

# ***La energía que producen los sistemas fotovoltaicos conectados a la red:***

## **El mito del 1300 y “el cascabel del gato”**

E. Lorenzo

Instituto de Energía Solar

Universidad Politécnica de Madrid

### **Resumen**

En el sector fotovoltaico español se están generalizando las estimaciones de la producción anual de electricidad, de los sistemas conectados a la red, en el rango de los 1300 kWh/kWp a los 1500 kWh/kWp. Este artículo las critica como excesivamente exageradas, aboga por la corrección de esta práctica, y propone un sencillo método de cálculo que conduce a estimaciones más realistas, en el rango de los 900 kWh/kWp a los 1200 kWh/kWp.

### **Introducción**

La prima de hasta 60 pta/kWh, establecida en el Real Decreto 2818/98, convierte a la producción de energía en un factor de mérito primordial en el contexto del actual mercado fotovoltaico español. Preguntas como ¿cuánto cobraré cada año por la electricidad generada? o ¿cuántos años tardaré en recuperar mi inversión? figuran entre la lista de las más frecuentes que plantean los interesados en la compra de un sistema fotovoltaico conectado a la red (en adelante, SFCR). Obviamente, las respuestas a estas preguntas pasan por estimar la producción energética de estos ingenios. En opinión de quien esto escribe, las estimaciones que está ofreciendo el sector pecan, en general, de exageración y están pavimentando el camino hacia la frustración de muchos usuarios que, con el paso del tiempo, irán constatando que la electricidad que realmente producen sus sistemas no va más allá del 75% de la que anunciaba la información que le proporcionaron en el momento de la adquisición.

Un ejemplo particularmente relevante lo constituyen los libros (por lo demás excelentes) que, al respecto, edita la Asociación de la Industria Fotovoltaica (ASIF). En ellos se estima que un SFCR produce anualmente 1300 kWh/kWp, para el promedio de la geografía española, y la estimación se eleva hasta 1400 kWh/kWp para algunas regiones particularmente soleadas como, por ejemplo, la región murciana. En esta misma línea, la Guía Solar de Greenpeace habla de 1500 kWh/kWp. Y aún pecan de mayor optimismo las informaciones que algunas empresas suministran directamente a los clientes interesados. Por obvias razones de delicadeza y de respeto a la privacidad, no citaremos aquí ejemplos con nombres y apellidos concretos. Diremos sólo que son bastantes los casos que han llegado a nuestro conocimiento directo, a través de los clientes que acuden al Instituto de Energía Solar (IES) a preguntar nuestra opinión sobre las ofertas comerciales que han recibido previamente, comprobándose que la mayoría de ellas están francamente sobrevaloradas.

Las experiencias reales muestran cifras de producción notablemente inferiores a esas estimaciones. Por ejemplo, la central fotovoltaica de 1 MW Toledo-PV que, por razones que luego se explicarán, reúne todas las condiciones para maximizar la productividad, no supera los 1200 kWh/kWp. El generador de 12,5 kW que funciona en el IES desde 1994, cuyas condiciones son también particularmente favorables, considerando su integración en un edificio, no supera los 1100 kWh/kWp. Y constituyen la inmensa mayoría los casos que no superan los 1000 kWh/kWp.

Afirmar que la creación de expectativas inalcanzables conduce inevitablemente a la frustración, es una obviedad lógica que no merece mayor dedicación. Pero sí la merece el recordar que la historia de la energía solar en España muestra claramente que las frustraciones en los inicios del mercado energético tienen un precio muy elevado, en términos de desarrollo posterior y de credibilidad tecnológica. A comienzos de los años 80, el Ministerio de Industria y Energía, a través del Centro de Estudios de la Energía (antecesor del actual IDAE), puso en marcha un programa para fomentar la energía solar térmica, que llevó a la instalación de unos 30 000 m<sup>2</sup> de colectores al año en el conjunto del territorio español. La cifra era, por aquel entonces, significativa en el contexto del mercado mundial, y augurio de tiempos muy felices. Sin embargo, el funcionamiento de la mayoría de aquellas instalaciones dejó mucho que desear, lo que provocó un enorme descrédito de la energía solar térmica en la opinión pública, y condujo a la práctica paralización del sector. En buena medida, ese mal comienzo explica el bajísimo peso relativo del actual mercado español de colectores térmicos.

En uno de sus famosos discursos políticos, Cicerón dijo que “...recordando el pasado es como fundaremos las esperanzas en el futuro...”. Pues bien, la esperanza en un futuro brillante para los generadores fotovoltaicos y el ánimo de contribuir a que se desarrolle sin muchos sobresaltos son las motivaciones de este trabajo, que presenta un método sencillo y que se pretende realista para estimar su producción energética anual. El estudio se limita al caso de generadores estáticos, que constituyen la inmensa mayoría en el mercado actual.

## La producción de energía en los SFCR

La energía producida anualmente por un SFCR,  $E_{AC}$ , puede expresarse como el producto de cuatro factores independientes:

$$E_{AC} = P^* (G_{\text{daeff}}/G^*) FS PR \quad [1]$$

donde  $P^*$  es la potencia nominal, o potencia máxima que entrega el generador en las denominadas condiciones estándar de medida (1000 W/m<sup>2</sup> de iluminación y 25 °C de temperatura de célula),  $G_{\text{daeff}}$  es la irradiación anual efectiva que incide sobre la superficie del generador y  $FS$  es un factor que considera las pérdidas por sombreado.  $PR$  (*Performance Ratio*) es un factor de rendimiento que considera las pérdidas energéticas asociadas a la conversión DC/AC y al hecho de que el rendimiento de las células solares en la realidad es inferior al que indica el valor de su potencia nominal, debido a que la temperatura de operación suele ser notablemente superior a 25 °C.  $G^*$  es el valor de la iluminación a la que se determina la potencia nominal de las células y generadores fotovoltaicos, precisamente 1000 W/m<sup>2</sup>. No está de más observar que este factor es necesario para ajustar las dimensiones de ambos lados de la ecuación [1].

### La potencia nominal

La producción energética unitaria de los SFCR, los famosos “kilovatios hora por kilovatio pico”, viene dada por la relación  $E_{AC}/P^*$ . La ecuación [1] parece indicar que esta relación depende sólo de la radiación que recibe el generador y de la calidad del inversor. Sin embargo, esto es así sólo cuando no hay fraude en el valor de  $P^*$ . En otras palabras, y con los ojos del comprador, cuando la potencia nominal del generador que le han suministrado (y que probablemente ha pagado) coincide efectivamente con la que le habían anunciado en la oferta comercial. Hoy por hoy, esto no siempre es verdad. Más bien, la potencia suministrada suele estar entre un 5 % y un 10 % por debajo de lo que anuncian los catálogos y, algunas veces, es incluso inferior a ese rango. Naturalmente, la energía generada se ajusta a la realidad del suministro, y cuando éste está por debajo de lo anunciado, también lo están los kWh/kWp producidos.

Es aquí cuando conviene decir, para freno de apresurados, que el “atrevimiento” de escribir que muchas veces los módulos fotovoltaicos no miden todo lo que dicen los catálogos no supone crítica automática hacia sus fabricantes. Lejos de ello, y parafraseando de nuevo a Cicerón en eso de “basar las esperanzas sobre los recuerdos”, quien esto escribe recuerda que el “fraude” (cuya entidad, dicho sea de paso, no es tan grande como la maldad que suele atribuirse a este epíteto) viene de tiempos que fueron particularmente duros para los fabricantes de módulos fotovoltaicos, y que la excelente cualidad profesional de estos fabricantes, “hija” merecida de aquella dureza, es de los mayores activos con que hoy cuenta el sector, siendo precisamente esta excelencia la mejor garantía para avanzar en el sentido de proteger eficazmente las inversiones de los usuarios y la credibilidad general de esta tecnología.

### ***La radiación solar***

La estimación de la irradiación anual que incide sobre los generadores fotovoltaicos también es terreno propicio al optimismo exagerado. Explicado de forma concisa, la estimación comporta tres pasos:

1) *La predicción de la irradiación anual incidente sobre una superficie horizontal,  $G_a(0)$ .*

Se hace por el sencillo procedimiento de suponer que coincide con el valor medio medido en el pasado, a lo largo de un número suficiente de años. Son diversas las entidades u organismos que miden la radiación solar y publican los resultados, en forma de atlas o bases de datos que contienen un valor para cada mes del año. Como no podía ser de otra manera, diversos organismos significan diversos procedimientos y diversos resultados, que llegan a ser muy diferentes para algunos meses del año. Afortunadamente, la situación es bastante confortable cuando se trata de valores anuales, ya que las diferencias entre unas fuentes de información y otras no es muy grande. A modo de ejemplo, la tabla I presenta el caso de Madrid. Puede observarse que la diferencia entre el mayor y el menor de los valores es del orden del 10 %. Sin ser grave, esta diferencia aconseja tomar alguna precaución a la hora de elegir la base de datos de referencia. En realidad, la natural variabilidad e impredecibilidad del clima hace que, en términos estadísticos, no pueda decirse que una fuente de información sea mejor que otra. Por ello, casi lo único que se puede hacer es citar siempre la fuente de datos utilizada o, en el caso de las agencias públicas encargadas de “lidar” con los SFCR, imponer la elección de una determinada.

*Tabla I. Irradiación anual sobre una superficie horizontal en Madrid, según diversas fuentes de datos. Las cifras entre paréntesis representan los correspondientes valores diarios.*

<i>Fuente</i>	$G_a(0)$ en kWh/m <sup>2</sup>
CENSOLAR - International H-World	1566 (4,29)
Instituto de Energía Solar	1653 (4,53)
Climatic Data Handbook - UE	1679 (4,60)
Atlas de la Radiación Solar en España - INM	1716 (4,70)
Atlas de la Radiación Solar en Europa - CUE	1591 (4,36)
Soleamiento y Energía Solar - Univ. de Valencia	1610 (4,41)
Meteonorm - versión 4.0	1660 (4,55)
NASA - eosweb.larc.nasa.gov/sse	1544 (4,23)

2) La estimación de la irradiación anual incidente sobre una superficie inclinada de tal manera que maximice la captación de la radiación solar  $G_a(\beta_{opt})$ .

El cálculo de irradiaciones sobre superficies inclinadas, a partir de datos sobre superficie horizontal, es objeto de permanente revisión en el ámbito de los estudiosos de la radiación solar, siendo además varias las aplicaciones informáticas disponibles para llevarlo a cabo. Como consecuencia, existe una amplia variedad de métodos<sup>1</sup> y herramientas de cálculo, que pueden causar cierta confusión a quien se acerque al tema por vez primera. Sin embargo, la confusión es más aparente que real, ya que casi todas las propuestas conducen a resultados muy parecidos. Más por sencillas que por ser de nuestra propia cosecha, apuntaremos aquí dos fórmulas para describir esos resultados. La inclinación de la superficie óptima  $\beta_{opt}$  que, por otro lado, está orientada al Sur, se relaciona con la latitud  $\phi$  mediante la expresión:

$$\beta_{opt} = 3,7 + 0,69 \phi \quad [2]$$

donde ambos ángulos se expresan en grados. La irradiación anual sobre esta superficie óptima se estima como:

$$G_a(\beta_{opt}) = G_a(0) / [1 - 4,46 \times 10^{-4} \beta_{opt} - 1,19 \times 10^{-4} \beta_{opt}^2] \quad [3]$$

A modo de ejemplo, para Madrid, cuya latitud es  $\phi = 40,5^\circ$ , y utilizando como dato de referencia para la irradiación horizontal  $G_a(0) = 1653 \text{ kWh/m}^2$ , estas expresiones conducen a

$$\beta_{opt} = 31,6^\circ$$

$$G_a(\beta_{opt}) = 1,153 G_a(0) = 1906 \text{ kWh/m}^2$$

3) La estimación de la irradiación anual efectiva incidente sobre la superficie del generador  $G_{effa}(\beta, \alpha)$ .

Aquí es donde el mucho optimismo medra con facilidad. La diversidad de métodos y herramientas de cálculo mencionados en el punto anterior extiende aquí su pretendida aplicabilidad, pero la mayoría olvidan que la cara frontal de los módulos fotovoltaicos es un simple cristal liso que, además, siempre tiene un cierto grado de suciedad. Lisura y suciedad suponen pérdidas significativas en la captación de la radiación que incide sobre los módulos con ángulos alejados de la perpendicular. Está en la experiencia de todos que los cristales se van comportando como espejos y van pareciendo más sucios cuanto más se los mira de lado. La consideración de este efecto fue abordada, con particular elegancia, en la tesis doctoral de N. Martín, y sus resultados utilizados por E. Caamaño para desarrollar la formulación siguiente:

$$[G_{effa}(\beta, \alpha)] / [G_a(\beta_{opt})] = g_1(\beta - \beta_{opt})^2 + g_2(\beta - \beta_{opt}) + g_3 \quad [4]$$

donde

$$g_i = g_{i1}|\alpha|^2 + g_{i2}|\alpha| + g_{i3} \quad ; \quad i = 1, 2, 3 \quad [5]$$

siendo  $\alpha$  el azimut (ángulo de desviación respecto al Sur) de la superficie receptora y  $\beta$  su inclinación respecto de la horizontal, como indica la figura 1.

---

<sup>1</sup> Como botón de muestra, una revisión reciente de la literatura disponible encontró hasta 250 expresiones diferentes para la correlación entre la radiación global y la radiación difusa.

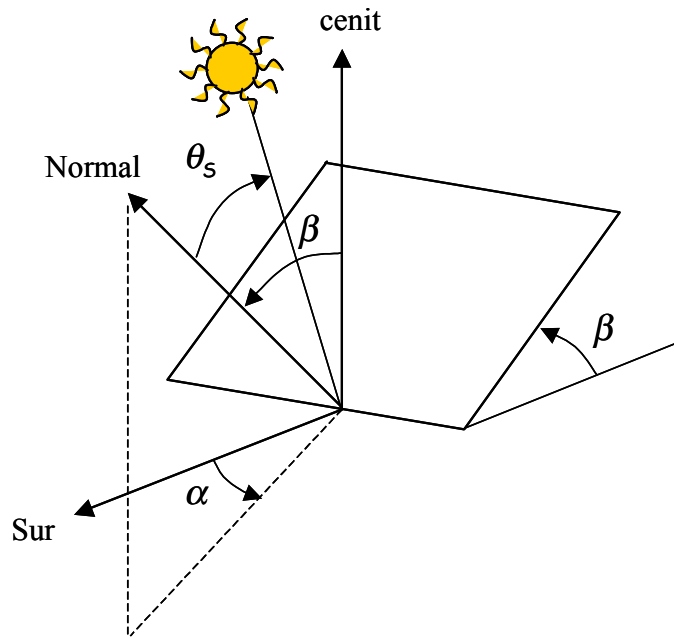


Fig. 1. Azimut  $\alpha$  e inclinación  $\beta$  de una superficie receptora.

La tabla II contiene los valores de los coeficientes para superficies con un grado mediano de suciedad, que se caracteriza por una pérdida de transparencia del 3% en la dirección normal a la superficie.

Tabla II. Coeficientes utilizados para resolver las ecuaciones [4] y [5]. Los valores corresponden al caso más representativo de un grado mediano de suciedad.

Coeficientes	$T_{\text{sucio}}(0)/T_{\text{limpio}}(0) = 0,97$		
	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$
$g_{1i}$	$8 \times 10^{-9}$	$3,8 \times 10^{-7}$	$-1,218 \times 10^{-4}$
$g_{2i}$	$-4,27 \times 10^{-7}$	$8,2 \times 10^{-6}$	$2,892 \times 10^{-4}$
$g_{3i}$	$-2,5 \times 10^{-5}$	$-1,034 \times 10^{-4}$	0,9314

Veamos su aplicabilidad al caso de algunas superficies, continuando con el ejemplo de Madrid:

a) *Superficie óptima*

Ecuación [5],  $\alpha = 0 \Rightarrow g_i = g_{i3}$

Ecuación [4],  $\beta = \beta_{\text{opt}} \Rightarrow G_{\text{effa}}(\beta_{\text{opt}}) = 0,9314 G_a(\beta_{\text{opt}}) = 1775 \text{ kWh/m}^2$

Es importante hacer notar que las pérdidas totales de radiación ( $\approx 7\%$ ) son, debido a los efectos del ángulo de incidencia, notablemente superiores a las meras pérdidas de transmitancia normal ( $\approx 3\%$ ).



## El rendimiento global

Este parámetro integra las pérdidas debidas a la temperatura de operación de las células solares, que típicamente suponen un 6 %, y las debidas a una diversidad de fenómenos principalmente asociados al inversor: eficiencia de conversión DC/AC, seguimiento del punto de máxima potencia, umbral de arranque, etc. Dependiendo de la calidad de los inversores, estas pérdidas representan entre un 15 % y un 20 %, con un valor típico en torno a la mitad de este rango. A estas pérdidas hay que añadir las debidas a la caída de tensión en el cableado entre el generador y el inversor, a la dispersión de parámetros, etc., que pueden suponer un 4 % adicional. En definitiva, el valor de  $PR$  oscila entre 0,7 y 0,75.

En la literatura disponible sobre experiencias reales con SFCR se encuentran con frecuencia valores de  $PR$  inferiores a este rango. Con alta probabilidad, se trata de casos en los que la potencia suministrada en los módulos fotovoltaicos está bastante por debajo de la que anuncian los catálogos.

## Resumen

Continuando con ejemplos para Madrid, consideremos el cálculo de la producción anual de energía esperable en algunos SFCR concretos:

- Un generador situado sobre una superficie óptima y libre de sombras, cuya potencia suministrada coincide con la anunciada, y asociado a un inversor de la mejor calidad ( $PR = 0,75$ ).

Entonces:

$$E_{AC}/P^* = G_{\text{effa}}(\beta_{\text{OPT}})0,75 = 1330 \text{ kWh/kW}$$

representativos de una situación ideal que difícilmente se encuentra en la realidad. Más real es que la potencia suministrada sea un 5 % inferior a la anunciada y que existan unas pérdidas por sombreado de un 3 % (difícilmente evitables cuando el generador se distribuye en varias superficies). Entonces:

$$E_{AC}/P^* = G_{\text{effa}}(\beta_{\text{opt}}) \times 0,75 \times 0,95 \times 0,97 = 1226 \text{ kWh/kW}$$

representativos de una situación francamente buena, como es el caso de las centrales fotovoltaicas construidas con estrictos controles de calidad. Es interesante observar que esa cifra es muy parecida a la experimental de Toledo-PV.

- Un generador que hace funciones de parasol en una terraza ligeramente desviada hacia el Oeste, y en la que los edificios colindantes proyectan sombras que se traducen en un 6 % de pérdidas al año. Para mantener un mínimo de estética, la inclinación del generador se limita a 15°. La potencia suministrada es un 7 % inferior a la anunciada, y el inversor es de calidad normal.

Entonces:

$$E_{AC}/P^* = G_{\text{effa}}(15^\circ, 30^\circ) \times 0,7 \times 0,94 \times 0,93 = 1023 \text{ kWh/kW}$$

que pueden considerarse representativos de una situación bastante afortunada.

- Un generador situado sobre una fachada orientada al Sudeste, con unas pérdidas por sombreado del 10 %, una potencia suministrada de generador inferior en un 10 % a la anunciada, y un inversor de calidad normal.

Entonces:

$$E_{AC}/P^* = G_{\text{effa}}(90^\circ, 45^\circ) \times 0,7 \times 0,9 \times 0,9 = 607 \text{ kWh/kW}$$

representativos de un caso extremo, más allá del cual no es energéticamente sensato instalar un SFCR.

El lector no debe tener dificultad en la aplicación de las fórmulas presentadas aquí a los casos que puedan ser de su interés. Podrá comprobar, entonces, que en la mayoría de ellos, la cifra de  $E_{AC}/P^*$  está en el rango de los 900 kWh/kWp a los 1100 kWh/kWp. Bastante por debajo de los 1300 kWh/kWp que indican las publicaciones de ASIF, y muy por debajo de los 1500 kWh/kWp que sugiere Greenpeace. Dice el diccionario que *mito* es una “cosa a la que se atribuye cualidades o excelencias que no tiene, o bien una realidad de la que carece”. Pues eso, que los SFCR que producen 1300 kWh/kWp, o más, no son otra cosa que un mito.

En términos económicos, esto significa que la rentabilidad real de su inversión será, al menos, un 30 % inferior a lo que, hoy por hoy, sugiere la inmensa mayoría de la información que suministran las empresas del sector. Esta situación es quizás entendible como práctica comercial, ¡a ver quién es el primero que se atreve a reconocer que sus SFCRs producen un 30 % menos de lo que anuncia la competencia! Sin embargo, debe ser corregida por el propio sector fotovoltaico antes de que se haga flagrante para los ajenos. Porque si tal llega a ocurrir, no servirán en el juicio los matices explicativos basados en el pasado. La situación será interpretada como delito y castigada con el desdén.

### **“El cascabel del gato”**

Para poner las cosas en su sitio, conviene comenzar por decir claramente que, en términos energéticos, el actual Plan Fotovoltaico Español es simplemente irrelevante, lo que se entiende bien cotejando sus cifras con las del conjunto del sistema eléctrico español.

En efecto, el RD 2818/98 establece un límite de potencia, para el parque fotovoltaico a primar, de 50 MW, que no representa más del 0,1 % de la potencia total de generación del conjunto del sistema eléctrico español (aproximadamente 50 GW). En términos de energía producida, el peso relativo del Plan Fotovoltaico es todavía menor. Cuando se complete el mismo, los 50 MW generarán, en el mejor de los casos, 60 millones de kWh al año, que representan menos de un 0,03 % de los aproximadamente 200 TWh que se consumen en el sistema eléctrico español. Y, afortunadamente, el Plan Fotovoltaico también es irrelevante desde el punto de vista económico, ya que la prima de 60 pesetas no supondrá, siempre en el mejor de los casos, más que 3600 millones de pesetas al “pool” eléctrico o, en otras palabras, un recargo de 0,02 pta/kWh en el recibo de los consumidores, lo que representa menos del 0,1 % del precio actual. A modo de comparación, la anualidad de la moratoria nuclear en 2002 es de 80 218 millones de pesetas, es decir, unas 22 veces más de lo que puede llegar a suponer el Plan Fotovoltaico actual..

Es decir, el “mercado” fotovoltaico creado por el RD 2818/98, por mucha que sea la atención que ha despertado, no puede ser cabalmente interpretado más que como un ensayo para aprender, y no como una contribución real a la producción de electricidad limpia en España y, por ello, conviene cuidar los aspectos ligados a su credibilidad. Producir energía al ritmo que se anuncia, y no a otro marcadamente inferior, es uno de los más importantes. El corolario es anunciar la energía que se produce, y no otra sensiblemente superior. Descuidar este aspecto, y dormitar en brazos del optimismo exagerado, como es ahora costumbre extendida, no puede conducir a nada más que a mermar la confianza de la opinión pública en la energía solar y, con ello, a disminuir la presión en favor de su masiva utilización.

Por ejemplo, son muchas las voces que están pidiendo el incremento de las primas a la electricidad fotovoltaica, desde las actuales 60 pta/kWh hasta las 100 pta/kWh. La señalada irrelevancia del Plan Fotovoltaico actual es propicia para este incremento, porque la repercusión en el conjunto del sector eléctrico se mantendría en el terreno de lo irrelevante (menos de 0,04 pta/kWh), y porque se pueden añadir importantes argumentos colaterales en su favor: fomento de la industria nacional, creación de empleo, etc. Sin embargo, la noticia de que los SFCR producen mucha menos electricidad de lo que anuncian sus promotores podrá, no cabe duda, ser utilizada como argumento en contra de ese incremento de primas.



La implantación en España de los SFCR está resultando más difícil de lo que su sencillez parece sugerir. Al día de hoy, los procedimientos administrativos son farragosos y los requisitos técnicos son francamente mejorables (algunos errores técnicos del RD 2818/98 merecen comentario aparte). Ambas cosas se aúnan para frenar notablemente el ritmo de instalación, y hacer que el tamaño de nuestro mercado interno esté muy por debajo de la capacidad tecnológica. Al fin y al cabo, España es el primer productor europeo de módulos fotovoltaicos. Establecer prácticas de ingeniería responsable, alejadas del anuncio de milagros que no pueden acontecer, sería conveniente de por sí y, además, coherente con esa capacidad. Aunque para ello haya que comenzar por reconocer las limitaciones propias de la producción de electricidad fotovoltaica.

Mi pueblo es un pueblo marinero especializado en la navegación de altura. Este arte, que fue muy arriesgado en algunos tiempos, exige moderación en el cálculo de las propias fuerzas y serenidad en los momentos de desencuentro con la mar. Al parir de estas virtudes, se ha ido forjando una escuela de filósofos (aunque muchos no saben que lo son) especializados en sentido común. Pues bien, a eso de reconocer las propias limitaciones se le llama, en esta escuela de mi pueblo, “ponerle el cascabel al gato”. Y afirman sus filósofos más reconocidos, que sin tal cascabel, el gato termina siempre por arañar y no sirve para la convivencia en el barco, sobre todo cuando llegan los desencuentros con la mar. Por eso, si algún lector tuviera la ventura de visitar mi pueblo, podrá ver que nunca se permite la presencia de gatos sin cascabel en los barcos que van a hacerse a la mar.