los periodos de producción de las mismas.

Para la medición precisa de la irradiancia solar directa, DNI, se emplean pirheliómetros que necesitan estar permanentemente orientados al sol con gran precisión mediante seguidores solares y de un mantenimiento diario para garantizar el funcionamiento y la limpieza del sensor, lo que complica su utilización continuada en zonas apartadas o de difícil acceso. Para medir al irradiancia global horizontal (GHI) se aplican piranómetros. Los piranómetros más precisos son piranómetros con un sensor termopila.

Otros equipos empleados para la medida de la DNI y GHI son los *Rotating Shadowband Irradiometer*, RSI, los cuales son más económicos y requieren menos cuidados/limpiezas (Maxwell et al., 1999, Pape et al., 2009) pero necesitan igualmente limpiezas periódicas del sensor y son más imprecisos ya que, en la actualidad, la mayoría de ellos emplean un fotodiodo de silicio cuya respuesta está limitada a una pequeña parte del espectro solar, luz visible e infrarrojo cercano. Su insensibilidad, a parte del espectro solar, los hace imprecisos y dependientes de condiciones atmosféricas determinadas por la presencia de

aerosoles, vapor de agua precipitable y nubes. Otros errores sistemáticos aparecen por cambios de la temperatura y del ángulo de incidencia. Es necesario aplicar correcciones (e.g. Vignola et al., 2006, Geuder et al., 2011) para estas influencias, pero incluso con las correcciones queda una incertidumbre adicional (Geuder et al., 2014, Wilbert et al., 2016).

Estos equipos emplean un único sensor para la medición de las tres componentes de la irradiancia solar (directa, global y difusa), el cual obtiene una medición de la irradiancia horizontal en condiciones de sol y sombra. Actualmente se disponen de varios RSIs en el mercado con características similares. Los más conocidos son:

- Modelo RSP-4G (Rotating Shadowband Pyranometer) de “Reichert GmbH”
- Modelo RSR-2 (Rotating Shadowband Radiometer) de “Irradiance, Inc.”
- Modelo Twin-RSI (Twin Rotating Shadowband Irradiometer) “CSP Services GmbH”
- Modelo: SDR-1 (Single Detector Rotating Shadowband Radiometer) de “Yankee”

Todos estos equipos emplean un fotodiodo como elemento sensor que, generalmente, es el modelo LICOR-LI200. Estos sensores se caracterizan por su alta sensibilidad y pequeño tiempo de respuesta, lo que les permite adaptarse a rápidas y bruscas variaciones de la irradiancia solar. Esta característica se aprovecha para tomar medidas de la irradiancia solar en condiciones de sol y sombra gracias al paso de una estrecha banda que sombra por unos instantes el sensor durante su movimiento rotativo. En el caso del Twin-RSI, controlando la velocidad de la banda, puede determinarse el tamaño del disco solar en función del tiempo de sombreado (ver fig.1).



Fig.1. Twin RSI (CSPS)

Otro RSI's, como el TSR de Yankee, emplea un piranómetro de termopila pero de características limitadas debido a su pequeño tamaño, rápida respuesta y altos errores de coseno para ángulos cenitales de 0-80°, y no es adecuado para lugares con temperaturas muy elevadas. El modelo PRB-100 de Prede puede incorporar piranómetros de termopila más precisos pero a un precio muy elevado y con los problemas de mantenimiento, ya que ninguno de los RSI's mencionados dispone de sistemas de protección y limpieza automática. por lo que no son actos para trabajar sin asistencia.

DESCRIPCIÓN DEL DISPOSITIVO:

A la vista de lo anterior, sería deseable contar con una solución capaz de registrar la irradiancia solar que mejorase las limitaciones existentes. En particular, un dispositivo del tipo RSI que cubra un mayor espectro de longitudes de onda, con errores más pequeños por efectos de temperatura y ángulo de incidencia y que pueda operar fiablemente más tiempo de forma autónoma y sin revisiones de mantenimiento. Este dispositivo, así concebido, se denomina “Autonomous *Rotating Shadowband Irradiometer*”, en adelante, ARSI.

Con este objetivo se propone un sistema especialmente diseñado para trabajar de forma autónoma y para registrar la irradiancia solar que emplea un piranómetro Kipp&Zonen modelo CMP22 para medir la irradiancia solar incidente, con una banda de sombreado móvil. El sistema cuenta con medios de limpieza preventiva, mediante ventilación forzada, y activa para limpiar el sensor mediante cepillado y soplado con aire comprimido, medios

de protección ante inclemencias meteorológicas y medios de guiado de la banda de sombreado para efectuar medidas en diversas condiciones de sombra y sol.

Una unidad de control gobierna los medios de protección y limpieza para garantizar la seguridad y las condiciones óptimas de medida del sensor, y los medios de guiado para fijar la banda de sombreado respecto del sensor y para establecer ciclos con sombra y con sol, de acuerdo con la latitud y el momento del día, donde la duración de los ciclos tiene en cuenta el tiempo de respuesta de un piranómetro térmico del tipo termopila.

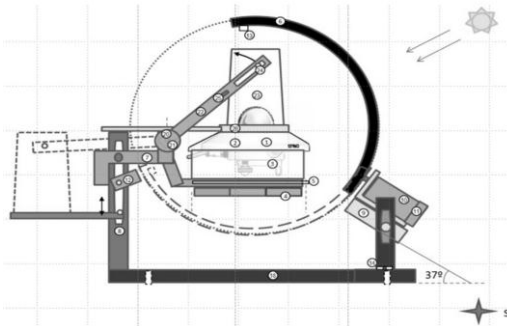


Fig.2. Dispositivo ARSI

Como muestra la fig.2, el dispositivo de sombreado consta de una estructura especial al objeto de posicionar el ojo de un piranómetro CMP22 en el centro de la esfera descrita por una banda metálica en forma de arco y pintada de negro, que gira mediante un motorreductor inclinado a la latitud del lugar.

Con el dispositivo soleado, la banda gira hasta una posición en la que se proyecta su sombra sobre el sensor y permanece allí un tiempo suficiente al objeto de que el sensor

se acomode a las nuevas condiciones de luz y realice una medición de la irradiancia solar en sombra. Transcurrido este tiempo, la banda se esconde bajo el sensor durante un tiempo para permitirle la medición en condiciones de soleado.

Para obtener mediciones más precisas del piranómetro, éste se mantiene ventilado mediante tres pequeños ventiladores y sus medidas se ajustan debido a la dependencia de su sensibilidad con la temperatura ambiente y con la variación de la irradiancia.

La ventilación del equipo reduce la deposición de partículas encima del cristal del sensor, lo que le mantiene más limpio durante el día. Un dispositivo de protección, se estaciona sobre el sensor en periodos nocturnos o de condiciones climáticas adversas como lluvia ligera o fuerte viento protegiéndole de éstas y evitando un deterioro o suciedad.

Este dispositivo de protección dispone de un sistema activo de limpieza, mediante el soplado de aire a presión sobre el cristal y el cepillado simultáneo del mismo mediante un rodillo/cepillo contenido en el interior del contenedor, accionado por un motor eléctrico, que se activa al comenzar el día para asegurar la limpieza del cristal del sensor durante la jornada de medición. Se dispone de un compresor de aire que carga un pulmón a 1,2 bar y de una electroválvula para producir el soplado. La fig.3 muestra el dispositivo en operación rutinaria y en posición de protección por lluvia.



Fig.3. Vista en operación y en protección

Gracias a lo anterior, el sistema ARSI requiere bajo mantenimiento y asegura la protección y la limpieza. Dispone de alimentación autónoma, preferiblemente mediante un panel fotovoltaico, un cargador y una batería eléctrica que, junto con las características anteriores, le permiten trabajar en lugares de difícil acceso, sin asistencia y por largos periodos de tiempo. Eso también es posible ya que dispone de un almacenamiento permanente en una tarjeta de memoria SD, la cual es capaz de conservar los datos obtenidos de irradiancia y de otras variables meteorológicas durante largos periodos de tiempo. Opcionalmente se puede conectar un modem para obtener los datos diariamente.

FUNCIONAMIENTO:

A la salida del Sol, el control acciona el sistema de limpieza y de protección mediante la carga del pulmón de aire, el movimiento oscilante del brazo de protección, el soplado y el barrido del cepillo sobre la ventana del sensor. Una vez realizada la limpieza se procede a la retirada del contenedor del sensor y se activan los ventiladores dando comienzo el ciclo de movimiento de la banda, registrándose los datos obtenidos en cada ciclo de medida.

En el ocaso, se activa el modo de defensa y la banda se recoge en la parte inferior del sensor permaneciendo allí durante toda la noche, se paran los ventiladores y se acciona el sistema de protección, posicionando el contenedor sobre la ventana del sensor, protegiendo ésta durante el periodo nocturno. Durante este periodo los datos siguen registrándose.



Fig.4. Interruptor de viento

Al objeto de proteger la ventana del sensor de la suciedad, de la humedad y de los agentes externos tales como viento, abrasión, lluvia ligera, etc., el equipo decidirá la activación del sistema de limpieza y protección cuando sea necesario gracias a los datos suministrados por un sensor de Clima y por un interruptor de viento, el cual detecta vientos peligrosos por ensuciamiento o abrasión del cristal (ver fig.4.)

El dispositivo ARSI emplea un CMP22, uno de los mejores piranómetros del mercado, que tiene un rango espectral de 200 a 3800nm, con un pequeño error por temperatura y por coseno y un tiempo de respuesta de 5 segundos. Para resolver su lenta respuesta se ha desarrollado un control de sombreado cíclico complejo que adapta el tiempo de respuesta del sensor a los periodos de sol y de sombra.

Una vez medidas la irradiancia global horizontal, GHI, tomada en condiciones de sol y la irradiancia difusa horizontal, DHI, en condiciones de sombra, corregida por un factor de banda, FB, originada por la obstrucción de la misma sobre la superficie de la esfera, se determina la irradiancia normal directa, DNI, mediante la ecuación:

$$DNI = ((GHI - (DHI * FB * FC) / \text{SENO}(\alpha)); \quad \text{Ec. (1)}$$

Siendo: * Altura solar del lugar en radianes, α

* El factor de Banda, **FB**, es mínimo en el orto y ocaso del día y adopta un valor máximo en el mediodía. Varía dependiendo de las dimensiones constructivas del equipo y de la posición de la banda a lo largo del día. Este factor se aplica al valor de la irradiancia difusa horizontal, DHI, y corrige la obstrucción de la banda sobre el hemisferio celeste vista por el sensor en cada instante.

* El factor de Claridad, **FC**, es mínimo en días despejados y máximo en días con fuerte neblina y depende de las condiciones de la atmósfera caracterizadas por el índice de claridad y de la fracción de difusa en el lugar de ensayo.

Una tarjeta electrónica es gobernada por microcontrolador asistido con un reloj RTC, un convertidor ADC de 24bits y una tarjeta SD de 32Gb para realizar todas las funciones operativas y de cálculo del vector solar con precisión de ± 20 segundos de arco, así como procesos de medida, protección, ventilación y limpieza, ciclos de sol/sombra, lectura, procesado y almacenamiento de los datos y cálculo y control de posición de la banda. El convertidor ADC puede medir la radiación solar con un error menor al 0,2% y dispone de 8 canales que se leen cada dos segundos registrándose, cada minuto, los valores mínimo, medio y máximo pudiéndose almacenar hasta 200 días con grabaciones cada minuto

Una vez obtenidos los valores de la irradiancia en condiciones de sol y sombra, se aplica la ecuación Ec.(1) para la determinación de la irradiancia directa considerando la elevación solar del momento y aplicando el factor de Banda, FB, y el factor de Claridad, FC.

La tarjeta de control emplea una línea serie MODBUS para comunicarse con un sensor de Clima, con un modem o con un PC desde el que se realiza la programación y configuración del equipo, así como el salvado de los datos almacenados en la tarjeta SD.

Los datos procedentes del sensor de Clima se emplean, además de para su registro y enriquecimiento de la base de datos, para la determinación de situaciones peligrosas y para permitir al equipo su autoprotección mediante el movimiento del brazo a la posición de protección. Situaciones tales como:

- Detección de vientos peligrosos y de tormentas de arena
- Detección de lluvia, nieve o granizo
- Baja temperatura ambiente, detección de heladas.
- Baja tensión de batería



Fig.5. Estación METAS

RESULTADOS DE LA INTERCOMPARACIÓN:

Durante el mes de abril y mayo de 2018 se realiza una campaña de intercomparación de los datos obtenidos por este dispositivo, ARSI, con los registrados por la estación METAS que se encuentra a escasos 25 metros dentro de la estación meteorológica de la PSA (figura 5).

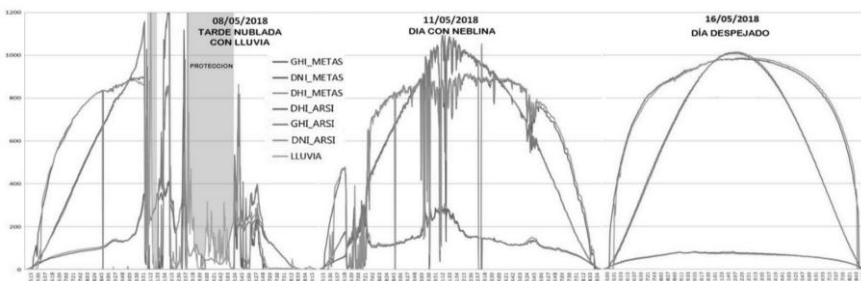


Fig.6. Intercomparación en días de diferentes condiciones meteorológicas

Esta estación consta en un seguidor SOLYS-2 equipado con un pirheliómetro CHP1, y dos piranómetros ventilados CMP21. Todos estos instrumentos, junto con el piranómetro CMP22 del dispositivo ARSI, fueron calibrados en el mes de julio de 2017 dentro de las actividades del proyecto SFERA 2.

Los datos registrados de la estación METAS corresponden a medias cada minuto de datos tomados cada segundo, mientras que los obtenidos por el dispositivo ARSI son valores puntuales tomados cada minuto, de forma que los datos DHI y GHI están desfasados entre sí 30 segundos, lo que corresponde con los periodos de sol y sombra. Esta circunstancia hace que rápidas variaciones de irradiancia ocasionadas al principio o final del día o ante el paso de nubes pueda afectar en la comparación produciendo retrasos o adelantos.

La figura 6 muestra la intercomparación en tres días de condiciones meteo diferentes observándose la coincidencia de los datos en la medida GHI y pequeñas diferencias en DHI y DNI ocasionadas por la variabilidad y por el error en la determinación del factor de claridad lo que puede suponer desviaciones no mayores del 5%.

RESULTADOS DEL SISTEMA DE PROTECCIÓN Y LIMPIEZA:

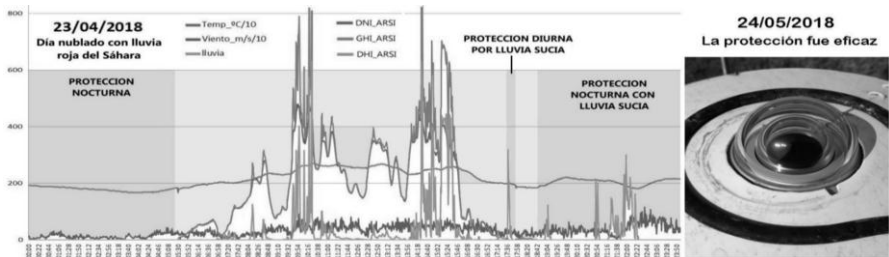


Fig.7. Auto protección ante lluvia sucia

Durante el periodo de ensayos, del 20 de abril al 17 de mayo, la limpieza del sensor ha sido realizada de forma automática por el sistema en el orto de cada día y en ningún caso se han realizado otras limpiezas. Los valores GHI_METAS y GHI_ARSÍ, de los tres días mostrados en la fig.6, muestran una gran similitud lo que indica que el cristal está limpio comparándolo con el de la estación METAS que es limpiado a diario por un operario.

El día 23 de abril aconteció una tormenta con polvo y arena del desierto y el sistema fue capaz de auto protegerse convenientemente como indica la fig.7.

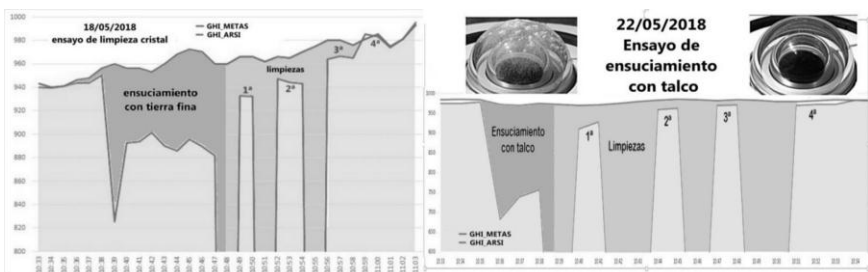


Fig.8. Ensayos de ensuciamiento con tierra fina local y talco

Los días 18 y 22 de mayo se realizaron ensayos de ensuciamiento mediante la deposición de tierra fina del lugar sobre el cristal del sensor GHI_ARSI y con polvos de talco. Como muestra la fig.8, la irradiancia recuperó los valores anteriores al ensuciamiento después de cuatro ciclos de limpieza automática.

CONCLUSIONES:

Los ensayos realizados indican que este dispositivo puede emplearse con éxito para la obtención de largas series de datos de irradiancia en lugares apartados donde la presencia humana es escasa. Los resultados muestran una gran aproximación con los datos obtenidos con estaciones meteorológicas estándares bajo supervisión. Los procesos de auto protección y auto limpieza han demostrado ser eficaces y mantienen el cristal del sensor en condiciones óptimas durante más tiempo. El equipo queda funcionando en demostración.

AGRADECIMIENTOS:

Se ha recibido financiación del Seventh Framework Programme de la Unión Europea (FP7/2007-2013) en virtud del acuerdo de subvención nº 312643.

REFERENCIAS:

- Ferrera Cobos, F., Valenzuela, R.X., Ramírez, L., Zarzalejo, L.F., Nouri, B., Wilbert, S., García, G., 2018. Assessment of the impact of meteorological conditions on pyrheliometer calibration. *Sol. Energy*. doi:10.1016/j.solener.2018.03.046
- Geuder, Norbert, Marja Hanussek, Johannes Haller, Roman Affolter, and Stefan Wilbert. 2011. Comparison of Corrections and Calibration Procedures for Rotating Shadowband Irradiance Sensors. Paper read at SolarPACES Conference, at Granada, Spain.
- Geuder, N, R Affolter, B Kraas, and S Wilbert. 2014. "Long-term Behavior, Accuracy and Drift of LI-200 Pyranometers as Radiation Sensors in Rotating Shadowband Irradiometers (RSI)." *Energy Procedia* no. 49:2330-2339.
- Ginés García, José Liria. 2017. Sistema autónomo para registrar la irradiancia Solar. Patente española ES 2656737 A1 con número de solicitud P201730884 de fecha 04/07/2017.
- Maxwell, Eugene L, Stephen M Wilcox, Chris Cornwall, Bill Marion, Saleh H Alawaji, Mohammed bin Mahfoodh, and Anmed Al-Amoudi. 1999. Progress Report for Annex II--Assessment of Solar Radiation Resources in Saudi Arabia 1993-1997, NREL/TP-560-25374. (US).
- Pape, Benedikt, Javier Batlles, Norbert Geuder, Rayco Zurita Pinero, Fernando Adan, and Benedikt Pulvermüller. 2009. Soiling impact and correction formulas in solar measurements for CSP projects. Paper read at SolarPACES Conference, at Berlin, Germany.
- Vignola, F. 2006. "Removing Systematic Errors from Rotating Shadowband Pyranometer Data." *Proceedings American Solar Energy Society*.
- Vignola, F., Peterson, L., Wilbert, S., Blanc, P., Geuder, N., & Kern, C. (2016). New Methodology for adjusting Rotating Shadowband Irradiometers Measurements. In 22nd SolarPACES Conference.
- Wilbert, S., Kleindiek, S., Nouri, B., Geuder, N., Habte, A., Schwandt, M., & Vignola, F. (2016). Uncertainty of rotating shadowband irradiometers and Si-pyranometers including the spectral irradiance errors. *AIP Conference Proceeding*, 1734(1), 150009.
- S. Wilbert, B. Nouri, C. Prah, G. Garcia, L. Ramirez, L. Zorzalejo, R. Valenzuela, F. Ferrera, N. Kozonek, J. Liria "Application of whole sky imagers for data selection for radiometer calibration". 32nd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Munich June 2016, Proceedings 10.4229/EUPVSEC20162016-5AO.8.6 pages 1493-1498. ISBN 3-936338-41-8.