

CARACTERIZACIÓN DE UN COMPRESOR DE CAPACIDAD VARIABLE DE 12 V CC PARA REFRIGERACIÓN SOLAR

Dr. Arturo Busso, Facundo Avila, Dr. Luis Vera, Raúl Sánchez,
Lic. Guillermo Sánchez, Luciano Zini (*)

RESUMEN

Se exponen los primeros resultados de la caracterización de parámetros térmicos y eléctricos de un ciclo frigorífico de compresión de vapor con compresor de 12 V DC de capacidad variable alimentado por un sistema fotovoltaico autónomo (SFVA). Se determinó un coeficiente global de pérdida térmica para el gabinete de UL = $0.38 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{°C}^{-1}$. Para presiones de alta y baja de 90 y 10 PSI respectivamente, la temperatura de evaporación fue de -23 °C , el consumo del compresor de 32 W y la corriente promedio de trabajo en régimen de 2.75 A. Para presiones de alta y baja de 130 PSI y 10 PSI respectivamente, la temperatura de evaporación fue de -15 °C , el consumo del compresor de 45 W y la corriente de carga a 3.7 A. Estos parámetros concuerdan con lo reportado por el fabricante para la temperatura de evaporación de trabajo correspondiente. Del balance de energías intercambiadas por los componentes del ciclo surge que cuanto menor es la temperatura de regulación del termostato mayor el ciclo de encendido impactando negativamente en la vida útil de la batería. La eficiencia del banco de generación se situó en los 10.5

% en promedio, valor bajo en comparación con lo reportado por el fabricante de los módulos. En todos los casos el COP determinado difiere mucho con el esperado según especificaciones quedando pendiente de análisis el origen de esta discrepancia.

Palabras clave: refrigeración solar, preservación de alimentos, ciclo de compresión de vapor de capacidad variable

INTRODUCCIÓN

Las zonas rurales dispersas del país han venido sufriendo un cambio considerable en los últimos años debido a la existencia de programas especiales para la instalación de sistemas de generación eléctrica fotovoltaica. Las bondades relativas de estos sistemas de generación son: ser autónomos, requerir mantenimiento mínimo, posibilidad de escalabilidad en potencia de generación, brindar energía a pobladores que no tienen acceso a la red convencional mejorando la calidad de vida, entre otras.

En la provincia de Corrientes, como parte del PERMER (Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales), se ins-

talaron, entre los años 2006 al 2011, sistemas de generación fotovoltaica autónomos (SFVA) en 85 escuelas rurales y 1412 SFVA residenciales para satisfacer las necesidades básicas de iluminación y comunicaciones de pobladores rurales. La potencia pico de cada generador es de 120 Wp, operando con tensión de alimentación de 12 V CC. En este contexto, el GER – Grupo en Energías Renovables de la FaCENA – UNNE, participó activamente en ambos proyectos, observándose que en ningún caso se ha contemplado la necesidad de satisfacer la demanda de refrigeración de los usuarios (para preservación de alimentos, vacunas, etc.), siendo esta, una necesidad insatisfecha, tal como lo manifiestan los propios beneficiarios de estos programas. La razón de esta omisión es puramente económica.

La refrigeración solar fotovoltaica se puede satisfacer de dos maneras simples: a) adquiriendo equipamiento de refrigeración diseñado especialmente para sistemas fotovoltaicos, normalmente importado y de un costo elevado o, b) aumentando la capacidad de generación de un sistema instalado para incluir una heladera comercial convencional, con el costo en módulos fotovoltaicos y baterías que esto conlleva. En el caso de sistemas de refrigeración diseñados para uso solar, la tecnología utilizada esta optimizada de manera que, para una heladera de capacidad similar a la mencionada en el párrafo anterior, solo se necesitarían entre 80Wp y 120 Wp de generación, en algunos casos con baterías de poca capacidad (Doig A, 2007; Kim, 2008) y en otros, sin necesidad de baterías (Pedersen et al, 2004; Ewert et al, 2000; Foster, 2001). La optimización de estos equipos abarca tanto el aspecto térmico, el eléctrico y el electrónico de control, de forma que resultan muy eficientes en lo

que a consumo energético se refiere. Cabe mencionar que la tecnología utilizada, tanto de control como la de compresores en el ciclo frigorífico, se encuentra disponible a nivel regional (Embraco Brasil), por lo que este tipo de equipamiento podría desarrollarse en el país sin contratiempos.

CICLO DE COMPRESIÓN DE VAPOR DE CAPACIDAD VARIABLE

El ciclo de refrigeración por compresión de vapor es la tecnología de mayor eficiencia y mayor difusión siendo la base de los sistemas de climatización y refrigeración modernos. El ciclo utiliza energía eléctrica para su funcionamiento (CC o AC). Dada la difusión y ventajas de este ciclo, se ha invertido mucha investigación para lograr compresores de muy bajo consumo utilizando diferentes técnicas constructivas. Entre la tecnología más moderna se puede mencionar compresores con motores de corriente continua de capacidad variable que permiten la regulación de la velocidad entregando potencia según demanda o disponibilidad energética, evitando así los picos de corriente y transitorios durante el arranque reduciendo el consumo energético hasta en un 45% respecto de compresores tradicionales (Liyang; Embraco; Danfoss).

Este contexto motivó la necesidad de aportar al desarrollo de tecnología local en el área de refrigeración solar a fin de satisfacer un nicho de mercado enfocado en aéreas rurales dispersas, tanto aquellos usuarios que presentan una demanda real por estos dispositivos ya que actualmente cuentan con sistemas fotovoltaicos como fuente de energía eléctrica, como por los sistemas fotovoltaicos que serán instalados a futuro.

ESPECIFICACIONES				
Refrigerador: Ciclo de trabajo por compresión de vapor con capacidad variable	Compresor: DANFOSS Modelo: BD35K Volumen a refrigerar admitido: 100 litros máximo para T ambiente = 32° C Electrónica de control: 101N0210 Rpm de motor: 2500	Gabinete: Tipo cajón Dimensiones exteriores: Alto = 0.90 m Frente = 0.59 m Fondo = 0.68 m Espesor de pared: 0.06 m Aislante: poliuretano expandido Capacidad bruta = 115 lt. Capacidad neta = 112 lt.	Evaporador: Dimensiones exteriores: Alto = 0.20 m Ancho = 0.20 m Largo = 0.40 m	Refrigerante: DUPONT SUVA R134a Temp. de Evaporación: -15°C Presiones de trabajo (manométricas): Lado de alta: 130 PSI Lado de baja: 10 PSI

Tabla 1.- Especificaciones técnicas del refrigerador y componentes

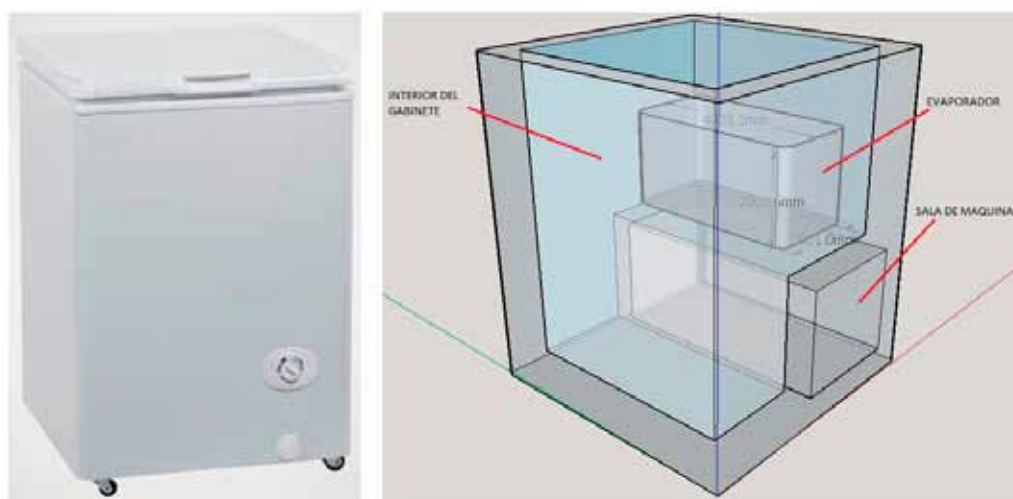


Figura 1.- Fotografía del gabinete utilizado y esquema del interior

En la sala de máquinas del gabinete se alojó el nuevo compresor, electrónica de control, capilar y conexiones al resto de los componentes (evaporador y condensador). El evaporador se ubicó en el interior del gabinete ocupando el escalón interior tal como se aprecia en el esquema de la figura 1. El refrigerador se acopló a un sistema fotovoltaico autónomo con una potencia de generación instalada de 150 W_p (3 módulos de 50 W_p en paralelo), un regulador de carga de 10 A - 12/24 V CC y una batería marca Autobat de 220 Ah. La Tabla 2 presenta un detalle de las especificaciones técnicas de los componentes utilizados en

el sistema fotovoltaico y la figura 2a muestra la configuración del sistema fotovoltaico autónomo utilizado y del esquema de conexionado eléctrico. El control se configuró para un corte por baja tensión de la batería en los 11.4 V y 2500 rpm.

La temperatura interior se controló mediante un termostato programable ETC 200 de 12 V CC con una llave de puenteo para habilitar dos modos de funcionamiento del compresor; continuo o termostatizado. El modo continuo se utiliza durante el arranque hasta llegar al estado de régimen, punto donde se habilita el termostato para

regular el ciclado de trabajo entre intervalos preseleccionados de temperatura interior.

Módulos FV	Regulador	Batería
Marca: Photon Modelo: PM 055 $P_{max} = 55 \text{ Wp}$ $V_{mp} = 17.7 \text{ V}$ $I_{mp} = 3.1 \text{ A}$ $V_{oc} = 21.6 \text{ V}$ $I_{cc} = 3.5 \text{ A}$	Marca: Solartec Modelo: SRX10 Tensión: 12/24 Vcc I carga: 10 A	Marca: AUTOBAT Modelo: Solar I-29 Tensión: 12 V Capacidad: 220 Ah en 100 horas

Tabla 2.- Especificaciones técnicas del sistema fotovoltaico autónomo

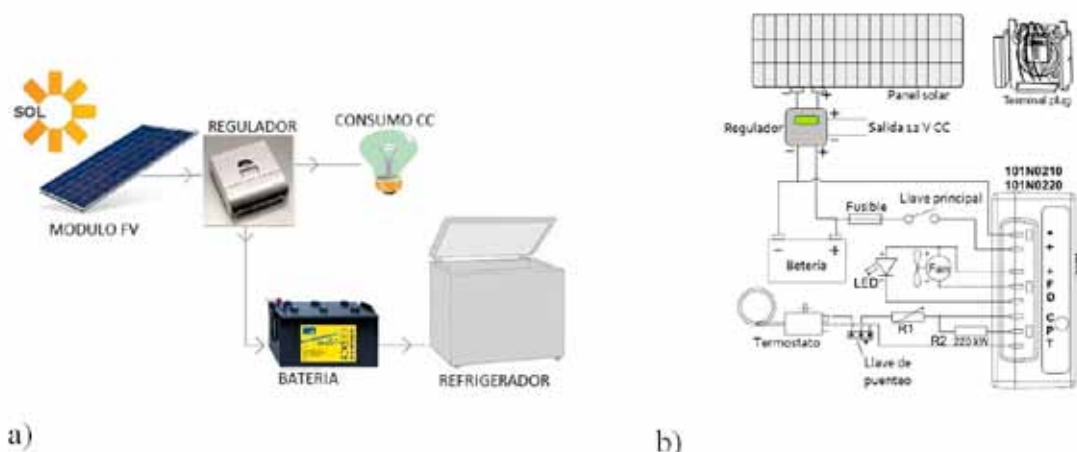


Figura 2.- Configuración a) Del sistema fotovoltaico autónomo utilizado y b) del conexionado eléctrico del compresor.

Sistema de medición: Para registro de temperaturas se utilizaron módulos autónomos ADAM 4018M con un convertidor RS232 ADAM 4520 para descarga a PC. Para las variables eléctricas se empleó un multímetro marca RIGOL M300 con registro directo en memoria USB Drive. Como sensores de temperatura se utilizaron termocúplulas tipo K distribuidos en diferentes puntos del interior del volumen del gabinete y en diferentes puntos del ciclo. La medición de las variables eléctricas se reali-

zó de manera directa para el caso de tensión y mediante tensión sobre shunts de 10A/60 mV para el caso de corrientes. El registro de datos se realizó cada 5 min. El nivel de aislamiento del gabinete se evaluó mediante ensayos de pérdida térmica y cálculos teóricos del flujo de calor basados en la técnica denominada “graficación de flujo” (Welty, 1978), que es cómoda y rápida para la conducción de calor bidimensional en estado estable que cumpla ciertas condiciones de borde.

RESULTADOS EXPERIMENTALES

La Tabla 3 presenta las condiciones bajo las cuales se llevaron a cabo las primeras corridas experimentales de caracterización del ciclo frigorífico.

Ensayo	Condición	Duración	Objetivo
1	Gabinete vacío Arranque hasta régimen y apagado Presión de trabajo: 90 PSI / 2 PSI Tensión de alimentación: 12 V CC. Directo de batería sin recarga de la misma.	2 días	Ajuste general del sistema de medición.
2	Gabinete vacío Presión de trabajo: 130 PSI / 10 PSI Arranque <u>termostatzado</u> entre 0/6 °C Tensión de alimentación: 12 V CC. Directo de batería y conectada al sistema fotovoltaico.	4 días	Análisis del comportamiento de las variables térmicas y eléctricas
3	Gabinete vacío Presión de trabajo: 130 PSI / 10 PSI Arranque <u>termostatzado</u> entre -4/4 °C Tensión de alimentación: 12 V CC. Directo de batería y conectada al sistema fotovoltaico.	6 días	Análisis del comportamiento de las variables térmicas y eléctricas
4	Gabinete vacío Presión de trabajo: 130 PSI / 10 PSI Arranque <u>termostatzado</u> entre -6/4 °C Tensión de alimentación: 12 V CC. Directo de batería y conectada al sistema fotovoltaico.	3 días	Análisis del comportamiento de las variables térmicas y eléctricas

Tabla 3.- Descripción de los ensayos realizados

Ensayo 1: la temperatura de evaporación se situó en -20 °C, tal como era de esperar para el tipo de refrigerante usado y las condiciones de presión impuestas al cargar el ciclo con gas (90 PSI etapa de alta, 2 PSI etapa de baja). La tensión de alimentación y la potencia consumida por el compresor fue en promedio de alrededor de 32 W con una corriente promedio de trabajo en régimen de 2.75 A. Los valores experimentales obtenidos para la corriente como para la potencia consumida concuerdan con lo reportado por el fabricante para la temperatura de eva-

poración utilizada. El COP se determinó mediante el programa MollierChart, que permite reproducir el ciclo en el diagrama de Mollier para el fluido refrigerante utilizado (R134a), arrojando un valor de COP de 4.38, valor este 2.5 veces superior a lo reportado por el fabricante para las condiciones de trabajo seleccionadas, no encontrándose aún una explicación para tal discrepancia.

El nivel de aislación del gabinete se evaluó mediante cálculo de pérdida térmica a partir de los datos de temperatura recolecta-

dos y cálculos teóricos del flujo de calor basados en la técnica denominada “*graficación de flujo*” (Welty, 1978), determinándose de esta manera un flujo de calor por cada método de 19 W y de 18.2 W respectivamente. Para la determinación del coeficiente global de pérdida del gabinete se tomó, a modo de peor escenario, el valor más alto de flujo de calor obtenido anteriormente (19 W), determinándose un $UL = 0.38 \text{ W-m-2-}^\circ\text{C-1}$.

Ensayo 2: Se aumentó la masa de fluido refrigerante en el ciclo y el termostato se ajustó para una regulación de temperatura interior del gabinete entre 0-6 °C. En el gráfico superior de la figura 3 se aprecian las líneas negras horizontales que definen la banda de regulación de temperatura obtenida en el interior del gabinete. El aumento

de la presión de trabajo produjo un aumento en la temperatura de evaporación de -23 °C a -15 °C y por consiguiente, un aumento en la potencia consumida de 32 W a 45 W así como un aumento en la corriente de carga a 3.7 A. La línea negra en la gráfica inferior de la fig.3 presenta la variación en la tensión de la batería (V_bat). Las oscilaciones observadas se deben a los ciclos de carga impuestos por el aporte del módulo fotovoltaico y de descarga impuesto por la corriente demandada por el compresor.

El análisis de la evolución de las energías puestas en juego en el sistema a lo largo de los 3 días muestra que la eficiencia de generación osciló en el 10.2% aproximadamente, valor que se encuentra un 32 % por debajo de lo especificado por el fabricante de los

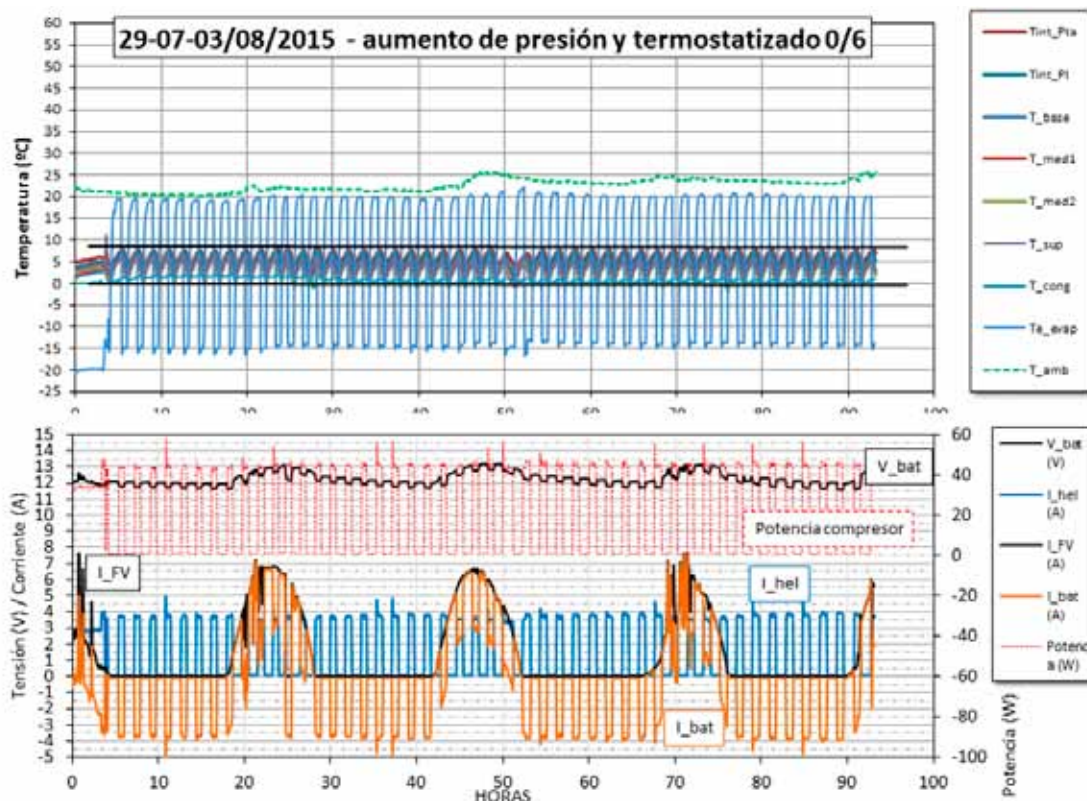


Figura 3.- Evolución general de parámetros térmicos (temperaturas en gráfico superior) y eléctricos (gráfico inferior) con gabinete vacío y presión del gas refrigerante 130/10 PSI

módulos utilizados. Si bien la duración del ensayo es corta y considerando que la potencia del banco de generación fue de solo 84 W, los resultados obtenidos indican, al menos en primera instancia, que el régimen de trabajo impuesto permite el recupero de carga de la batería. Bajo esta situación y con el objetivo de verificar la respuesta del sistema ante un consumo extra, se realizó una simulación incorporando una luminaria de 15 W durante 3 hs. diarias cuyo resultado indicó que la generación instalada (84 W) es solo suficiente para restaurar el estado de carga pero no permite consumos extras.

Ensayo 3: Los resultados obtenidos a lo largo de seis días con el termostato ajustado para una banda de trabajo de $-4/4$ °C muestran que al disminuir la temperatura del umbral inferior del termostato el compresor debe trabajar más tiempo, ciclos de 175 min de duración en promedio, tomando, en consecuencia, más energía de la batería. Del análisis de las energías puestas en juego, esto queda en evidencia porque se observa una clara tendencia a la descarga con un resultado final de déficit energético. La eficiencia del sistema de generación está en el orden del 11%. Estos resultados muestran que el régimen de trabajo seleccionado resulta exigido para la batería manteniéndola en niveles de descarga críticos que reducirán la vida útil de la misma rápidamente.

Ensayo 4: Los resultados obtenidos a lo largo de tres días de operación con el termostato ajustado para una banda de trabajo de $-6/4$ °C muestran que el compresor permanece encendido continuamente durante las horas de sol y por algunas horas más hasta que se produce el corte por baja tensión en la batería. En total el ciclo de funcionamiento dura 15 hs. y el de apagado 9 hs. En lo referente al balance de energías también

se obtuvieron resultados desfavorables que impactan negativamente en la vida útil de la batería y no deja lugar a consumos extras.

CONCLUSIONES

Se realizaron las primeras corridas de caracterización de parámetros térmicos y eléctricos de un ciclo frigorífico de compresión de vapor de capacidad variable alimentado en 12 V CC.

Para la aislación con la que cuenta actualmente el gabinete se determinó un coeficiente global de pérdida térmica $UL = 0.38 \text{ W-m}^{-2}\text{-}^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Todos los ensayos se realizaron con el gabinete vacío. Los resultados del primer ensayo muestran que para las presiones en la etapa de alta y baja de 90 y 10 PSI respectivamente, el consumo promedio del compresor es de alrededor de 32 W con una corriente promedio de trabajo en régimen de 2.75 A., valores que concuerdan con lo reportado por el fabricante para la temperatura de evaporación obtenida (-23 °C). Sin embargo, el COP determinado utilizando las temperaturas en los componentes del ciclo y el programa MollierChart, difiere mucho con el esperado quedando pendiente de análisis el origen de esta discrepancia.

Los ensayos siguientes se realizaron luego de un aumento en la presión del fluido refrigerante en el ciclo a 130 PSI y 10 PSI en las etapas de alta y baja respectivamente. Se evidenció un aumento en la temperatura de evaporación de -23 °C a -15 °C, un aumento en las variables eléctricas, consumo de 45 W y corriente de carga de 3.7 A, valores que concuerdan con lo reportado por el fabricante para la temperatura de evaporación obtenida.

En lo referente al balance de energías intercambiadas por los componentes del ciclo, como es de esperar, cuanto menor es la temperatura de regulación del termostato mayor es la incidencia sobre la vida útil de la batería. Para dar una solución a este problema manteniendo temperaturas de regulación bajas se deben atacar dos aspectos; mejorar la aislación del gabinete e incluir en el sistema almacenamiento de energía por cambio de fase. Menores pérdidas térmicas y una fuente de frío interior pasiva permitirían mantener por más tiempo la

temperatura en el interior disminuyendo la frecuencia de los ciclos de operación y, en consecuencia, el consumo del equipo.

La eficiencia del banco de generación se situó en los 10.5 % en promedio, un valor bajo en comparación con lo reportado por el fabricante de los módulos pero que, de estudios de envejecimiento anteriores, puede deberse a problemas evidenciados en módulos instalados en escuelas rurales y que repercuten en la generación.

REFERENCIAS

- Bello C., Jimenez V., Toranzos V., Busso A., Vera L. H., Cadena C. (2009). Relevador portátil de curvas i-v de paneles fotovoltaicos como Herramienta de diagnóstico in situ de sistemas de generación fotovoltaica. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 13, pp. 77-83. ISSN 0329-5184
- Bello C., Busso A., Vera L., Cadena C. (2010). Factores que afectan el funcionamiento de instalaciones fotovoltaicas Autónomas en regiones del noreste argentino. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* Vol. 14 PP. 93-99. ISSN 0329-5184
- Danfoss. http://www.ra.danfoss.com/TechnicalInfo/Literature/Manuals/06/Danfoss_bd35kr600a_12-24vdc_06-2011_dehced100g602.pdf
- Doig Alison. Intermediate Technology Development Group. SOLAR PHOTOVOLTAIC REFRIGERATION OF VACCINES. Practical Answers to Poverty. Technical Brief. <http://practicalaction.org/solar-photovoltaic-refrigeration-of-vaccines>
- Embraco. http://pdf.directindustry.com/pdf/embraco/vcc-household-application-3rd-generation-for-r-134a-and-r-600a/17666-49182-_2.html
- Ewert M., Bergeron D., Foster R., La Fleur O. Photovoltaic Direct-Drive, Battery-Free Solar Refrigerator Field Test Results. http://solar.nmsu.edu/publications/pv_direct_refrig.pdf
- Foster R., Estrada L. (2001). Photovoltaic direct-drive refrigerator with ice storage: Preliminary monitoring results. ISES Solar World Congress. http://solar.nmsu.edu/publications/PV_refri.pdf
- Glycols. Union Carbide Chemicals Co. (1958). <http://movimientodeenergia.blogspot.com.ar/2011/09/soluciones-eutecticas-y-refrigerantes.html>
- Kim D.S., Infante Ferreira C.A. (2008). Solar refrigeration options – a state-of-the-art review. *International Journal of Refrigeration* 31, pp.3-15.
- Liyang. <http://www.liyangcompressor.com/dc-compressor/1.html>
- Per Henrik Pedersen, Soren Puolsen, Ivan Katic (2004). SolarChill – a solar PV refrigerator without a battery. EuroSun 2004 Freiburg, Germany. http://www.solarchill.org/images/Euro-sun2004_paper_254.pdf
- Welty J. (1978). Transferencia de Calor Aplicada a la Ingeniería. Editorial Limusa. Mexico
- Worsnop B. L., Flint H. T., (1965). Curso Superior de Física Practica Tomo I, Editorial EUDEBA.