

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1. Introducción

La utilización del frío es un proceso conocido ya desde muy antiguo; en el siglo XII los chinos utilizaban mezclas de salitre con el fin de enfriar agua; los árabes en el siglo XIII utilizaban métodos químicos de producción de frío mediante mezclas; en los siglos XVI y XVII, investigadores y autores como Boyle, Faraday (con sus experimentos sobre la vaporización del amoníaco) etc., hacen los primeros intentos prácticos de producción de frío.

En 1834, Perkins desarrolla su patente de máquina frigorífica de compresión de éter y en 1835 Thilorier fabrica nieve carbónica por expansión; Tellier construyó la primera máquina de compresión con fines comerciales, Pictet desarrolla una máquina de compresión de anhídrido sulfuroso, Linde y Windhausen la de anhídrido carbónico, Vincent la de cloruro de metilo, etc. Un capítulo aparte merece Carré, propulsor de la máquina frigorífica de absorción y Le Blanc-Cullen-Leslie la de eyección.

Desde el punto de vista de sus aplicaciones, la técnica del frío reviste un gran interés dentro de la revolución industrial a que obliga las distintas necesidades de la población. La refrigeración tiene un amplísimo campo en lo que respecta a la conservación de alimentos (barcos congeladores de pescado en alta mar, plantas refrigeradoras de carnes y verduras), productos farmacéuticos y materias para la industria (plantas productoras de hielo, unidades de transporte de productos congelados, barcos, aviones, trenes, camiones, etc.), en sistemas de acondicionamiento de aire y calefacción, etc.

Esto da una idea del grandísimo interés universal que reviste la refrigeración industrial desde el punto de vista económico, humano y social.

Hoy en día, casi el 50% del consumo final de energía en Europa se destina a la climatización de edificios, la generación de calor industrial y la producción de agua caliente para su uso doméstico. Los procesos relacionados con el calor son los mayores consumidores de energía, por encima de la electricidad y el transporte.

Más del 25% del consumo energético total europeo y del 68% del consumo energético doméstico de EEUU se utiliza para calefacción y aire acondicionado de edificios. Una porción importante de las emisiones de CO₂ se deben simplemente a la calefacción de edificios en climas fríos o al aire acondicionado de edificios en climas cálidos. La oportunidad de utilizar fuentes de energía renovables puede tener un gran impacto en el consumo energético total y en el medio ambiente.

La demanda de soluciones interiores de climatización está aumentando. Para una vivienda unifamiliar, la instalación de aire acondicionado eléctrico supone un incremento del consumo energético de más del 50%. Si continuamos confiando en las fuentes de energía no-renovables, el consumo energético global se incrementará drásticamente y no se alcanzarán los compromisos del protocolo de Kyoto.

A causa de los recientes problemas encontrados en la capa de ozono, y al calentamiento global de la Tierra, se ha tenido que prestar una especial atención en los refrigerantes que se han venido usando años atrás. La mayoría de los países industrializados se han puesto de acuerdo para tratar de reducir la producción de aquellos refrigerantes que se cree que son especialmente dañinos para la atmósfera terrestre. La tendencia actual es la de sustituir dichos refrigerantes y diseñar nuevos equipos que funcionen de forma aceptable con los nuevos refrigerantes usados. Gracias a esto, se ha renovado el interés por el amoníaco y gel de sílice entre otras sustancias y por los equipos de absorción y de adsorción.

Por tanto, en este proyecto se quiere poner de manifiesto las diferentes opciones que tenemos para poder climatizar con energía solar térmica mediante procesos limpios y de una fuente inagotable para luchar contra el elevado consumo energético y reducirlo al mínimo. Y dentro de esas tecnologías, se estudiará en profundidad la climatización solar por adsorción debido a su prometedor desarrollo futuro.

2. Estado del arte

2.1. Características generales

A continuación se va a resumir la situación de la refrigeración por adsorción desde los años 80 hasta la actualidad [1] para ver la evolución que ha sufrido esta tecnología.

En los años 80, Dupont et al. (1982) investigaron 2 refrigeradoras por adsorción que trabajaban con la pareja zeolita/agua y con un COP entre 0.04 – 0.14. Pons and Guillemintot (1986) desarrollaron un prototipo con la pareja carbón activo/metanol con un COP de 0.12 que podía ser mejorado reduciendo el calor sensible del evaporador, mejorando la refrigeración de los captadores y haciéndolos todos idénticos.

En general, se eligió a la pareja zeolita/agua para refrigeración y a la pareja carbón activo/metanol para producción de hielo. Pons y Grenier (1987) trabajaron en la pareja de adsorbentes zeolita/agua para refrigeración y un COP en torno a 0.1.

Sakoda y Suzuki (1984) construyeron y probaron un sistema cerrado de enfriamiento por adsorción en un laboratorio empleando una combinación de gel de sílice/agua. El buen funcionamiento de esta unidad demostró claramente tanto la viabilidad técnica como experimental de la refrigeración por adsorción.

Kluppel y Gurgel (1987) construyeron dos prototipos, un pequeño refrigerador doméstico y una enfriadora de agua portátil con energía solar utilizando una combinación de gel de sílice/agua. Se obtuvo un COP de 0.055 para el prototipo del pequeño refrigerador doméstico, con temperaturas del evaporador por debajo de 3 °C, mientras que alcanzó un COP de 0.077 para el enfriador de agua portátil, con temperaturas del evaporador alrededor de 8 °C.

Las máquinas de adsorción a nivel comercial aparecieron en el mercado en 1986 y fueron producidas por la compañía Kuchouki Nishiyodo. Las enfriadoras de gel de sílice/agua producidas por esta empresa se venden en el mercado americano a través de Inc. HIJC USA y en España por ICOGEN SA. Esta empresa estima el período de amortización de estos equipos en unos 3.2 años. El refrigerador puede ser conducido por agua caliente a entre 50 – 90 °C, y la temperatura del agua fría es próxima a 3 °C. El COP puede alcanzar 0.7 cuando el refrigerador es alimentado por agua caliente a 90 °C.

En los 90, Critoph (1993) estudió un ciclo de refrigeración solar por adsorción usando biomasa con la pareja carbón activo/amonio. El COP fue de 0.3 cuando la temperatura del generador es próxima a 50 °C, mientras que la temperatura del evaporador se encontraba sobre los 0 °C.

Wang et al. (1998) presentan un nuevo híbrido de calentador de agua por energía solar por adsorción para producir hielo, obteniendo un COP entre 0.15 – 0.23 y una eficiencia en el calentamiento entre 0.35 – 0.38.

En 1999, Wang et al. estudian un sistema de adsorción solar para producción de hielo con un COP entre 0.12 – 0.135. Sumathy y Li desarrollan otro sistema con carbón activo/metanol que arroja un COP entre 0.1 – 0.12.

Los altos costes iniciales de los equipos y la baja transferencia de calor de los adsorbentes suponen limitaciones a la hora de su comercialización. Una opción es usar transmisión de calor por tuberías para reducir el problema de la baja transferencia de calor, haciendo que el sistema resulte más barato y fiable.

En 1998 se lleva a cabo comercialmente en La India un sistema de refrigeración por adsorción a baja temperatura (80 – 90 °C) para aire acondicionado utilizando metanol/gel de sílice como pareja de trabajo para el almacenamiento en frío de productos agrícolas a una temperatura de 2 – 4 °C.

A partir del año 2000, Li et al. (2001) experimentan con producción de hielo con energía solar usando carbón activo/metanol y obteniendo un COP de 0.12 a 0.14.

Buchter et al. (2003) ponen en marcha una máquina de producción de hielo por adsorción con el par carbón activo/metanol en Burkina Faso con unos resultados

obtenidos similares a los que realizó Boubakri en los 80 con un sistema similar instalado en Marruecos por la empresa francesa BLM.

En 2004 se construye otra máquina de producción de hielo por adsorción en Shanghai Jiao Tong University (SJTU) con un COP medio entre 0.2 – 0.3.

Saha et al. (2001) experimentaron con una cámara de adsorción alimentada por energía solar de doble etapa con 4 lechos o cámaras y con una temperatura de calor residual entre 50 y 70 °C. El prototipo estudiado produce agua fría a 10 °C y tiene una potencia de refrigeración de 3.2 kW con un COP de 0.36. Los captadores de placa plana podrían fácilmente producir agua caliente para regenerar el adsorbente de la enfriadora.

Wang et al. (2001) desarrollan un sistema de adsorción para aire acondicionado alimentado por fuentes de calor a unos 100 °C, con lo que se podrían usar captadores de tubos de vacío para suministrar agua caliente. El sistema usa 2 adsorbentes con 26 kg de carbono cada uno de ellos y utiliza metanol como refrigerante. El COP y la potencia varían según el tiempo de ciclo de 0.15 a 0.21 el COP y de 3.84 a 3.03 la potencia trabajando con ciclos de 30 minutos y 60 minutos respectivamente. En ambas situaciones, la temperatura de evaporación es próxima a 6 °C. Se hace una mejora de diseño con el carbón colocado fuera de los tubos, entre las placas. Con este diseño se consigue un COP de 0.4 y una potencia de refrigeración de 3.80 kW a 100 °C, temperatura de evaporación de 10 °C y una temperatura de condensación de 24 °C durante un ciclo de 50 min.

En 2005 se lleva a cabo una enfriadora de gel de sílice/agua de 10 kW en la Universidad de Shanghai (SJTU) con un COP de 0.4 si se trabaja con agua caliente a 85 °C, agua de salida fría a 10 °C y el agua de refrigeración a 30 °C.

Nuñez et al. (2004) desarrollan una enfriadora de adsorción de gel de sílice/agua con un potencia nominal de refrigeración de 3.5 kW. Tiene 2 adsorbentes, cada uno con 35 kg de adsorbente. Funciona entre 75 – 95 °C y una temperatura de evaporación entre 10 – 20 °C. Según las condiciones experimentales, el COP varía entre 0.4-0.6. Se comparó el rendimiento de este equipo con la enfriadora Nishiyodo NAK 20/70 y la máquina de adsorción CMA Yazaky SC-10.

Restuccia et al. (2004) desarrollan una máquina frigorífica de adsorción con gel de sílice impregnado en CaCl_2 para la adsorción por su alta capacidad como adsorbente. Se obtiene un COP cercano a 0.6 cuando la temperatura de regeneración se encuentra entre 90 – 100 °C y una temperatura de condensación de 35 °C.

2.2. Modelos matemáticos

Se han descrito algunos modelos matemáticos para enunciar las ecuaciones que gobiernan el proceso de adsorción. A continuación se enumeran los diferentes modelos que se han encontrado en el estudio de los artículos.

En [2] a través de una serie de hipótesis, se presenta un modelo matemático algo complejo de una enfriadora de adsorción de simple efecto (con 2 cámaras adsorbentes), donde se define la ecuación de adsorción además de las ecuaciones de energía de las diferentes partes de la máquina. Con ello, se llega a la obtención de la capacidad de refrigeración y calentamiento y al rendimiento (COP).

Por otro lado, aparece un modelo aún más complejo de otra máquina con 2 cámaras sin hacer más simplificaciones que la de que no hay pérdidas con el ambiente [3]. Presenta las ecuaciones de balance de energía en el adsorbedor/desorbedor, en el condensador y en el evaporador obteniendo la capacidad de refrigeración y el COP.

Por último se presenta un modelo simplificado [4] de una enfriadora de simple efecto en el que se aplican las siguientes hipótesis para llevar a cabo un modelado sencillo a través de balances de energía en las diferentes partes de la máquina de adsorción:

- a) La temperatura del adsorbente es uniforme.
- b) El vapor del adsorbato es adsorbido uniformemente en el lecho del adsorbente.
- c) Tanto en la fase sólida como en la fase vapor existe equilibrio termodinámico.

2.3. Revisión sobre instalaciones de refrigeración solar

Se lleva a cabo un estudio con 81 sistemas de refrigeración solar instalados a gran escala [5]. De ellas, 73 instalaciones están ubicadas en Europa, siete en Asia (China en particular) y una en América (México). El 60% de estas instalaciones están dedicadas a edificios de oficinas, el 10% a fábricas, el 15% a laboratorios y centros de educación, el 6% a hoteles y el porcentaje restante a edificios con un uso final diferente (hospitales, centros deportivos, etc.).

Dentro de ellas, 56 instalaciones son de enfriadoras de adsorción, 10 son enfriadoras de adsorción y 17 de DEC (refrigeración evaporativa por desecante). Entre las instalaciones de DEC, sólo 2 son sistemas de uso de un regenerador de líquido (desecante líquido). La capacidad total de enfriamiento de los refrigeradores solares térmicos es 9 MW, del cual el 31% se instala en España, el 18% en Alemania y 12% en Grecia (ver figura 1).

Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción

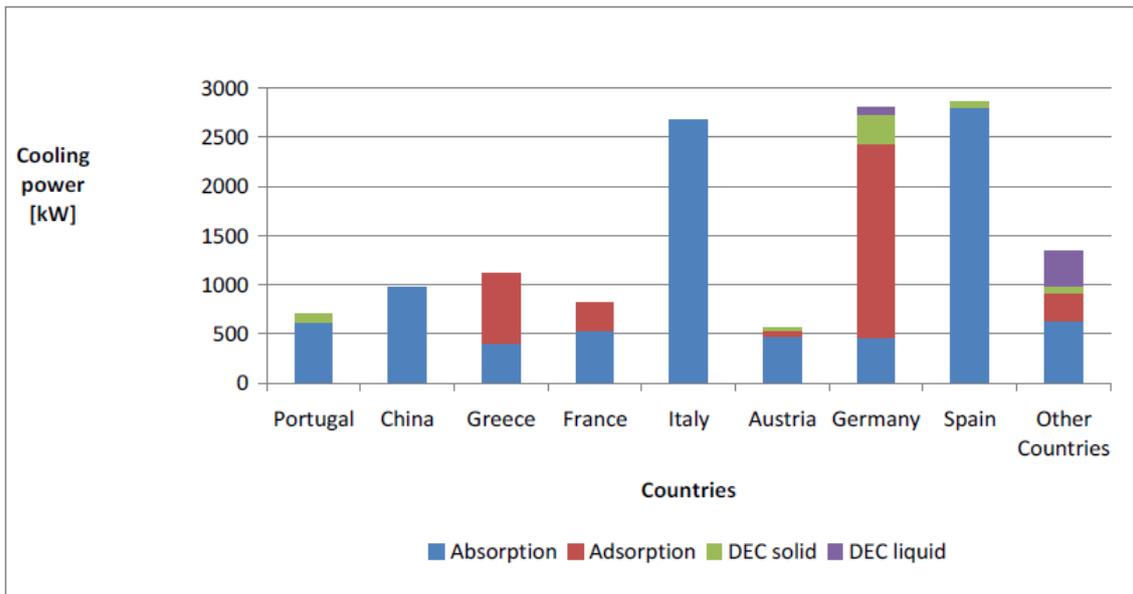


Figura 1. Capacidad total de enfriamiento por países

La capacidad total de refrigeración solar se consigue con la instalación de 23720 m² de captadores solares térmicos. El 53% de la superficie bruta total se realiza de FPC (captadores de placa plana), el 37% del VTC (captadores de tubo de vacío), el 7,3% de la CCP (captadores cilíndricos compuestos) y el 2,6% de AH (calentadores de aire). Sólo una instalación, un hotel en Dalaman (Turquía) se aplica la tecnología PTC (a través de captadores parabólicos). Las principales superficies de energía solar térmica instalada con fines de refrigeración se encuentran en España, Alemania y Grecia con el 24%, 20% y 18% respectivamente de la superficie total (figura 2).

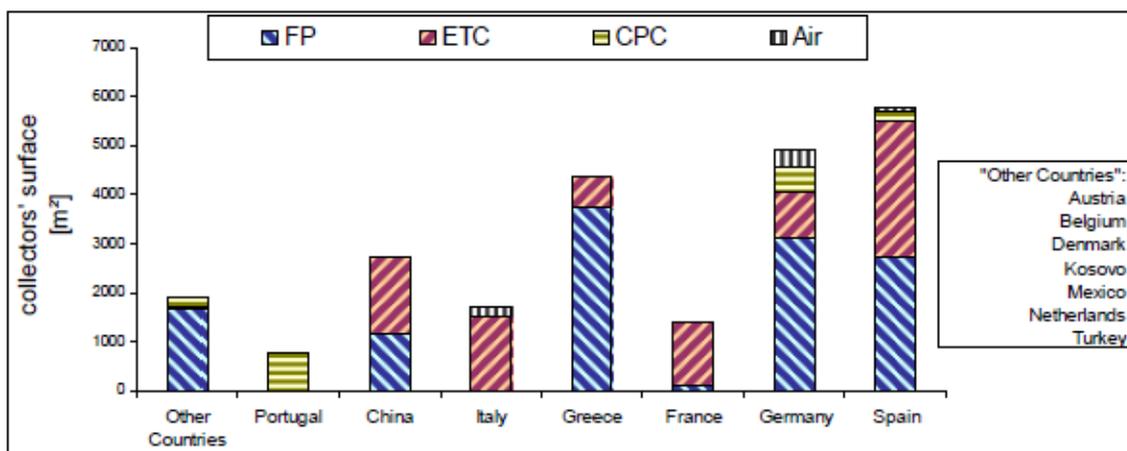


Figura 2. Tipos de captadores usados por países

La mayor planta de refrigeración solar está ubicada en Viotá (Grecia). Se trata de una fábrica de cosméticos y se han colocado dos enfriadoras de adsorción (350 kW cada una). Han sido instalados 2700 m² de captadores de placa plana para la entrega de calor a las enfriadoras de adsorción, así como a los procesos de fábrica.

Se observa que los datos recogidos demuestran que no todas las combinaciones de "captadores solares/calor accionado por máquina de refrigeración" se han utilizado debido a la poca idoneidad de alguna combinación.

La instalación del Centro Tecnológico CARTIF en Valladolid (España), por ejemplo es de 37.5 m² de FP y 40 m² de captadores de VT que alimentan de energía solar en una máquina de absorción de 35 kW.

A continuación se presentan los distintos usos que tiene la refrigeración mediante energía solar según sean los equipos de poca o de elevada potencia.

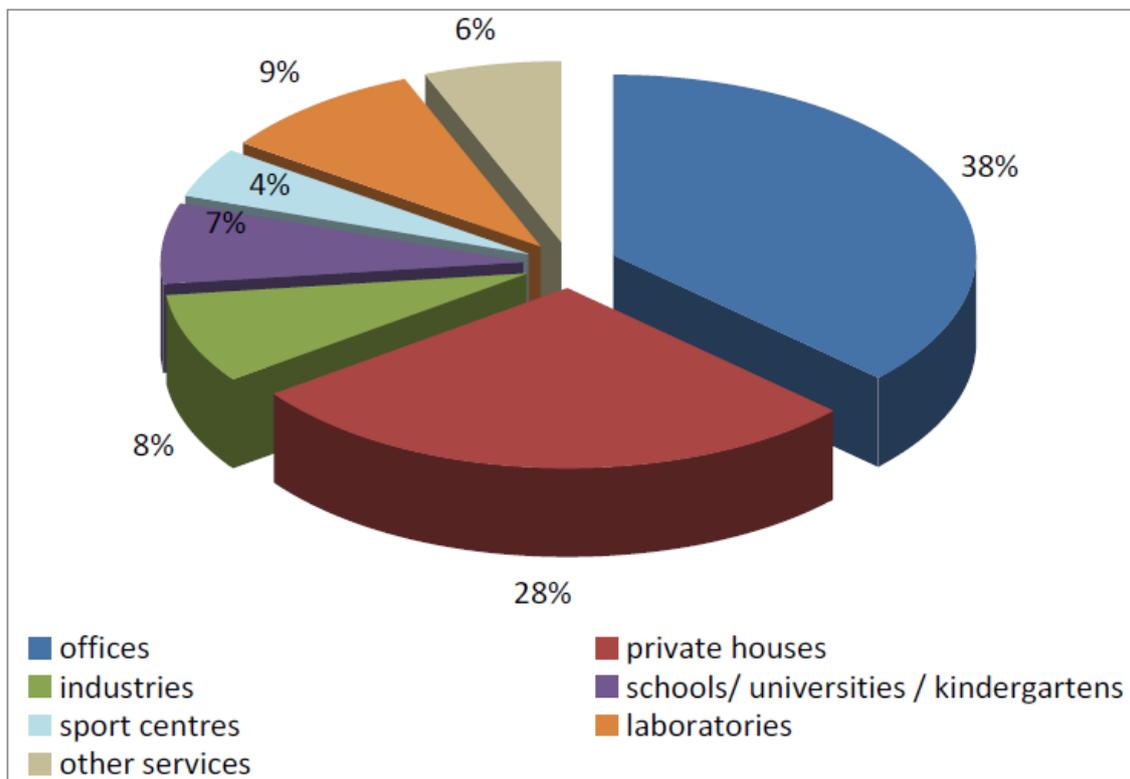


Figura 3. Uso de las instalaciones de refrigeración solar a pequeña escala

Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción

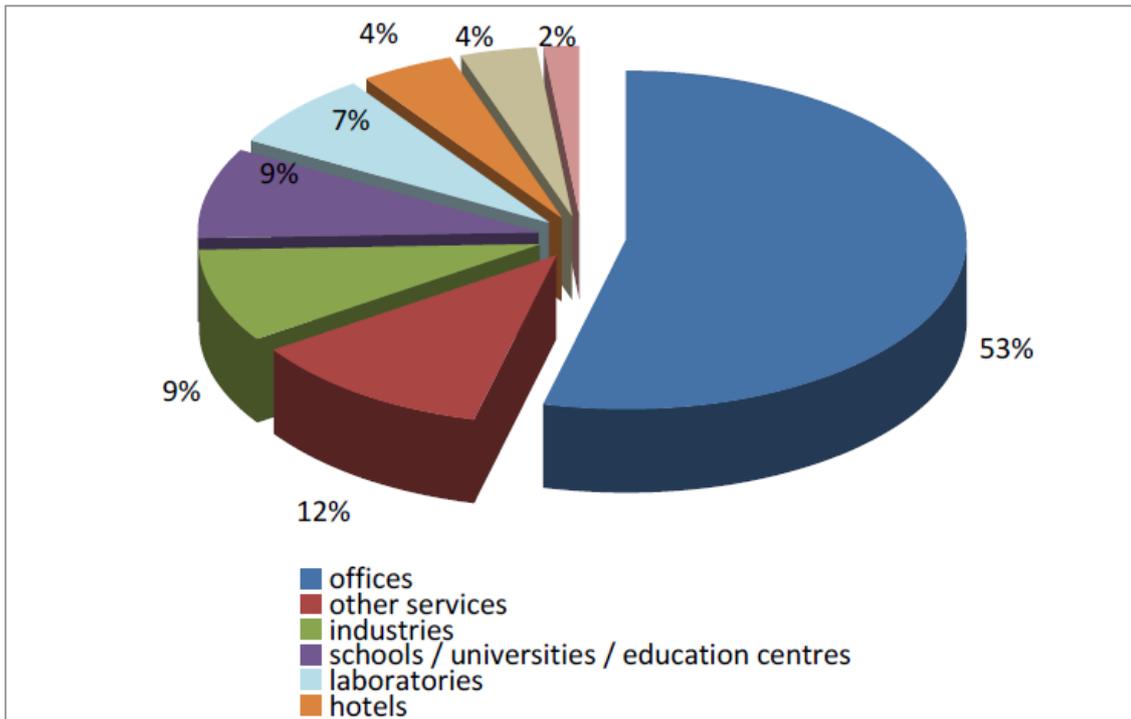


Figura 4. Uso de las instalaciones de refrigeración solar a gran escala

3. Resumen del contenido y objetivo del proyecto

Con esta introducción realizada, el objetivo del proyecto será la presentación de la tecnología de la refrigeración solar en general y la refrigeración por adsorción en particular y ver sus avances mediante un estudio del estado del arte.

A continuación se describe en profundidad el proceso de adsorción, las características de los principales adsorbentes y una completa descripción de la máquina de adsorción.

Se analizarán instalaciones llevadas a cabo con esta tecnología en el mundo comprobando tamaño, prestaciones, rendimiento, usos, ahorro eléctrico y/o energético...

También se estudiarán todos los avances que se han obtenido en los últimos años y se analizará el futuro que puede tener esta tecnología comparando sus ventajas e inconvenientes.

Por otro lado se han estudiado posibles modelos matemáticos que se puedan aplicar a las máquinas de adsorción.

Y finalmente se analizará el papel que juega esta tecnología en diferentes países viendo su importancia y aplicaciones.

Todo ello con el objeto de conocer la situación actual en la que se encuentra esta tecnología, ver las aplicaciones que tiene, la situación en cuanto a fabricantes y comprobar las condiciones para las cuales esta tecnología puede ser interesante además de rentable.