

UNIVERSIDAD DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA UTEC

Carrera de Ingeniería Mecánica



Estudio de viabilidad de un sistema solar de refrigeración por absorción para la implementación en campamentos de extracción en la selva peruana

Feasibility study of a solar refrigeration absorption system for implementation on resource extraction camps in the Peruvian jungle

Trabajo de investigación para obtener el grado de Bachiller en Ingeniería Mecánica

Manuel Ignacio Salazar Massaro

Código 201510162

Asesor

Eunice Villicaña Ortiz

Lima – Perú

Mayo 2019

El trabajo de investigación

Estudio de viabilidad de un sistema solar de refrigeración por absorción para la implementación en campamentos de extracción en la selva peruana

Ha sido aprobada

[Nombres y apellidos del Presidente de Jurado]

[Nombres y apellidos del Asesor de la tesis]

[Nombres y apellidos del Tercer jurado]

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
Alcance.....	1
Antecedentes	6
Justificación y motivación	7
Objetivo general	7
Objetivos Específicos.....	7
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	9
1.1 Condiciones de la ubicación	9
1.1.1 Ubicación geográfica	9
1.1.2 Condiciones climáticas	10
1.2 Condiciones de trabajo.....	12
1.2.1 Tiempos de trabajo	12
1.2.2 Espacios de trabajo	12
1.2.3 Ambiente actual en espacios de trabajo.....	12
1.3 Máquina de absorción.....	13
1.3.1 Concepto de máquina de absorción general	13
1.3.2 Funcionamiento interno de máquina de absorción	13
1.3.3 Evaluación de una máquina de absorción.....	15
1.4 Sistema de refrigeración por absorción.....	16
1.4.1 Diseño general del sistema	16
1.4.2 Enfriador por absorción	17

1.4.3	Colectores solares	18
1.4.4	Equipo de enfriamiento de aire	20
1.4.5	Tanques de almacenamiento de agua caliente	20
1.4.6	Sistema de calentamiento de respaldo	21
1.4.7	Sistema de control.....	22
1.5	Condiciones actuales de operación	22
1.5.1	Sistema de refrigeración convencional	22
1.5.2	Generación eléctrica	22
1.6	Criterio de determinación de efectividad.....	23
1.6.1	Propósito del análisis	23
1.6.2	Metodología de análisis	24
1.6.3	Impactos del sistema de refrigeración convencional	26
1.6.4	Impactos del sistema de refrigeración por adsorción solar	26
1.7	Alternativas de refrigeración	27
1.7.1	Paneles fotovoltaicos	27
1.7.2	Refrigeración por adsorción	28
1.7.3	Conexión a la red eléctrica	29
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1 Producción fiscalizada de gas natural en el Perú y Camisea 2004-2013[2].....	1
Fig. 2 Producción fiscalizada y pronóstico de gas natural en lotes 88-56-57[8].....	2
Fig. 3 Plataforma de Perforación - Sagari[11].....	2
Fig. 4 Gráfico de temperaturas y precipitación para Nuevo Mundo - Cusco[14]	4
Fig. 5 Mapas de Irradiación solar por temporada - Cusco[18].....	5
Fig. 6 Mapa Satelital de Base Nuevo Mundo[29]	9
Fig. 7 Diagrama de Máquina de Absorción[39].....	14
Fig. 8 Diagrama de componentes principales de un sistema de refrigeración solar por absorción.....	16
Fig. 9 Diagrama de un colector solar de panel plano (FPC)[41].....	19
Fig. 10 Pasos de método de análisis de costo beneficio[46]	24
Fig. 11 Diagrama de ciclo de adsorción básico	28

RESUMEN

En el Perú existen campamentos en la selva dedicados a la extracción de gas natural. En estos campamentos se requiere mantener las áreas de trabajo y recreación bajo aire acondicionado para permitir a los trabajadores estar en un ambiente cómodo. Actualmente se utilizan sistemas de refrigeración normales utilizando electricidad generada por grupos electrógenos alimentados con gas natural. Sin embargo, empresas como Repsol tienen intereses en reducir la cantidad de gas natural utilizado en estos campamentos para poder mejorar su rendimiento.

Para lograr esta mejora de rendimiento se propone realizar un análisis de sistemas alternos de refrigeración utilizando la energía solar. Un sistema de refrigeración como este necesita ser 100% confiable, y un sistema que utiliza energía no puede funcionar bajo condiciones climáticas desfavorables o durante la noche. Por esto se propone implementar un sistema híbrido donde gas natural se puede utilizar para mantener la confiabilidad al 100%.

Este trabajo buscará determinar la viabilidad de la implementación de un sistema de refrigeración utilizando energía solar que reduzca el consumo de gas, estimar sus costos, efectividad y reducción del consumo de gas en el campamento. Para lograr esto se tendrá que determinar las propiedades del sistema deseado y los componentes necesarios para la implementación. También se busca determinar cómo este sistema se implementaría específicamente en el campamento de extracción de Repsol.

Esta investigación es distinta a la literatura utilizada puesto que nunca se ha investigado el uso de un sistema como este en un ambiente tropical como el de la Amazonía peruana. En un ambiente como este siempre hay necesidad de refrigeración y normalmente hay problemas con el acceso a la red eléctrica, así que la posibilidad de un sistema de refrigeración independiente es un objetivo importante y deseable.

INTRODUCCIÓN

Alcance

En el Perú, previo a la puesta en marcha del Proyecto Camisea, la industria del gas no era muy significativa, estando limitada al yacimiento de Aguaytía en la selva central y en los yacimientos de gas natural en la costa Norte[1]. Tras el descubrimiento de las reservas de gas en la región de Camisea en 1981 por la empresa Shell y la subsecuente explotación de estas en el 2004 por Shell y Mobil, luego principalmente por Pluspetrol, y con el apoyo del gobierno peruano, se desarrollaron los campamentos en los lotes 88 y 56[2]. El apoyo del gobierno tuvo lugar al publicarse la Ley N.º 27133[3] y la Ley N.º 26221[4] donde se fija el precio del gas natural, incentivos que reducen el riesgo de inversión y promueven el desarrollo de estos proyectos. Esto permitió la reducción de la dependencia de la generación hidroeléctrica, la cual representaba 85% del total de energía generada en el país en el 2002, a un 48% de la energía por generación hidroeléctrica y 46% por generación térmica utilizando gas natural[5].

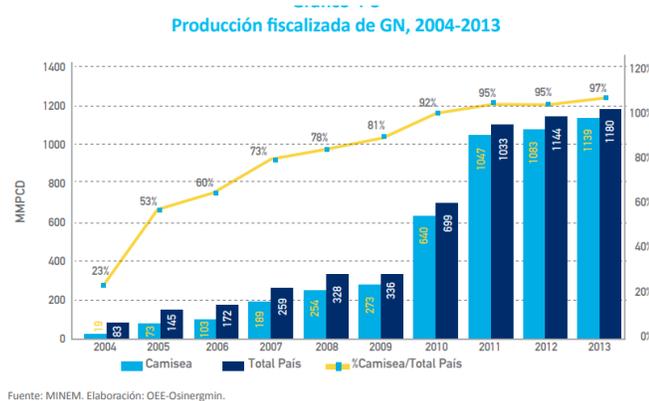


Fig. 1 Producción fiscalizada de gas natural en el Perú y Camisea 2004-2013[2]

La producción nacional de gas natural está representada en más del 95% por los tres lotes más importantes, los lotes 88, 56 y 57 [6][7]. Estos tres lotes están ubicados en el área de Camisea, en el norte del departamento de Cuzco. El lote 88 y 56 son operados principalmente por Pluspetrol y operan desde el 2004 y 2008 respectivamente[8]. El lote 57,

operado por Repsol y CNPC inició operaciones en el 2014 y representa aproximadamente 200 MMPCD (millones de pies cúbicos por día) de gas natural, 11% de la producción nacional[8].

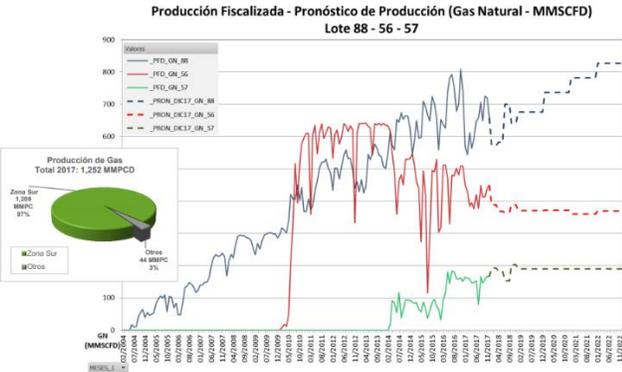


Fig. 2 Producción fiscalizada y pronóstico de gas natural en lotes 88-56-57[8]

El gas natural extraído en Camisea es utilizado para la exportación y el consumo interno, ya sea para generación de electricidad o para quemado directo. Aproximadamente 50% de la producción es exportada y el otro 50% es utilizado dentro del país[9]. La producción exportada representa un 2% de las exportaciones nacionales, o 650 millones de dólares en el año 2016[10]. En el caso de generación eléctrica, el gas natural representa ligeramente menos del 50% de la producción nacional de electricidad[5]. Por estas razones el gas natural es un recurso vital para la industria nacional, puesto que con el precio de 3 USD/MBTU permite generar electricidad a un precio menor de 0.05 USD/kWh[5].



Fig. 3 Plataforma de Perforación - Sagari[11]

Dentro de un lote existen varios campamentos de extracción. En el Lote 57 existen los campamentos de Nuevo Mundo, Kinteroni, Sagari AX y Sagari BX[12]. Cada campamento puede tener más de un pozo de extracción. Aparte de los pozos, un campamento requiere varios otros sistemas para operar, como un sistema eléctrico, un sistema de separación de gas, sistemas de licuefacción de gas, áreas de construcción, módulos de trabajo, módulos de vivienda, etc. Para mantener en operación proyectos en áreas tan remotas, se requiere hospedaje y áreas de trabajo para todos los trabajadores. Los campamentos pueden ser de tamaños de 16 hasta 300, el campamento más grande siendo la principal Base Nuevo Mundo, con capacidad de 300 personas[13].

Los tres lotes mencionados se ubican en el área de Camisea, la cual se encuentra en la selva al norte del departamento de Cuzco. La temperatura promedio durante el año varía ligeramente, entre 23°C y 28°C, aunque en los meses más cálidos se pueden tener temperaturas de 32°C[14]. La variación no es significativa y la mayor parte del tiempo la temperatura está a un nivel que no causaría problemas de confort térmico, sin embargo el clima de la selva tiene altos niveles de humedad, y se mantiene normalmente cerca al punto de saturación[15]. Los altos niveles de humedad aumentan drásticamente la sensación térmica, lo que hace que un sistema de refrigeración sea indispensable para mantener condiciones de confort en el interior de los campamentos[16].

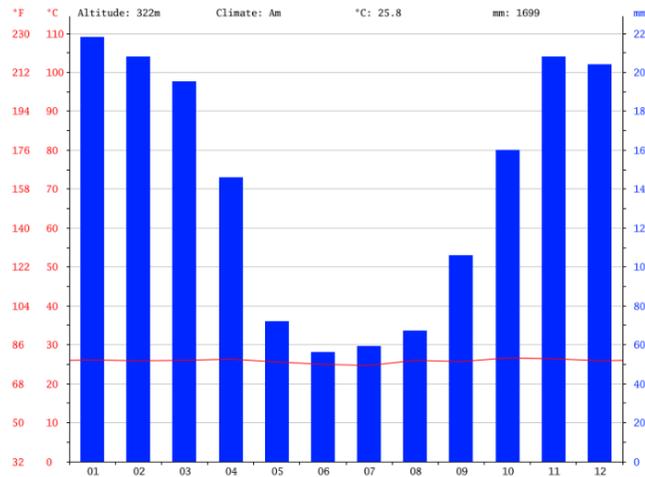


Fig. 4 Gráfico de temperaturas y precipitación para Nuevo Mundo - Cusco[14]

Actualmente para mantener los ambientes a temperaturas razonables se utilizan métodos de refrigeración convencionales, los cuales requieren del consumo eléctrico, el cual proviene de un grupo electrógeno que abastece el campamento, puesto que no hay conexión a la red eléctrica. Este grupo electrógeno está alimentado con gas extraído en el campamento[13]. Esto significa que el rendimiento del campamento se ve reducido puesto que parte del gas se utiliza para mantener los sistemas de refrigeración, y se necesita un sistema de pequeña escala de procesamiento de gas natural puesto que para ser consumible por un grupo electrógeno se requiere remover contaminantes como mercurio, sulfhídricos y agua.

En respuesta a este problema, la empresa Repsol ha propuesto el desarrollo de un sistema de refrigeración cuyo consumo de gas sea reducido. En este sentido, el empleo de la energía solar se visualiza como una alternativa que permitiría reducir significativamente el consumo de energía. La irradiancia solar en la selva es bastante menor que en el altiplano o en la costa peruana gracias a las lluvias[17], sin embargo la ventaja de grandes cantidades de espacio disponible para equipo solar se puede implementar de manera rentable si se utilizan maneras de bajo costo por metro cuadrado para obtener la energía. Esto dificulta la posibilidad de uso de paneles fotovoltaicos, sin embargo, otros métodos de obtener energía solar que presenten un costo por mega watt de refrigeración pueden ser viables.

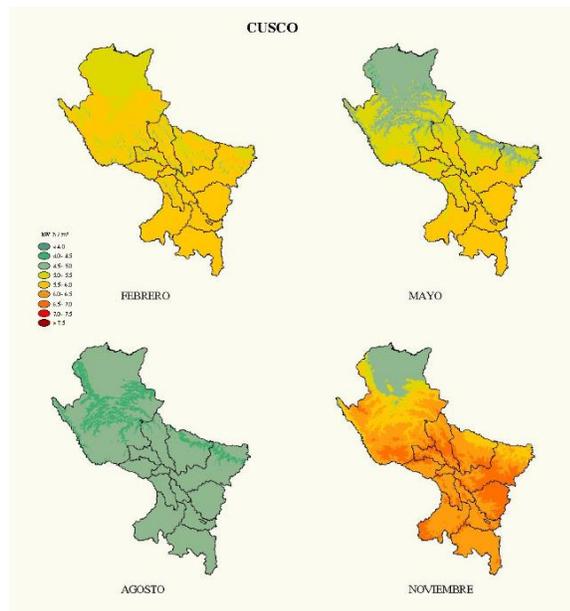


Fig. 5 Mapas de Irradiación solar por temporada - Cusco[18]

Un método viable es el uso de un sistema de refrigeración por absorción. Este método utiliza paneles colectores de agua, de relativamente bajo costo por metro cuadrado, para calentar agua durante el día. Esta agua caliente es utilizada para alimentar un enfriador por absorción, lo cual es un sistema que utiliza un ciclo cerrado de un fluido que es capaz de absorber agua a distintas condiciones, y usar su cambio de temperatura durante cambios de fase para enfriar un fluido que puede ser utilizado como refrigerante. Los sistemas de refrigeración por absorción son comunes en plantas que implementan la trigeneración, pues son capaces de aprovechar los gases de escape de los generadores para calentar el agua que utilizan, y efectivamente recuperar energía que hubiese sido perdida, además de generar electricidad y calor. En el caso particular de investigación este método puede ser viable por su bajo costo de implementación por metro cuadrado de colectores y el bajo nivel de complejidad de su implementación.

Una ventaja importante es que este sistema puede mantener la energía térmica acumulada durante el día dentro de tanques donde se acumula el agua que ha sido calentada durante el día. En el caso de paneles solares fotovoltaicos, cuando se utilizan en sistemas que deben operar de manera ininterrumpida al estar desconectada de la red, un gran problema es que la energía se tiene que almacenar en baterías de alto costo, factor que aumenta el costo

por mega watt. En el caso de un sistema por absorción el costo de capacidad de almacenamiento de energía es significativamente menor, dando más viabilidad al desarrollo de un sistema solar que puede ser confiable durante épocas de lluvia. Otra ventaja de métodos por absorción es que la energía es convertida directamente en energía térmica para impulsar el sistema de refrigeración, sin necesidad de convertir la energía como en el panel fotovoltaico de solar, a eléctrica, a mecánica y luego aplicarla al sistema de refrigeración, generando pérdidas en cada etapa. Estas ventajas específicas para un sistema de refrigeración desconectado de la red pueden permitir que un sistema de refrigeración por adsorción, que no es rentable en condiciones convencionales, puede serlo en un campamento en el lote 57.

El método de refrigeración por adsorción es común en investigación en literatura y en soluciones y métodos comerciales disponibles de los diferentes componentes del sistema, sin embargo, no como una solución íntegra. Una prueba piloto experimental puede ser justificada en caso la viabilidad del método lo amerite. Para poder determinar la viabilidad de esta opción se requiere hacer un análisis de costo beneficio al nuevo sistema y calcular si existe algún beneficio neto de implementar esta solución.

Antecedentes

Existe vasta investigación de métodos de utilizar absorción con colectores solares para generar refrigeración[19]. Esto es un tema en el que existe literatura desde los 1970[20] hasta la actualidad. Las máquinas de absorción son comunes en la industria de generación de energía cuando se requiere trigeneración y por lo tanto su efectividad ha sido analizada[21]. Se ha investigado la eficiencia de los tipos de paneles utilizados[22], [23] y se han analizado estos de manera comparativa[24].

Se han implementado sistemas de refrigeración por absorción solar en varios países donde hay acceso a energía solar como en Grecia[19], Turquía[25] y Malasia[23]. El último siendo significativo pues tiene un clima tropical similar a la selva amazónica. No existe investigación para la implementación de un sistema similar en la selva amazónica, sin embargo existe investigación del uso de colectores solares en la selva como acumulación de

energía térmica, principalmente para el uso como agua caliente[26]. Esto muestra que la energía por colectores solares puede ser viable en la selva, pero se tiene que investigar como esta generación de agua caliente aplicaría a un sistema de refrigeración por adsorción.

Justificación y motivación

Este trabajo responde a la necesidad de la empresa Repsol del desarrollo de una propuesta para un diseño de un sistema de refrigeración utilizando energía solar para ser implementado en sus campamentos de lote 57. Esto se requiere para reducir el consumo de gas natural en refrigeración y acondicionamiento para los trabajadores, sin la pérdida de confiabilidad que un sistema abastecido únicamente con gas natural permite. Por tal motivo, se propone el dimensionamiento de un sistema de refrigeración por adsorción que responda a las especificaciones requeridas, dadas por las condiciones de confort y el entorno del sitio.

El desarrollo de este proyecto requiere la aplicación y conocimiento de varias ramas de ingeniería. La ingeniería mecánica enfoca el lado de la estructura del sistema y los materiales adecuados para su construcción y transferencia de calor correcta, en la que se emplean habilidades de termodinámica y de transferencia de calor. También se requiere temas de ingeniería de la energía por el análisis energético del sistema.

Objetivo general

Dimensionar y evaluar la viabilidad de un sistema alternativo de refrigeración por adsorción utilizando energía solar en un campamento de extracción de gas natural en la selva peruana.

Objetivos Específicos

Diseñar un sistema termodinámico utilizando refrigeración por absorción que pueda mantener el acondicionamiento de un módulo del campamento.

Dimensionar las especificaciones del sistema requeridas para un módulo en el campamento, de manera que pueda ser escalable.

Realizar un análisis estimado de costo de implementación y mantenimiento del sistema en el campamento.

Realizar un análisis costo beneficio comparando la instalación de un nuevo módulo utilizando un sistema de refrigeración por absorción con un sistema de refrigeración convencional.

CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Condiciones de la ubicación

1.1.1 Ubicación geográfica

La investigación se plasma en investigar la viabilidad para la implementación de un sistema de refrigeración por absorción utilizando energía solar en el campamento de la empresa Repsol designado como el Lote 57. Este se ubica en el distrito de Megantoni, provincia de La Convención, en el departamento de Cuzco[27]. Las coordenadas del campamento específico son $11^{\circ}33'01''S$ $73^{\circ}08'39''W$ [28]. Este campamento se encuentra a las orillas del río Urubamba, a más de 100 km río arriba y 100 km río abajo de los pueblos de Atalaya y Kiteni respectivamente. Acceso al campamento solo es posible a través de modo aéreo en la pista de aterrizaje y helipuertos que contiene el campamento, o de modo fluvial por el río Urubamba. El campamento está rodeado por selva amazónica que prohíbe el fácil desarrollo de infraestructura para la conexión del campamento con el resto del país.



Fig. 6 Mapa Satelital de Base Nuevo Mundo[29]

El campamento no tiene acceso a servicios públicos como electricidad o agua corriente. La electricidad requerida es generada en el mismo campamento utilizando generadores de combustión que utilizan gas natural. En el lote designado existe un

campamento principal denominado Nuevo Mundo y varios campamentos de extracción satélites, entre ellos Kinteroni, Sagari AX y Sagari BX. Estos campamentos están entre 5 a 10 km del campamento principal, y existe acceso a ellos mediante vías. El gas natural extraído es enviado a la planta de Malvinas a través de un gaseoducto de 60 km para poder ser procesado y comercializado.

La ubicación es remota puesto que se necesita estar en la ubicación donde los recursos de gas natural existen de manera abundante, para hacer rentable la extracción. Estos campamentos tienen que estar equipados con la infraestructura para poder albergar toda la población de los campamentos durante la noche, la alimentación de toda la fuerza de trabajo, el equipo para la extracción de gas natural, el equipo para el envío de gas natural a través del gaseoducto, entre otros usos.

Por la abundancia de gas natural en la región y el interés las compañías en actividades de extracción de gas natural, se espera que se den más expansiones dentro de los lotes ya desarrollados y en nuevos lotes. Estos futuros lotes tendrán condiciones de operación similares a las de los campamentos existentes, por lo que mejoras a los campamentos actuales pueden ser aplicadas de manera inicial a planes para nuevos campamentos en desarrollo.

1.1.2 Condiciones climáticas

Para poder evaluar la viabilidad de un sistema de refrigeración por energía solar, se tiene que poder determinar las condiciones climáticas del campamento para poder calcular cuanta energía se puede generar, cuantos paneles se necesitarán y cuanto enfriamiento se necesita para mantener el módulo a una temperatura específica. La información requerida para definir las propiedades de un sistema de refrigeración son indicadas en los principios para dimensionamiento de un sistema HVAC (Heating, Ventilation, Air Conditioning) [30].

Los principales datos son la temperatura de bulbo seco y bulbo húmedo correspondientes al 0.4%, 1% y 2% de la frecuencia acumulada anual de ocurrencia. Esto significa encontrar la máxima temperatura que se mide durante esos porcentajes durante las horas de todo el año. En el caso de 0.4%, esto requiere la temperatura máxima que ocurre durante un mínimo de 35 horas al año. Estos valores son importantes para determinar las

cargas de deshumidificación necesarias que tiene que proveer el sistema de aire acondicionado. El punto de rocío y el rango de temperatura anual correspondientes a los mismos porcentajes de frecuencia acumulada anual de ocurrencia y las temperaturas concurrentes. Se utilizan estas medidas en vez del máximo y el mínimo de temperaturas, puesto que no es económicamente viable dimensionar un equipo de refrigeración para condiciones que solo ocurren durante pocas horas al año. Esto limita las horas durante cuando el sistema no es capaz de enfriar suficiente y los valores porcentuales son prácticas acostumbradas por la industria [30].

Por otro lado, se necesita conocer las condiciones de irradiación solar para conocer la capacidad de producción de energía solar. El rendimiento de un colector solar puede ser estimado utilizando las condiciones del ambiente [31]. Los datos más importantes en este caso son la temperatura en el ambiente y la irradiación solar total diaria por metro cuadrado sobre una superficie horizontal. Este valor es medido en kW-hr/m²-día, y toma en consideración el acceso a energía solar ajustado con las pérdidas atmosféricas, por nubes y por el ángulo de altura del sol en el cielo [32].

El SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología) es el organismo público en el Perú adjunto al ministerio de ambiente, con el propósito de generar y proveer información meteorológica, hidrológica y climática en el Perú[33]. Sin embargo el SENAMHI recopila data utilizando estaciones meteorológicas ubicadas en distintas localidades en el Perú, pero esto se limita a lugares donde existen poblaciones públicas y no en campamentos de empresas privadas[34].

El campamento tiene una estación meteorológica, sin embargo, al ser una empresa privada, acceso a la información requerida puede estar restringido. En caso no se pueda tener acceso a las condiciones directas de la empresa, se puede tener acceso a data mundial utilizando el portal de NASA, power LaRC (Langley Research Center) [35]. Este es un proyecto que provee con data meteorológica para el apoyo de desarrollo de energías renovables. Esta data es mundial y provee con los datos más significantes para

implementación de energía solar, como la irradiancia solar total diaria por metro cuadrado sobre una superficie horizontal, temperatura diaria y humedad.

Esta data no es tan aplicable para el dimensionamiento del sistema de refrigeración, sin embargo, datos faltantes pueden ser compensados con datos de la estación meteorológica local, estimación basado en datos de ciudades con condiciones climáticas similares, o obviar la estimación del dimensionamiento del sistema de refrigeración utilizando el clima y simplemente apuntar a la misma capacidad de enfriamiento que el sistema de refrigeración actual.

1.2 Condiciones de trabajo

1.2.1 Tiempos de trabajo

En el lote 57 existen 6 áreas principales de trabajo donde también se requiere el pernocte de los trabajadores asignados. La base principal de Nuevo Mundo tiene una capacidad de 300 personas, pero acostumbra a tener una población de 180 personas. Los 5 otros son campamentos volantes con capacidad de un máximo de 16 personas. El horario de trabajo es de 6am a 6pm durante el cual se debe utilizar las instalaciones de módulo por los empleados que trabajan en oficinas. El trabajo es principalmente realizado fuera de los módulos (aprox 70%) pero igual es necesario que el aire acondicionado esté prendido en los módulos.

1.2.2 Espacios de trabajo

Los módulos básicos utilizados tienen dimensiones de 6m x 2.45m. Se requieren dos sistemas de aire acondicionado por módulo. Se acostumbra a tener 3 a 4 personas de trabajo por módulo con oficina. Los módulos están hechos de metal calamina tipo TR3 metálica con espuma de aislamiento. En el campamento se tiene aproximadamente un espacio equivalente a 100 módulos (considerando como varios módulos a áreas no modulares con área mayor) como espacio de oficinas interior refrigerado.

1.2.3 Ambiente actual en espacios de trabajo

Actualmente los módulos son refrigerados utilizando dos sistemas de aire acondicionado de 12,000 BTU y la temperatura es mantenida a 22°C. Este aire acondicionado se mantiene encendido durante el día y durante la noche solo se mantienen encendidos los que se utilizan para el pernocte. Existe un control del aire acondicionado digital manual en los módulos para poder ajustar la temperatura a la deseada.

1.3 Máquina de absorción

1.3.1 Concepto de máquina de absorción general

Muchos procesos industriales generan calor residual que viene a ser energía de muy poca calidad como para extraer trabajo de ella. Una manera de aprovechar esta energía de menor calidad son las máquinas de absorción [36]. Estas máquinas permiten aprovechar calor residual en la forma de agua a alta temperatura o vapor de agua a baja temperatura, y generar un flujo de agua a baja temperatura. Un sistema de generación de energía eléctrica junto con calor y frío son conocidos como sistemas de trigeneración[21]. Estos sistemas son comunes en industrias que necesitan generar su propia energía y además requieren caudal de agua fría.

En el caso que se propone un sistema de absorción para generar refrigeración, pero la fuente de energía de baja calidad no es energía residual de un proceso industrial, pero agua caliente de colectores solares. Este es un sistema fácil de operar y confiable que puede generar frío de manera eficiente considerando el bajo grado de la energía que se le provee [37].

A diferencia de un sistema de refrigeración convencional que utiliza un fluido refrigerante interior, un sistema de adsorción utiliza dos fluidos, un absorbente y un absorbato, que también son conocidos como una combinación de solvente y refrigerante. En los casos más comunes se utiliza una combinación de LiBr (Bromuro de Litio) y agua, o una combinación de agua y NH₃ (amonio), como una combinación de solvente y refrigerante respectivamente[20].

1.3.2 Funcionamiento interno de máquina de absorción

El sistema de refrigeración por absorción más simple consta de 4 cámaras conectadas. Estas son el generador, condensador, evaporador y absorbedor. Las cuatro cámaras están mostradas en la Fig. 7. Este diagrama incluye un quemador de gas en el generador, el cual puede ser reemplazado con un intercambiador de calor que contiene agua a alta temperatura (75-90°C)[37]. Para describir el ciclo a continuación se utilizará un ejemplo de temperaturas y presiones de un ciclo convencional de absorción utilizando LiBr como solvente y agua como refrigerante[38].

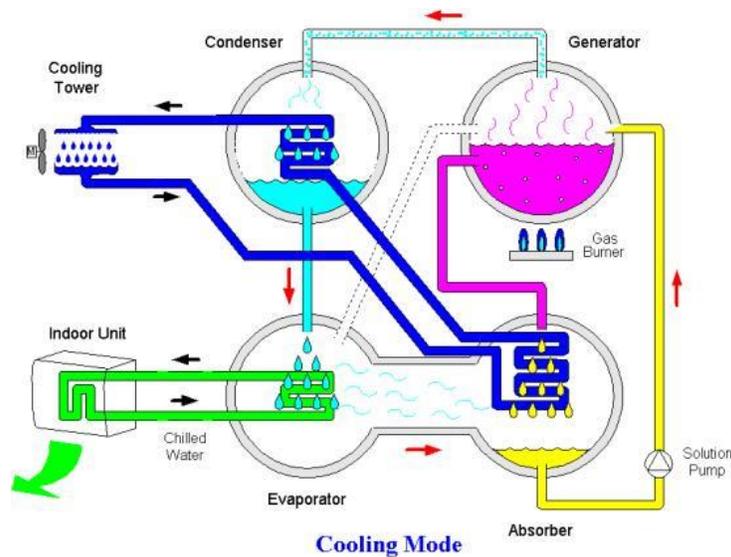


Fig. 7 Diagrama de Máquina de Absorción[39]

El generador contiene una mezcla de solvente y refrigerante concentrada a una presión, alta relativa a la presión del evaporador y absorbedor ($\sim 0.01 \text{ atm}$), pero baja en términos absolutos ($\sim 0.1 \text{ atm}$). A medida que la temperatura aumenta en la solución, la capacidad del solvente de mantener el refrigerante disuelto disminuye, y el refrigerante se vuelve un vapor caliente.

El vapor viaja al condensador donde se encuentra un intercambiador de calor. Este intercambiador de calor transfiere calor del vapor de refrigerante a agua a temperatura ambiente que circula por las tuberías. Esta agua es interna al sistema de absorción y no está conectada a los sistemas de agua helada que se usar para refrigerar ni al sistema de agua

caliente que viaja a los colectores solares. El refrigerante al perder calor se condensa en las tuberías y se acumula en la parte inferior del condensador.

El refrigerante es luego enviado a través de una válvula de expansión para reducir la presión y temperatura del refrigerante. El refrigerante luego entra al evaporador donde se encuentra otro intercambiador de calor, sin embargo, esta vez el intercambiador contiene el ciclo de agua fría (entrada a ~12°C y salida a ~7°C). Como se encuentra a muy baja presión, la temperatura de equilibrio del vapor húmedo de refrigerante es más baja que la del agua (~4°C), el refrigerante enfría el agua fría hasta su temperatura de salida, y se evapora en el proceso.

El vapor de refrigerante viaja del evaporador al absorbedor, donde se encuentra el solvente a una menor concentración. Este solvente ha sido condensado luego de ser enviado por una válvula de estrangulamiento desde el generador para reducir su presión y temperatura, y condensado en las tuberías de agua a temperatura ambiente. El refrigerante es absorbido y disuelto en el solvente, y esta solución concentrada es enviada al generador para iniciar el ciclo nuevamente.

En este sistema existen los ciclos de agua caliente, agua fría, agua a temperatura ambiente, refrigerante y solvente, todos siendo ciclos cerrados. El agua a temperatura ambiente es enfriada utilizando ventiladores y aire ambiental, y en este calor es donde todo el calor residual puede salir del sistema.

1.3.3 Evaluación de una máquina de absorción

Un sistema de refrigeración por absorción puede ser evaluado midiendo su coeficiente de rendimiento, al igual que en otras máquinas térmicas. En el caso de una máquina de absorción de una etapa el COP está dado por la siguiente fórmula[36]:

$$COP = \frac{\textit{capacidad de enfriamiento en el evaporador}}{\textit{entrada de calor en el generador + trabajo requerido por la bomba}}$$

En caso de sistemas de refrigeración con más etapas, se puede encontrar máquinas con mayores COP y fórmulas más elaboradas, sin embargo, el principio general es el mismo.

Sistemas de absorción de LiBr y Agua y de una etapa tienden a tener un COP de 0.5-0.7. Estos indicadores son útiles para comparar eficiencias entre sistemas similares de absorción, por otro lado, en esta investigación se busca comparar este sistema a un sistema de refrigeración convencional, por lo que este indicador no se presta a ser útil para el análisis de efectividad, pero se puede utilizar para calcular cuánto frío se está generando con cada litro de agua caliente que se provee al sistema. Esto permite dimensionar el equipo necesario para reemplazar el aire acondicionado convencional y permite saber el caudal de agua caliente que se necesitará para hacer funcionar el sistema.

1.4 Sistema de refrigeración por absorción

1.4.1 Diseño general del sistema

El objetivo principal en esta investigación es analizar la viabilidad de un sistema integrado de aire acondicionado, incluyendo la generación de energía utilizando los colectores solares, la generación de agua fría utilizando una máquina de absorción, la manera de acumular el agua caliente y la manera de distribuir el agua fría al módulo a refrigerar. Para esto se utilizará un sistema de refrigeración por absorción convencional, que ha sido utilizado de manera comercial en ubicaciones industriales y de oficinas en distintos lugares en el mundo[19][23].

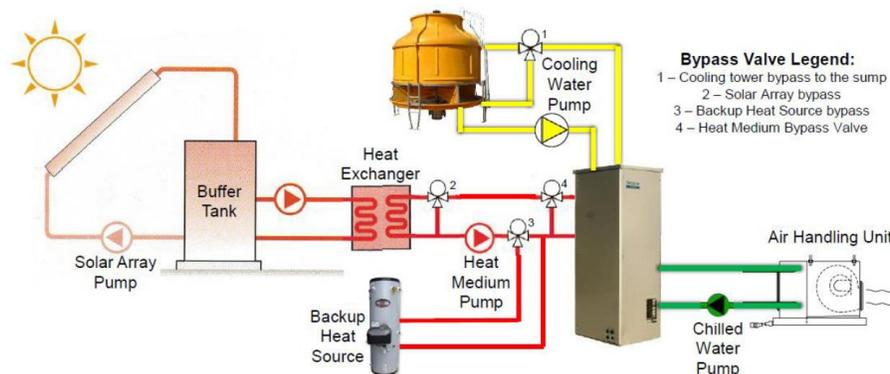


Fig. 8 Diagrama de componentes principales de un sistema de refrigeración solar por absorción

Se utilizará un sistema equivalente al propuesto por la empresa Yazaki, comercializadora de máquinas de refrigeración por absorción [40]. En la Fig. 8 se pueden identificar todos los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema. Se requiere también una cierta cantidad de bombas para que el sistema pueda funcionar, pero esas no se tienen que detallar, puesto que todas son bombas de agua y simplemente se tiene que seleccionar una adecuada para su caudal, puesto que no se necesita un alto gradiente de presión en esta aplicación. Se espera que el equipo se encuentre principalmente al mismo nivel. No mostrado en el diagrama es el sistema de control que se tiene que implementar junto con todo el equipo. Este sistema debería poder controlar el funcionamiento de todas las bombas y válvulas en el sistema de manera automática para poder mantener el sistema en funcionamiento.

1.4.2 Enfriador por absorción

El propósito de un enfriador por absorción en este sistema es utilizar el agua caliente proporcionada por los colectores solares y utilizar esa energía para enfriar el agua de refrigeración. La propiedad más importante al seleccionar un equipo de adsorción es la cantidad y temperatura de agua fría de refrigeración que puede proveer por hora. Esta define el tamaño de todo el sistema y por tanto controla cuanto ambiente se puede refrigerar y cuantos equipos se necesitarán para cada número de módulos. Como enfoque de esta investigación se busca dimensionar un prototipo para refrigerar solo un módulo, así que de preferencia se deberá seleccionar un equipo que entregue el suficiente frío para un módulo.

En caso se quiera expandir, se tiene que considerar la cantidad de equipos que se quiera, puesto que existen las ventajas de conseguir equipos de mayor tamaño, las cuales son principalmente el costo y eficiencia relativa, pero se compensan con la falta de redundancia en caso de alguna falla. Esta redundancia se puede obtener teniendo un mayor número de equipos conectados en paralelo, para que en caso un equipo falle, no cause un problema en la refrigeración de los ambientes.

Por otro lado, se tienen que considerar otras propiedades del sistema, como la potencia requerida para hacer funcionar la máquina. A pesar de que la mayoría de energía proviene

del agua caliente de los colectores, se necesita electricidad para mantener los equipos internos como bombas y sensores en funcionamiento. Por otro lado, se tiene que considerar los datos del caudal y temperaturas de agua caliente que se necesita, el caudal y temperatura de agua de enfriamiento que se necesita, y el tamaño que ocupa. Estas propiedades no son vitales para la selección de equipo pues en general serán similares para un equipo con la misma producción de frío, sin embargo, es información necesaria para dimensionar el resto de los equipos que lo acompañan.

1.4.3 Colectores solares

Un colector solar es un equipo que permite que un fluido se exponga al sol y por medio de la radiación solar, se caliente. Son equivalentes a paneles fotovoltaicos, pero generando calor en vez de electricidad. Sin embargo, a diferencia de los paneles fotovoltaicos, los colectores pierden eficiencia mientras mayor sea la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura interna del agua, puesto que más calor se disipa al ambiente.[41]

Existen dos principales tipos de colectores comunes en la industria, los de panel plano y los de tubos evacuados [24]. Los colectores de panel plano (FPC) consisten de una caja metálica plana aislada con un panel translucido en la parte superior y una placa absorbente debajo [41]. Dentro de la caja se contienen unos tubos por los cuales pasa el fluido a ser calentado. El panel recibe la radiación solar y trata de transmitir la mayor cantidad posible al fluido. Ya que no puede enfocar la luz, no necesita luz directa para operar, y puede operar con luz difusa.

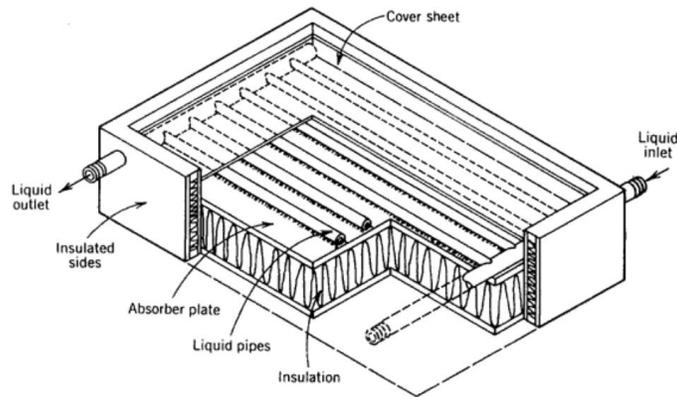


Fig. 9 Diagrama de un colector solar de panel plano (FPC)[41]

Los colectores de tubos evacuados (ETC) consisten en tubos de vidrio translucido de doble capa, donde el espacio intermedio está evacuado generando un vacío. Esto permite que la energía por radiación pueda ser transmitida libremente entre el interior y exterior del tubo, pero aislando en interior en términos de conducción térmica. El interior contiene otra serie de tubos que contienen el fluido a ser calentado[42]. Estos colectores tienen la ventaja de poder aislar mejor el calor del fluido y pueden ser utilizados con reflectores parabólicos inferiores para aprovechar más la radiación solar. Estos paneles tienden a tener una mayor eficiencia que los FPC

Ambos tipos de paneles pueden ser utilizados de manera pasiva o activa. La diferencia siendo que paneles activos incluyen algún sistema mecánico para que los paneles puedan seguir la dirección del sol y tener una mayor eficiencia. En el caso de los paneles pasivos, son orientados durante la instalación para tener el ángulo óptimo y se dejan en el lugar. Esto puede obtener una eficiencia mayor de hasta 30% [43].

Para este sistema se prevé utilizar un sistema de FPC pasivos, esto es la opción de menor eficiencia, sin embargo, se espera que los costos y complejidad de un sistema activo sean más altos que la pérdida de eficiencia, y los ETC tienden a ser más eficientes especialmente en climas fríos, donde la pérdida de calor por conducción es significativamente mayor. Por otro lado, los paneles planos tienen mayor costo y son menos frágiles que los de

tubos evacuados, por lo que se espera que estos sean más adecuados para un ambiente en la selva[24].

1.4.4 Equipo de enfriamiento de aire

El propósito de este equipo es distribuir el frío del agua proporcionada por el enfriador por adsorción, enfriando el aire en el módulo que se quiere refrigerar. Para lograr esto, este sistema consiste principalmente de un intercambiador de calor donde el agua fría fluye por una serie de tuberías expuestas al aire y un ventilador para mover el aire y aumentar la convección [44]. Una ventaja de cambiar a un sistema de refrigeración por absorción es que en este sentido no se tiene que hacer cambios respecto al sistema antiguo. En ambos casos con los sistemas de aire acondicionado normal, se debe tener un intercambiador de calor con un ventilador para permitir enfriar el aire.

Por lo tanto, en este caso no hay factores que se tienen que considerar, solo se necesita adquirir unos sistemas de ventiladores con intercambiadores de calores, que existen en el mercado, suficientes como para poder entregar la cantidad de frío que se necesita. Luego se tiene que instalar estos sistemas directamente en los módulos.

1.4.5 Tanques de almacenamiento de agua caliente

El sistema de refrigeración tiene la necesidad de poder operar durante la noche y durante momentos con falta de radiación solar por nubes o lluvia. Para esto tiene que tener una manera de almacenar el agua caliente en exceso que se produce durante momentos con alta radiación solar para ser utilizada después. En este caso se requiere unos tanques de almacenamiento de agua lo suficientemente grandes como para mantener el sistema disponible durante el tiempo determinado.

Este tanque tiene que mantener agua caliente durante largos periodos de tiempo, por lo que es necesario que este tanque esté aislado de manera efectiva para reducir pérdidas de calor. Equipo comercial que satisfaga este propósito existe como termas de diversos tamaños, así que no debería ser un problema en conseguir equipo de acuerdo a las necesidades.

Un factor para considerar es si se quiere un mayor número de tanques opuesto a un tanque más grande. Un tanque de mayor tamaño pierde menos energía por litro de agua por hora gracias a la ley cuadrática-cubica, pero tener tanques más pequeños tiene la ventaja de modularidad y más fácil instalación y mantenimiento. Para simplificar el sistema en el prototipo se preferirá usar solo un tanque, tan grande como se necesite.

1.4.6 Sistema de calentamiento de respaldo

El sistema de refrigeración tiene que ser confiable y no permitir que los módulos estén sin aire acondicionado. La naturaleza de la variabilidad de las energías renovables se opone a esto, puesto que por más que no se espera que no haya un día con condiciones favorables por muchos días seguidos, esto puede ocurrir, y el sistema tiene que estar respaldado para no causar problemas en los usuarios. Por otro lado, si se tiene el tanque y los colectores dimensionados para poder soportar un alto número de días consecutivos sin condiciones favorables, la mayoría del tiempo no se utilizará toda la capacidad del sistema de refrigeración, haciendo que su costo sea mucho mayor de lo necesario, y por tanto una opción menos viable.

Se puede tener otro sistema de aire acondicionado que se mantiene desactivado durante horas donde el sistema principal puede operar, y solo se activa cuando las reservas de agua caliente han sido agotadas. No obstante, esta solución requeriría tener todo el sistema de aire acondicionado previo en todos los nuevos módulos, privando esta solución de la reducción de costo por ya no tener que invertir en el sistema de aire acondicionado convencional.

Una solución es tener un sistema paralelo para calentar el agua caliente en vez de los colectores solares, como se muestra en la Fig. 8. Esto permite utilizar la infraestructura existente de refrigeración hasta en momentos donde no hay energía solar ni agua caliente almacenada. Esta solución requiere gas, al que ya se tiene acceso en el campamento, y no se requiere procesar el gas, puesto que como es una solución que simplemente tiene que quemar el gas, se puede utilizar el gas sin ser procesado. Estos calentadores tienen que ser capaces de mantener en operación a todo el sistema de adsorción de manera independiente.

1.4.7 Sistema de control

El sistema propuesto requiere una manera de controlar todos los equipos en el sistema de aire acondicionado. Se tiene que poder controlar las válvulas y las bombas de los flujos de agua caliente, fría y de enfriamiento. Para esto puede también necesitarse sensores de flujo para las tuberías. Para poder mantener una temperatura adecuada en los módulos también se necesita sensores de temperatura en cada módulo y sensores de temperatura en los flujos de agua para saber si hay poca radiación solar y el agua no se ha calentado a niveles adecuados.

Todos los sensores y actuadores del sistema deben estar controlados desde un controlador centralizado que pueda optimizar el uso del agua caliente y del calentador de respaldo, y debe poder mantener las temperaturas de los módulos siempre a niveles adecuados. Con solo este proceso de control ya se tiene un nivel alto de complejidad, por lo que esta investigación se centrará en solo los aspectos mecánicos y energéticos, más no de control, limitando el alcance del proyecto. Sin embargo, no queda falta decir que el sistema de control no es opcional, y para que este sistema funcione y sea viable, es vital que contenga un sistema de control.

1.5 Condiciones actuales de operación

1.5.1 Sistema de refrigeración convencional

El campamento Nuevo Mundo de Repsol está conformado por varios módulos unidos que forman las oficinas, áreas comunes y habitaciones. Cada módulo es refrigerado de manera independiente por dos equipos de aire acondicionado de ventana de 12,000 BTU. Este sistema permite mantener la temperatura interna del módulo a 22°C consistentemente. Estos sistemas de aire acondicionado funcionan durante el día y durante la noche[45].

1.5.2 Generación eléctrica

No existe conexión a la red eléctrica nacional, por lo que se requiere generar toda la energía en el mismo campamento. Se cuenta con 4 motogeneradoras de 1.2 MW cada una.

Actualmente solo se tienen 2 en funcionamiento y el consumo promedio de energía durante el día es de 1077 kW, de los cuales más de 50% es consumido en aire acondicionado[45].

Las motogeneradoras consumen gas natural que es extraído en el mismo campamento. Es necesario deshumedecer el gas natural previo a ser utilizado en la motogeneradora, sin embargo esto se hace en el mismo campamento Nuevo Mundo. El consumo total de gas utilizado para la generación de energía es de 380,000 scfd (standard cubic feet per day)[45]. Esto representa el 0.3% de los 150 mmscfd que se extraen en el lote 57[8]. A un precio de 2.33 USD per MMBtu, esto representa aproximadamente 1000 USD por día en costo de electricidad para el campamento.

1.6 Criterio de determinación de efectividad

1.6.1 Propósito del análisis

Este análisis busca evaluar la viabilidad de un sistema de refrigeración por absorción utilizando energía solar para ser implementado en un campamento de extracción de gas en la selva peruana. Esto se hace para intentar reducir los costos de operación del campamento y aumentar el rendimiento del campamento. Sin embargo, todo esto se puede resumir como una manera de hacer el proceso de extracción de gas más rentable. Por esto, el análisis de viabilidad tiene que enfocarse en si es que la implementación de este nuevo sistema de refrigeración puede aumentar la rentabilidad de la empresa, aunque sea a más largo plazo[46].

En caso este análisis sea positivo, luego se puede investigar la posibilidad de cómo lograr a cabo el implementar este sistema en un campamento real, pero los conceptos generales ya estarían definidos utilizando este análisis. Por otro lado, también hay un interés por parte de la compañía Repsol en desarrollar las energías renovables, ya sea como estrategia a futuro, responsabilidad social u otras razones. Sin embargo, estas razones no pueden ser cuantificadas de manera razonable en un análisis costo beneficio. La opción preferible es hacer un análisis de costo beneficio solo incluyendo los factores cuantificables, y cualquier información cualitativa adicional es considerada en la decisión final de un programa o

proyecto. Esto puede causar que proyectos que no son factibles cuantitativamente igual sean viables por los beneficios cualitativos que proveen [47].

1.6.2 Metodología de análisis

Para hacer un análisis de costo beneficio primero se necesita definir las opciones a comparar. En el caso de este análisis las opciones ya han sido definidas.[46] La primera opción es no hacer ningún cambio y equipar un nuevo módulo con un sistema de refrigeración convencional como se ha logrado antes. La segunda opción es equipar un nuevo módulo con un sistema de refrigeración por adsorción utilizando energía solar. Tomar en cuenta que lo que se busca es un análisis para la implementación de un nuevo módulo utilizando un sistema de refrigeración por adsorción y no en reequipar un módulo existente que ya tiene un equipo de refrigeración convencional, pues esto afecta significativamente el análisis. Es posible que sea viable implementar el sistema de refrigeración solar en un nuevo módulo sea rentable, y a la vez reequipar uno antiguo no lo sea.

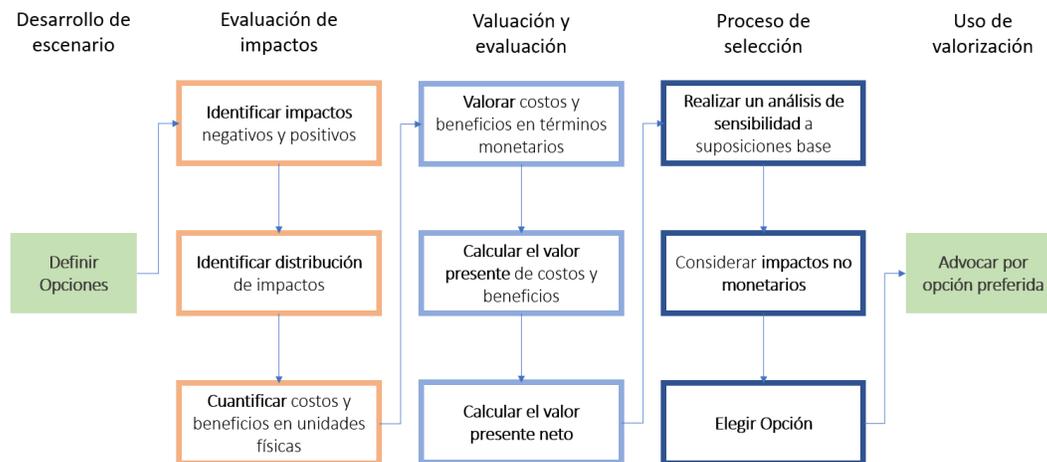


Fig. 10 Pasos de método de análisis de costo beneficio[46]

Primero se necesita identificar los impactos negativos y positivos causados por la decisión. Para este análisis no se debe considerar los beneficios más separados de nuestra decisión, por lo que solo se consideran el cambio en los costos con una opción o con la otra y no se consideran los beneficios que se generan al crear un nuevo módulo. Estos beneficios si existen, sin embargo, se asume que ambos beneficios serán iguales con cualquiera de

ambas opciones, por lo que no se necesita incluir. Esto causará que ambas opciones parezca que son puramente costosas sin ningún beneficio, pero lo importante es identificar que no importa el valor absoluto del costo de la decisión, pero como se compara a la otra. Se buscará minimizar pérdidas. Estos impactos se identifican en el siguiente segmento.

Luego se tiene que distribuir los impactos. En una toma de decisión más de un agente es afectado por la decisión, por lo que se tiene que considerar los diferentes agentes por separado. En caso de nuestro análisis los únicos dos agentes por considerar son los empleados que trabajan y operan dentro del módulo a modificar y la misma empresa. Siempre existen otros agentes que son afectados con cada decisión, como, por ejemplo, proveedores de los materiales necesarios para una opción y no la otra. En este caso estos agentes no son considerados dentro del análisis de costo beneficio. Por otro lado, el proyecto está definido de tal manera que el sistema de absorción estaría diseñado de manera de que no opere de manera distinta al sistema convencional, desde el punto de vista de los trabajadores en el módulo. Por tanto, el análisis se simplifica puesto que los impactos en los trabajadores en el módulo deberían ser nulos, así que solo se distribuyen los impactos a la misma empresa.

El paso de cuantificar los costos y beneficios en unidades físicas sigue. En este paso se utilizan los impactos identificados en el primer paso y se le asignan un valor físico. Esto no tiene que ser un valor monetario, pero si un valor definido. Esto puede ser como un gasto de 100 metros cúbicos de gas natural, 2 bombas de 100 litros/minuto o 10 metros cúbicos de transporte sobre el río. Lo importante es que cada impacto es convertido a un valor físico específico.

En el cuarto paso se le da un valor monetario a cada uno de los costos en unidades físicas que se identificaron. Se acostumbra en darle un costo unitario a cada distinto valor físico y a partir de eso calcular el valor monetario total de cada impacto. Estos valores monetarios también tienen que ser identificado con un momento en el tiempo. Esto permite llevar los costos al valor presente utilizando una tasa de descuento definida. Esta tasa de descuento es importante de definir a nivel empresa, pues esto permite que la empresa pueda ser objetiva cuando calcula decisiones entre distintos proyectos.

Finalmente se suman todos los costos y beneficios en valor presente para cada opción y para cada agente, calculando su valor presente neto. Luego de calcular el valor presente neto se puede comparar las opciones, tomando en cuenta los factores cualitativos que se tuvieron que obviar en el inicio del análisis. Esto se logra junto con un análisis de sensibilidad, donde se varían los supuestos más indefinidos o variables para ver como estos posibles cambios afectan al resultado final y si el resultado es muy sensible a alguna variación, analizar ese supuesto con mayor cuidado. Con esto ya se puede evaluar las opciones y tomar la decisión adecuada[46].

1.6.3 Impactos del sistema de refrigeración convencional

Identificar los impactos del sistema de refrigeración convencional consiste en identificar lo que se tendría como impacto si se instala un nuevo módulo con el sistema convencional. El impacto principal sería el gas que actualmente se tiene que gastar para generar la electricidad que se utiliza en el sistema de refrigeración. Luego están los costos iniciales principales como los equipos de refrigeración en sí y los costos de instalación de estos equipos al nuevo módulo. También se debería considerar impactos como la capacidad de generación eléctrica adicional que se necesita en el campamento para abastecer el nuevo módulo y factores menores como mantenimiento del sistema a largo plazo y la necesidad de transporte del equipo al campamento.

1.6.4 Impactos del sistema de refrigeración por adsorción solar

Identificar los impactos del sistema de refrigeración por adsorción solar no es significativamente más complicado que el ejercicio anterior, puesto que gran parte de los costos son los similares, solo con diferentes unidades y valores, pero mismos grupos generales. La dificultad existe cuando se tenga que dar un valor monetario a las unidades físicas puesto que como esto no se ha hecho antes, las suposiciones que se hacen son de menor confianza que las anteriores.

Se necesita identificar los impactos de los costos de los equipos e instalación, la electricidad requerida para operar las bombas y enfriador por adsorción, que a pesar de ser menor que en el caso anterior, igual es algo que se tiene que considerar. El costo de transporte

y logística para transportar todo el equipo para ser instalado y el costo de mantenimiento a largo plazo. En este caso como para cualquier sistema de energía solar, se tiene que tomar el impacto de espacio que ocupan los colectores solares, puesto que a pesar de que sea la selva y el terreno no tenga un precio directo, es un impacto cuantificable que se debe considerar. Se puede considerar también un costo de entrenamiento de los trabajadores de mantenimiento e ingeniería para poder operar el nuevo sistema, pero como se asume que se está implementando este sistema para reemplazar el sistema convencional a gran escala, se puede ignorar este costo pues esto solo sería considerable en el primer módulo que se instala, así que no será considerable a largo plazo de manera marginal.

1.7 Alternativas de refrigeración

1.7.1 Paneles fotovoltaicos

El uso de paneles fotovoltaicos ha crecido de manera significativa en los últimos años, ambos por el interés de países en invertir en energías renovables, y por su aumento de rendimiento económico por la caída de sus costos de manufactura[48]. Los paneles solares requieren poco mantenimiento y no consumen combustible, sin embargo, tienen ciertas desventajas. Requieren grandes espacios puesto que tienen relativamente bajas eficiencias (<20%) y por lo tanto no pueden generar más de 200 W/m^2 en el caso óptimo, lo cual solo ocurre irradiación solar directa, que no ocurre en ángulos y con cielos nublados[48]. Por otro lado, como no puede operar durante la noche, la energía necesaria para la noche tiene que ser almacenada en baterías, las cuales representan la mayoría de los costos para energías fotovoltaicas, o ser generada de otra manera.

Una gran ventaja de esta idea es que los paneles fotovoltaicos generan energía en una forma que ya se encuentra en uso, a diferencia de las otras energías solares. Esto viene con la ventaja de que si se quiere intentar la implementación de paneles fotovoltaicos no es necesario implementar un cambio inmediato. El cambio a paneles fotovoltaicos puede ser gradual y parcial, nunca reemplazando por completo la energía generada por los grupos electrógenos a gas, si no reduciendo la demanda de esta en hora pico. Esto permite ahorros

de gas, paneles solares que siempre pueden operar sin tener tiempo donde la energía generada se desperdicia, y reduce la capacidad máxima de generación a gas requerida.

1.7.2 Refrigeración por adsorción

La refrigeración por adsorción es superficialmente un proceso bastante similar a la refrigeración por absorción. En principio la adsorción es un fenómeno puramente superficial en el adsorbente, cuando la absorción es un fenómeno que ocurre en todo el volumen del absorbente. Esto ocurre pues en la adsorción, el adsorbente es un sólido, así que, para tener cantidades comparables de adsorción a la absorción, se utilizan sólidos porosos[49].

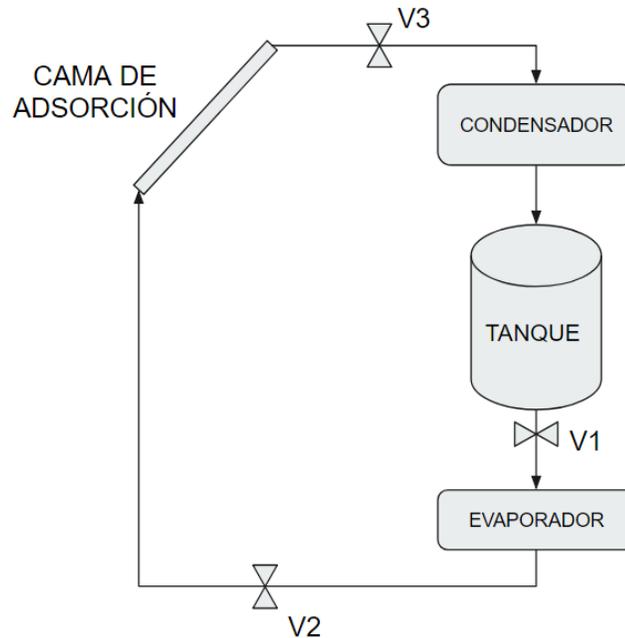


Fig. 11 Diagrama de ciclo de adsorción básico

Ambos sistemas de refrigeración utilizan colectores solares, sin embargo, en la refrigeración por adsorción, el proceso de desorción, similar al proceso de generación, ocurre en los colectores, con energía directa de la radiación solar. Esto provee con ventajas de simplicidad, ya que es posible diseñar un sistema de refrigeración por adsorción con solo un ciclo de refrigerante (adsorbato)[50]. A pesar de esto, normalmente se prefiere separar el ciclo en dos, uno para el adsorbato y otro fluido que es el que se utiliza en los equipos del aire acondicionado. Una ventaja significativa de los sistemas de adsorción es su menor

sensibilidad a shocks y la posición de instalación, que sistemas de absorción, haciéndolos viables para uso en plataformas móviles o vehículos[51]. Esto no es el caso en este análisis.

Existen varias combinaciones de adsorbente/adsorbato disponibles para el uso, las más comunes siendo Carbono activado con metanol[52] y Zeolita con agua[53]. Un problema con el sistema de refrigeración por adsorción es que el adsorbente y el adsorbato tienen que viajar del almacenamiento a los intercambiadores de calor y a los colectores. Esto es en contraste a la refrigeración por absorción, donde el adsorbente y adsorbato se mantienen dentro de la máquina. Esto puede ser un problema, especialmente cuando se utiliza metanol, puesto que esta sustancia es tóxica y una fuga podría ser un accidente peligroso. Por otro lado, el hecho de que el adsorbente tenga que estar en los colectores complica significativamente el diseño, puede aumentar el nivel de mantenimiento necesario y aumenta el costo de los paneles.

Una razón por la que se proponen los sistemas de refrigeración por adsorción es porque pueden tener rendimientos de W/m^2 de enfriamiento mayor a lo de los colectores de absorción. Desafortunadamente todos estos resultados son puramente experimentales y no existe una solución comercial y de alta confiabilidad en el mercado. Esta es una de las razones más significantes para no implementar un sistema de adsorción, puesto que el riesgo de una empresa de implementar una solución experimental sin beneficios claros es difícil de justificar. Sistemas de adsorción son más adecuados para sistemas que requieren refrigeración portátil y de pequeño tamaño[51], [54].

1.7.3 Conexión a la red eléctrica

Se tiene que considerar la posibilidad de la instalación de una conexión a la red eléctrica. Esta solución simplificaría y solucionaría muchos de los problemas que provienen con la falta de electricidad. Ya no sería necesario consumir gas en el campamento para generar electricidad ni se necesitaría un sistema de generación, reduciendo los costos. La energía de la red es generada en plantas más eficientes que en generadores pequeños, así que la energía de la red puede ser de menor costo que la energía de generación local.

Sin embargo, para conectar el campamento se necesitaría construir más de 100 km de líneas de alta tensión a lo largo de la selva. Esto puede traer problemas con que la empresa tendría que aportar la inversión de la construcción de las líneas de alta tensión. La construcción de la línea puede tardar más tiempo del que se necesita para que la solución sea económicamente viable. Por último, en caso haya algún problema con la línea en los cientos de kilómetros de selva, llegar a la causa y arreglarla puede ser un gran problema logístico y durante el proceso de mantenimiento, el campamento tiene que poder seguir en funcionamiento. Esto causa que la ventaja de ya no tener una necesidad de un equipo electrógeno sea inválida, reduciendo la rentabilidad de esta solución.

Una posible solución sería si las distancias fueran más cortas. Esto se podría lograr interconectando los varios campamentos de distintas empresas en el área de Camisea, y esa red conectarla a la red principal eléctrica. La ventaja de este método podría ser que varias empresas aportan para la construcción de una línea que será utilizada por todas las empresas, y reducen la distancia total que tiene que recorrerse para interconectar todos los campamentos. Sin embargo, para lograr esta solución se necesitaría trabajar con otras empresas y por tanto está fuera del alcance de esta investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. P. O. R. La, “ESCUELA DE POSTGRADO Planeamiento Estratégico del Gas Natural en el Perú PRESENTADA POR Nidia Zelma Arce Soto Ana María Espinoza Pérez Cristiam Fernando Castillo Plasencia Rubén Vásquez Paniagua Asesor : Juan O ’ Brien,” 2013.
- [2] J. Tamayo, J. Salvador, A. Vásquez, and R. García, *The natural gas industry in Peru: Ten years of the Camisea project*. 2014.
- [3] S. N. Em, “Artículo 65 del Decreto Supremo N° 081---2007---EM,” 2015.
- [4] N. Ley *et al.*, “Ley Orgánica que norma las actividades de Hidrocarburos en el territorio nacional El Congreso Constituyente Democrático ha dado la Ley siguiente ;,” pp. 1–107, 2007.
- [5] O. Supervisor *et al.*, *libro de energia de Osinergmin*. .
- [6] Osinergmin, “Osinergmin – Gas Natural - Instalaciones Internas.” .
- [7] “Producción de hidrocarburos gestion periodico.” .
- [8] J. Carlos, H. Supervisi, and C. Enero, “Contratos de hidrocarburos,” 2018.
- [9] I. Peruana, “Cuento camisea”
- [10] “OEC - Peru (PER) Exports, Imports, and Trade Partners.” 2017.
- [11] P. Sismica *et al.*, “PROYECTO,” 2012.
- [12] P. Perforacion, Y. D. Del, and C. Sagari, “IAD-2018-01 Pág . 2,” pp. 1–2, 2018.
- [13] O. Bueno, “Comunicación Privada.” Repsol, 2018.
- [14] “Clima Tamara_ Temperatura, Climograma y Tabla climática para Tamara - Climate-Data.” .
- [15] C. A. Dominguez, “El clima amazónico y su influencia sobre el régimen hidrográfico y la utilización de suelos,” *Rev. Colomb. Antropol.*, vol. 11, pp. 371–396, 1975.
- [16] H. Djamila, C. Chu, and S. Kumaresan, “Effect of Humidity on Thermal Comfort in

- the Humid Tropics,” *J. Build. Constr. Plan. Res.*, vol. 2, no. June, pp. 109–117, 2014.
- [17] E. A. B. Eltahir and E. J. Humphries, “The role of clouds in the surface energy balance over the Amazon forest,” *Int. J. Climatol.*, vol. 18, no. 14, pp. 1575–1591, 1998.
- [18] “Radiación Solar por Departamento - Energía solar y eólica en Peru.” .
- [19] T. Tsoutsos, M. Karagiorgas, and G. Zidianakis, “Development of the applications of solar thermal cooling systems in Greece and Cyprus,” vol. 18, no. 7, pp. 1–15, 2009.
- [20] “Review on Absorption Technology With Emphasis on Small Capacity,” 1973.
- [21] G. Chicco and P. Mancarella, “Trigeneration primary energy saving evaluation for energy planning and policy development,” *Energy Policy*, vol. 35, no. 12, pp. 6132–6144, 2007.
- [22] M. Li, R. Z. Wang, Y. X. Xu, J. Y. Wu, and A. O. Dieng, “Experimental study on dynamic performance analysis of a flat-plate solar solid-adsorption refrigeration for ice maker,” *Renew. Energy*, vol. 27, no. 2, pp. 211–221, 2002.
- [23] L. C. Haw, K. Sopian, and Y. Sulaiman, “An Overview of Solar Assisted Air-Conditioning System Application in Small Office Buildings in Malaysia,” *Int. Conf. ENERGY Environ.*, pp. 244–251, 2008.
- [24] A. Kocer *et al.*, “A Comparison of Flat Plate and Evacuated Tube Solar Collectors With F-Chart Method,” pp. 77–86, 2015.
- [25] H. Li, X. Zhang, and C. Yang, “Analysis on All-Day Operating Solar Absorption Refrigeration System with Heat Pump System,” *Procedia Eng.*, vol. 121, pp. 349–356, 2015.
- [26] J. R. Hernández Massipe and M. O. Flores Quispe, “Estudio comparativo del comportamiento térmico del colector solar termoacumulativo en Perú,” pp. 12–17, 2012.
- [27] D. de G. de C. de los R. Hídricos, “RESOLUCIÓN DIRECTORAL N° /07 -2017-ANA-DGCRH,” 2017.

- [28] PeruPetro, “Area de contrato de licencia para exploracion y explotacion de hidrocarburos entre Perupetro S.A con REPSOL exploración Peru,” *Ponte*. .
- [29] Google Maps, “Imagen Satelital Nuevo Mundo.” 2019.
- [30] A. Burdick, “Strategy Guideline: Accurate Heating and Cooling Load Calculations,” no. June, 2011.
- [31] E. M. Technician, “Thermic Solar Energy for Heating Conversion of Solar Energy (Solar Radiation) into Thermal Energy Design Configuration in Principle and Function of Solar Power Systems,” vol. 1, pp. 1–10.
- [32] NASA, “NASA Surface meteorology and Solar Energy - Definitions,” *Solar Energy*. pp. 1–20, 2007.
- [33] SENAMHI, “SENAMHI - Perú,” *Ministerio del Ambiente*. p. 1, 2018.
- [34] P. Ejecutivo, D. E. L. Senamhi, R. D. E. L. Estudio, and R. D. E. L. Estudio, “Servicio nacional de meteorología e hidrología dirección general de hidrología,” pp. 1–112, 1999.
- [35] NASA, “Prediction of Worldwide Energy Resources (Power),” *Data Access Viewer*. 2018.
- [36] S. C. Pongsid Sriksirin, Satha Aphornratana, “A review of absorption refrigeration technologies,” 2001.
- [37] R. Z. Wang, Q. W. Pan, and Z. Y. Xu, *Solar-powered adsorption cooling systems*. 2016.
- [38] I. Yazaki Energy Systems, “Water Fired Single-Effect Chillers and Chiller-Heaters.” 2019.
- [39] B.C. Chung, “Trend and Applications of Absorption Chiller.” .
- [40] Yazaki Energy Systems Inc, “Water-Fired Absorption Chiller WFC-SC5.” 2019.
- [41] F. Struckmann, “Analysis of a Flat-Plate Solar Collector,” *Moksl. - Liet. ateitis*, vol. 2008 MVK16, pp. 39–43, 2008.

- [42] S. Arora, S. Chitkara, R. Udayakumar, M. Ali, and P. Dubai, “Thermal analysis of evacuated solar tube collectors,” *J. Pet. Gas Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 74–82, 2011.
- [43] S. R. Samo, A. A. Siyal, Z. A. Siyal, and A. R. Jatoi, “Analysis of an Active and Passive Solar Water Heating System,” *Sixt. Int. Water Technol. Conf. IWTC*, pp. 1–10, 2012.
- [44] S. A. Wilson, “Integrating Solar Heating into an Air Handling Unit to Minimize Energy Consumption,” 2010.
- [45] J. García, “Comunicación Privada.” Repsol, 2019.
- [46] S. Iv, “Cost-benefit analysis methodology,” pp. 75–95.
- [47] “SDC How-to-Note Financial and Economic Analysis of Projects with a focus on Cost Benefit Analysis (CBA) and Cost Effectiveness Analysis (CEA).”
- [48] E. Kabir, P. Kumar, S. Kumar, A. A. Adelodun, and K. H. Kim, “Solar energy: Potential and future prospects,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. September 2016, pp. 894–900, 2018.
- [49] A. Gabelman, “Adsorption basics: Part 1,” *Chem. Eng. Prog.*, vol. 113, no. 8, pp. 1–6, 2017.
- [50] “Capítulo 3 : Sistema De Adsorción,” vol. 0, 2012.
- [51] R. Z. Wang and R. G. Oliveira, “Adsorption refrigeration-An efficient way to make good use of waste heat and solar energy,” *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 32, no. 4, pp. 424–458, 2006.
- [52] Y. Wang, M. Li, W. Du, Q. Yu, X. Ji, and X. Ma, “Performance comparative study of a solar-powered adsorption refrigerator with a CPC collector/adsorbent bed,” *Energy Convers. Manag.*, vol. 173, no. May, pp. 499–507, 2018.
- [53] A. Sharma, V. K. Banka, A. K. Garg, and R. K. Gautam, “Zeolite-Water Adsorption Refrigeration System,” vol. 6, no. 4, pp. 537–540, 2015.
- [54] J. L. W. Kuri, A. G. Sangines, and S. Riffat, “Solar adsorption refrigeration unit

- (SARU).,” *Int. J. Low Carbon Technol.*, vol. 2, no. 2, pp. 178–371, 2007.
- [55] M. D. LeVan and T. Vermeulen, “Binary Langmuir and Freundlich isotherms for ideal adsorbed solutions,” *J. Phys. Chem.*, vol. 85, no. 22, pp. 3247–3250, 1981.
- [56] M. M. DUBININ, *Physical Adsorption of Gases and Vapors in Micropores*, vol. 9. ACADEMIC PRESS, INC., 1975.
- [57] M. Tokarev, L. Gordeeva, V. Romannikov, I. Glaznev, and Y. Aristov, “New composite sorbent CaCl₂ in mesopores for sorption cooling/heating,” *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 41, no. 5, pp. 470–747, 2002.
- [58] M. Tian, Y. Su, H. Zheng, G. Pei, G. Li, and S. Riffat, “A review on the recent research progress in the compound parabolic concentrator (CPC) for solar energy applications,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 82, no. June 2016, pp. 1272–1296, 2018.
- [59] A. El Fadar, A. Mimet, and M. Pérez-García, “Modelling and performance study of a continuous adsorption refrigeration system driven by parabolic trough solar collector,” *Sol. Energy*, vol. 83, no. 6, pp. 850–861, 2009.
- [60] S. Edin Hamrahi, K. Goudarzi, and M. Yaghoubi, “Experimental study of the performance of a continuous solar adsorption chiller using Nano-activated carbon/methanol as working pair,” *Sol. Energy*, vol. 173, no. July, pp. 920–927, 2018.
- [61] L. Q. Zhu, Z. W. Gong, B. X. Ou, and C. L. Wu, “Performance Analysis of Four Types of Adsorbent Beds in a Double-Adsorber Adsorption Refrigerator,” *Procedia Eng.*, vol. 121, pp. 129–137, 2015.
- [62] J. Fonder, “Air Conditioning - Basic Refrigeration Cycle,” 2017. 2017.