



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

## **RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DESDE POZAS SOLARES PARA SUMINISTRAR CALOR A PROCESOS MINEROS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

**CAROLINA RIOBÓ PEZO**

PROFESOR GUÍA:  
RAMÓN FREDERICK GONZÁLEZ

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
WILLIAMS CALDERÓN MUÑOZ  
ROBERTO ROMÁN LATORRE

SANTIAGO DE CHILE  
2015

**RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR  
AL TÍTULO DE:** Ingeniero Civil Mecánico.  
**POR:** Carolina Riobó Pezoa  
**FECHA:** Santiago, 2015.  
**PROFESOR GUÍA:** Ramón Frederick González

## **RECUPERACIÓN DE ENERGÍA DESDE POZAS SOLARES PARA SUMINISTRAR CALOR A PROCESOS MINEROS**

Una poza solar es un sistema térmico que permite coleccionar y almacenar energía solar. El hecho de ser un sistema que realiza ambos trabajos en un mismo equipo le entrega ventajas sobre los sistemas comunes. Por otra parte, las pozas solares utilizan un tipo de energía renovable que contribuye a la disminución del impacto ambiental debido a la generación de energía y permite aprovechar el recurso solar que tiene Chile.

Estas pozas contienen una solución salina, acá se crea un gradiente de concentración generando 3 zonas importantes: la zona convectiva inferior (LCZ), es la zona más profunda de la poza y donde se almacena la energía solar coleccionada en forma de calor sensible; la zona no convectiva (NCZ), la cual posee un gradiente de concentración salina tal que se suprime la convección natural y sólo hay transferencia de calor por conducción, limitando la pérdida de calor desde la LCZ. Finalmente, está la zona convectiva superior, en la cual la concentración de sales y la temperatura son bajas.

El objetivo de este trabajo es realizar un estudio de factibilidad del suministro de calor a procesos mineros mediante un sistema de escala mediana basado en pozas solares. Para esto, se debe diseñar una poza solar con sus dimensiones y su sistema de extracción para suplir la demanda energética del proceso al cual se le suministra calor, en este caso, el proceso de electro-obtención para la minería del cobre. Este sistema se ubica en la II región de Antofagasta en las cercanías de Calama debido a la alta radiación y gran concentración de mineras presentes en este sector.

La herramienta básica de este trabajo es el programa creado en MATLAB que permite modelar el estado térmico de la poza en función del tiempo, obteniendo la capacidad de extracción de calor de ésta.

Los resultados presentados se realizaron en base a distintas dimensiones de pozas y muestran el comportamiento térmico de ésta. Las tres zonas presentaron un comportamiento esperado, donde la UCZ sigue las variaciones de la temperatura ambiente de forma amortiguada, la NCZ presenta un gradiente de temperatura que adopta un perfil lineal luego de un tiempo, y finalmente, la LCZ presenta temperaturas bastante altas, las cuales siguen las variaciones estacionales del año.

Se obtuvo que mediante la poza se puede suministrar el calor necesario para que el electrolito llegue a su temperatura deseada de 55°C un máximo del 61% del tiempo total de extracción de calor, el resto del tiempo, se debe respaldar el suministro mediante un sistema de calderas, obteniendo una eficiencia de la poza del 16% aproximadamente.

Al realizar la evaluación económica del proyecto, se pudo ver que para pozas con una superficie mayor a 140×140 m<sup>2</sup> el proyecto es rentable, aumentando esta última con el tamaño de la poza. Sin embargo, para pozas más pequeñas el proyecto pierde su rentabilidad.

Finalmente, se obtuvo un costo de la poza de 40 USD/m<sup>2</sup>, el cual se asemeja a valores obtenidos de pozas solares construidas en Israel, EEUU e India.

*Dedicado especialmente a mis papás.*

*A mis hermanos Henry boy, Catita y Baby. A la Marce, a Daniel y Naruto.*

## **Agradecimientos**

Quiero agradecer a toda mi familia, a mi mamá y papá por su amor, por apoyarme y darme la posibilidad de estar acá, también a la Marce y mis hermanos, Catita, Henry y Trini, a mis abuelos, tíos y primos. En especial quiero agradecerle a Daniel por haberme ayudado siempre durante toda la universidad, por apoyarme, soportarme y acompañarme. Además, a mis amigos de la u, de primer año y mecánicos que fui conociendo de a poco, por su amistad y también ayuda durante toda la carrera. Además, quiero agradecerle al profesor Ramón por toda su ayuda, apoyo y preocupación a lo largo de este trabajo, y a los profesores Williams y Roberto por formar parte de mi comisión.

## Tabla de contenido

1.	Introducción .....	1
1.1.	Antecedentes generales .....	1
1.2.	Motivación .....	2
1.3.	Objetivos .....	2
1.3.1.	Objetivo general .....	2
1.3.2.	Objetivos específicos .....	2
1.4.	Alcances .....	2
2.	Antecedentes .....	3
2.1.	Aporte energético y pérdidas .....	5
2.2.	Balance energético .....	5
2.3.	Métodos de extracción de calor .....	7
2.4.	Cargas y condiciones externas .....	8
3.	Desarrollo .....	10
3.1.	Ubicación geográfica .....	10
3.2.	Proceso al cual se le suministra el calor .....	12
3.3.	Balance energético .....	12
3.3.1.	Zona convectiva superior (UCZ) .....	13
3.3.2.	Zona no convectiva (NCZ) .....	19
3.3.3.	Zona convectiva inferior (LCZ) .....	20
3.3.4.	Extracción de calor .....	22
3.3.5.	Eficiencia de extracción .....	24
3.4.	Intercambio térmico para suministrar calor al proceso .....	24
3.4.1.	Intercambiador de calor .....	27
3.5.	Análisis económico .....	31
3.5.1.	Costos e ingresos .....	31
3.5.2.	Indicadores económicos .....	34
4.	Resultados y discusión .....	36
4.1.	Radiación diaria .....	36
4.2.	Evolución y perfil de temperatura en la UCZ, NCZ y LCZ .....	36
4.3.	Extracción de calor .....	44
4.3.1.	Evolución de temperatura en la LCZ con extracción de calor constante .....	44

4.3.2.	Extracción de calor para distintos tamaños de poza .....	47
4.3.3.	Extracción de calor variable en el tiempo.....	49
4.4.	Evaluación económica .....	69
5.	Conclusiones.....	74
6.	Bibliografía.....	78
Anexos.....		81
Anexo A:	Programa en matlab.....	81
Anexo B:	Radiación, velocidad del viento y temperatura ambiente cada una hora en Lat 22,81°S; Long 69,52°O.....	92
Anexo C:	Gráfico de calor específico en función de la temperatura y concentración salina para el agua salina [14] .....	93
Anexo D:	Planilla Excel para corroborar cálculos de área del IC.....	94
Anexo E:	Flujo de caja para poza de 150×150 m <sup>2</sup> .....	95

## Índice de Figuras

Figura 2.1: Esquema poza solar. Se muestra gradiente de temperatura y concentración y zonas .....	3
Figura 2.2: Método de extracción con intercambiador de calor interno y externo.....	8
Figura 2.3: Método de extracción con intercambiador de calor externo.....	8
Figura 3.1: Ubicación Poza solar en la Región de Antofagasta.....	11
Figura 3.2: Radiación mensual para el año 2010 [12].....	11
Figura 3.3: Esquema de zonas en un poza solar.....	12
Figura 3.4: Esquema de ganancias y pérdidas energéticas en la UCZ.....	14
Figura 3.5: Ángulo de incidencia del rayo solar a la poza $\theta_i$ y ángulo de refracción $\theta_r$ .....	14
Figura 3.6: Esquema de ganancias y pérdidas energéticas de la NCZ.....	19
Figura 3.7: Balance energético capa j de la NCZ.....	19
Figura 3.8: Esquema de ganancias y pérdidas energéticas de la LCZ.....	21
Figura 3.9: Temperatura ambiente en función del tiempo para el año 2010.....	23
Figura 3.10: Velocidad del viento en función del tiempo para el año 2010.....	24
Figura 3.11: Esquema del intercambiador de calor entre el fluido de la poza y el electrolito.....	25
Figura 3.12: Tipos de acero inoxidable que cumplen con una excelente durabilidad frente al agua .....	31
Figura 4.1: Radiación incidente en función del tiempo para el año 2010.....	36
Figura 4.2: Evolución de la temperatura en UCZ en función del tiempo para los datos del año 2010 .....	37
Figura 4.3: Evolución de la temperatura en la UCZ en función del tiempo para el primer mes .....	38
Figura 4.4: Evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ en función del tiempo para los datos.....	39
Figura 4.5: Evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ en función del tiempo para el primer mes.....	39
Figura 4.6: Evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ en función del tiempo para un período .....	40
Figura 4.7: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad para fines del primer día del año .....	41
Figura 4.8: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad para luego de 1 mes en el año 2010... ..	42
Figura 4.9: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad luego de 1,5 mes del año 2010 .....	42
Figura 4.10: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad luego de 1 año del inicio del estudio ..	43
Figura 4.11: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad luego de 3 años del inicio .....	43
Figura 4.12: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad para 1 día, 1 mes, 1,5 mes .....	44
Figura 4.13: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ .....	45
Figura 4.14: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ .....	46
Figura 4.15: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ .....	46
Figura 4.16: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ .....	47
Figura 4.17: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 16 \text{ kg/s}$ .....	50
Figura 4.18: Calor extraído para $m = 16 \text{ kg/s}$ , $m_e = 18 \text{ kg/s}$ , $AIC = 42 \text{ m}^2$ , para una poza.....	51
Figura 4.19: Temperatura electrolito para $m = 16 \text{ kg/s}$ , $m_e = 18 \text{ kg/s}$ , $AIC = 42 \text{ m}^2$ .....	51
Figura 4.20: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 18 \text{ kg/s}$ .....	52
Figura 4.21: Calor extraído para $m = 18 \text{ kg/s}$ , $m_e = 18 \text{ kg/s}$ , $AIC = 60 \text{ m}^2$ .....	53
Figura 4.22: Temperatura electrolito para $m = 18 \text{ kg/s}$ , $m_e = 18 \text{ kg/s}$ , $AIC = 60 \text{ m}^2$ .....	53
Figura 4.23: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 20 \text{ kg/s}$ .....	54
Figura 4.24: Calor extraído para $m = 20 \text{ kg/s}$ , $m_e = 18 \text{ kg/s}$ , $AIC = 51 \text{ m}^2$ , para una poza.....	55
Figura 4.25: Temperatura electrolito para $m = 20 \text{ kg/s}$ , $m_e = 18 \text{ kg/s}$ , $AIC = 51 \text{ m}^2$ .....	55
Figura 4.26: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 10 \text{ kg/s}$ .....	56
Figura 4.27: Calor extraído para $m = 10 \text{ kg/s}$ , $m_e = 9 \text{ kg/s}$ , $AIC = 19 \text{ m}^2$ , para una poza .....	57

Figura 4.28: Temperatura electrolito para $m = 10 \text{ kg/s}$ , $m_e = 9 \text{ kg/s}$ , $AIC = 19 \text{ m}^2$ .....	57
Figura 4.29: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 9 \text{ kg/s}$ .....	58
Figura 4.30: Calor extraído para $m = 9 \text{ kg/s}$ , $m_e = 9 \text{ kg/s}$ , $AIC = 27 \text{ m}^2$ , para una poza .....	59
Figura 4.31: Temperatura electrolito para $m = 9 \text{ kg/s}$ , $m_e = 9 \text{ kg/s}$ , $AIC = 27 \text{ m}^2$ , para una poza ....	59
Figura 4.32: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 7 \text{ kg/s}$ .....	60
Figura 4.33: Calor extraído para $m = 7 \text{ kg/s}$ , $m_e = 9 \text{ kg/s}$ , $AIC = 31 \text{ m}^2$ , para una poza .....	61
Figura 4.34: Temperatura electrolito para $m = 7 \text{ kg/s}$ , $m_e = 9 \text{ kg/s}$ , $AIC = 31 \text{ m}^2$ , para una poza ....	61
Figura 4.35: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 4 \text{ kg/s}$ .....	63
Figura 4.36: Calor extraído para $m = 4 \text{ kg/s}$ , $m_e = 4 \text{ kg/s}$ , $AIC = 18 \text{ m}^2$ , para una poza .....	63
Figura 4.37: Temperatura electrolito para $m = 4 \text{ kg/s}$ , $m_e = 4 \text{ kg/s}$ , $AIC = 18 \text{ m}^2$ , para una poza ...	64
Figura 4.38: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 6 \text{ kg/s}$ , .....	65
Figura 4.39: Calor extraído para $m = 6 \text{ kg/s}$ , $m_e = 4 \text{ kg/s}$ , $AIC = 14 \text{ m}^2$ , para una poza .....	65
Figura 4.40: Temperatura electrolito para $m = 6 \text{ kg/s}$ , $m_e = 4 \text{ kg/s}$ , $AIC = 14 \text{ m}^2$ , para una poza ...	66
Figura 4.41: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para $m = 3 \text{ kg/s}$ .....	66
Figura 4.42: Calor extraído para $m = 3 \text{ kg/s}$ , $m_e = 4 \text{ kg/s}$ , $AIC = 24 \text{ m}^2$ , para una poza .....	67
Figura 4.43: Temperatura electrolito para $m = 3 \text{ kg/s}$ , $m_e = 4 \text{ kg/s}$ , $AIC = 24 \text{ m}^2$ .....	67
Figura 4.44: Costo en USD/m <sup>2</sup> para distintas pozas solares construidas .....	72



## **1. Introducción**

Numerosos proyectos industriales se han impuesto la necesidad de sustitución de combustible fósil por energías renovables no convencionales para suministrar calor de procesos a plantas industriales. Un ejemplo es la planta solar térmica de Pampa Elvira, inaugurada en el 2013. En esta planta de 54000 MWh/año térmicos se entrega energía de procesos a la planta de electro-obtención de cobre. Las soluciones que van a este proceso deben tener una temperatura de 50°C para una operación eficiente. Se puede lograr estas temperaturas mediante el calentamiento a partir de agua calentada con fuentes externas. Dados los bajos niveles de temperatura necesarios, la demanda de calor es cubierta mediante un sistema de colectores planos, para calentamiento de agua.

Para funcionar las 24 horas del día y en todas las estaciones del año, se debe acumular energía, al menos para cumplir el ciclo día-noche. Esto se hace mediante un estanque de agua estratificado, que acumula energía en el día para entregarla en la noche. Parámetros importantes son el volumen efectivo del estanque, y las temperaturas extremas a las que opera, que definen su capacidad de almacenamiento y también el nivel de estratificación. El estanque es uno de los mayores ítems de inversión en este tipo de plantas.

En esta memoria se propone el uso de pozas solares para realizar trabajos como el indicado debido a que la poza solar es un sistema que integra colector y acumulador, y que ahorra gran parte del piping de un proyecto como el de Pampa Elvira. Se considera la posibilidad de evaluar la alternativa de alimentación de calor a procesos mineros mediante pozas solares.

### **1.1. Antecedentes generales**

Las pozas solares se llenan con una solución salina que, como se dijo anteriormente, colectan y almacenan energía solar. Esto se logra mediante la formación de diferentes zonas con distintas concentraciones salinas dentro de ella, las cuales son: la zona convectiva inferior (LCZ), con una concentración constante y alta de sales, la zona no convectiva (NCZ), en la cual se tiene un gradiente de concentración salino y un gradiente de temperatura, ambos dan distribuciones de temperatura y concentración aproximadamente lineales. Tanto la temperatura como la concentración aumentan con la profundidad de la poza. Además, en esta zona, la convección es suprimida. Y por último, la zona convectiva superior (UCZ), con una concentración constante y baja de sal. Estos gradientes pueden formarse de forma natural o artificial. Dentro de las zonas convectivas se obtiene una mayor uniformidad de temperatura y concentración debido al mezclado causado por el movimiento del fluido.

El primer registro sobre estos sistemas se dio en Hungría en 1902, donde se descubrió un lago con temperaturas de 70°C en su fondo. Este fenómeno se generaba por efecto de los gradientes de concentración salina generados naturalmente dentro del lago. Desde entonces, se han realizado numerosos estudios, experimentales y teóricos, sobre pozas solares naturales y artificiales de distintas escalas en diversos lugares del mundo.

El calor almacenado por la poza se puede extraer mediante diversos métodos para luego utilizarlo en distintas aplicaciones como suministro de calor a procesos industriales, sistemas de calefacción, temperado de invernaderos, desalinización, generación de energía eléctrica, entre otras.

## **1.2. Motivación**

La principal motivación es la de aportar en el estudio de técnicas de obtención de energía no convencionales a partir de fuentes renovables para reducir los efectos nocivos sobre el medio ambiente que tienen las principales formas de generación de energía (térmica o eléctrica) mayormente utilizadas hoy en día. En este caso, utilizando energía solar como fuente renovable debido al gran potencial que tiene Chile de este recurso.

Las pozas solares poseen la cualidad de ser colector y almacenador de energía al mismo tiempo, es decir, no necesitan de un equipo extra para almacenar la energía captada. Además, los principales recursos utilizados para esta tecnología son agua y sales y no requiere mayor operación de la planta, lo cual genera que el costo de estos sistemas sea principalmente la inversión por la construcción de la poza. Estas características hacen de las pozas solares una excelente opción para la generación de energía térmica a partir de fuentes renovables que pueda ser competitivo económicamente frente a sistemas más contaminantes como petróleo, gas, entre otros.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Realizar un estudio de factibilidad del suministro de calor de procesos a un sistema de escala mediana ubicado en la segunda región, en base a pozas solares.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Generar un modelo que permita predecir el comportamiento térmico de la poza.
- Determinar la capacidad de extracción de energía mediante un balance energético transiente de las pozas solares.
- Para una determinada demanda de energía, evaluar y seleccionar un método de extracción de calor, dimensionar las pozas y el sistema necesario para la extracción de la cantidad requerida de energía según el método escogido.
- Determinar el rendimiento energético en la captación de energía.
- Realizar un estudio de factibilidad económica de la implementación de un sistema de pozas solares para el escenario definido.

## **1.4. Alcances**

El modelo utilizado para la simulación dinámica de una poza será construido a partir de balances energéticos macroscópicos térmicos, transientes en una dimensión.

Las dimensiones utilizadas de la poza solar y los espesores de las distintas zonas se asignarán en base a datos empíricos.

El modelo será capaz de seguir la evolución de la temperatura en la poza durante largos tiempos en función de los aportes y extracciones de energía que se realicen. No se sigue en cambio la evolución de la salinidad, considerando que este campo se conserva en el tiempo para dar estabilidad a la poza.

Sólo se tomará la demanda energética del proceso minero, por lo que no se estudiará este último.

Y por último, sólo se considerarán aplicaciones de suministro de energía térmica.

## 2. Antecedentes

Una poza solar de gradiente salino es un sistema que funciona como colector y almacenador de energía solar. Éstas consisten en pozas con una capa de solución salina la cual absorbe la radiación solar y la almacena como calor por un determinado período de tiempo.

Dentro de esta capa salina se forman distintos gradientes de concentración, donde aumenta la concentración salina a mayor profundidad debido a la mayor densidad de las soluciones de alta concentración, que tienden a bajar. Se forman 3 zonas distintas, la zona convectiva superior (upper convective zone UCZ), zona no convectiva (non-convective zone NCZ) y la zona convectiva inferior (lower convective zone LCZ) como se puede observar en la Figura 2.1.

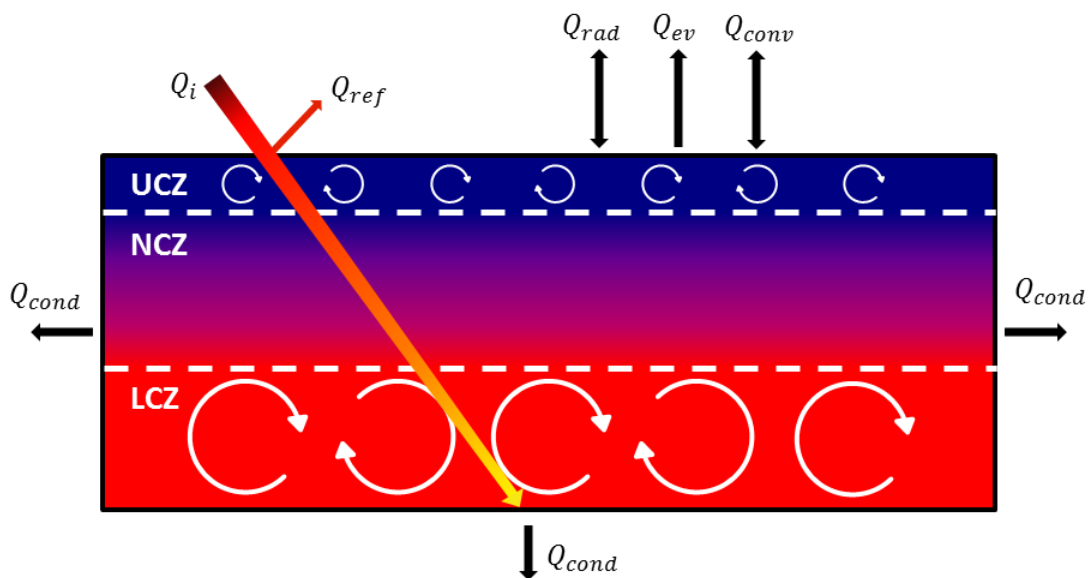


Figura 2.1: Esquema pozo solar. Se muestra gradiente de temperatura y concentración y zonas formadas dentro de la poza. [1]

La UCZ es una capa delgada de baja concentración salina y baja densidad, en esta zona se tiene convección natural (combinada con convección forzada por el viento del exterior). La NCZ consta de un gradiente de concentración, y por tanto de densidad, donde la solución de menor densidad se encuentra arriba de la de mayor; debido a este gradiente, en esta capa se suprime el efecto convectivo y la transferencia de calor se da sólo por conducción, la cual es baja para esta solución salina. Esto causa que el flujo de calor ascendente, desde la LCZ a la UCZ, se limite, por lo que se reducen las pérdidas de calor.

Además, esta zona posee un gradiente de temperatura, la cual crece con la profundidad de la poza. Por último, la LCZ es una capa de alta concentración salina (solución cerca de la saturación) y de alta densidad, ambas constantes, además, es la zona de mayor temperatura. En esta última zona se absorbe la mayoría de la radiación incidente (parte de esta radiación es absorbida por las otras zonas) y es almacenada debido al efecto de la NCZ. El calor que se aprovecha de la poza solar para otros usos es extraído de la LCZ ya que ésta es la que alcanza mayores temperaturas.

El tamaño de las pozas solares existentes es variable. En cuanto a su superficie, las pozas existentes varían entre los pocos cientos de metros cuadrados hasta pocos miles de metros cuadrados [2]. En cuanto a su profundidad, ésta varía entre 1 hasta 5 metros [3]. La forma de las pozas solares también es variable, pudiendo ser cónicas cortadas (sin punta), cilíndricas o rectangulares.

Este tipo de pozas pueden ser utilizadas para diversas aplicaciones, tales como desalinización, obtención de sales, producción de calor para procesos y generación de energía eléctrica [3].

Los materiales utilizados para el recubrimiento de la superficie de la poza varían dependiendo de las temperaturas alcanzadas en ésta y de las condiciones del suelo. Los materiales utilizados incluyen revestimientos de membrana sensible, y revestimiento de arcilla o plástico compactado, en específico, se han utilizado tejido de poliéster recubierto en PVC, revestimiento de arcilla geosintético, revestimiento de propileno, revestimiento de vinilo sólido, entre otros [3]. Por otra parte, se puede cubrir el recubrimiento del fondo con tierra compacta o esperar que el fondo de la poza se cubra con arena y polvo lo cual protege al revestimiento de daños por radiación sin dañarlo [6].

La solución utilizada para estos sistemas es de agua con una determinada concentración de sales (dependiendo la capa de la poza). Generalmente la sal utilizada es el cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ), pero también se ha utilizado sales como cloruro de magnesio ( $\text{MgCl}_2$ ), nitrato de potasio ( $\text{KNO}_3$ ), nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ), sales fertilizantes ( $\text{NH}_2\text{CO}\cdot\text{NH}_2$ ) y carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), todas estas satisfacen el criterio de estabilidad para el gradiente de sales necesario en pozas solares [4]. También se ha utilizado salmueras naturales, sin embargo las pozas con este último tipo de sal presentan una eficiencia menor que las de cloruro de sodio [2]. Las concentraciones de sal utilizadas generalmente en cada capa son de un 20 a 30% de concentración en la LCZ y menor a un 10% en la UCZ [5].

Para un buen funcionamiento de una poza solar se debe poder crear y conservar el gradiente de concentración salino necesario. Existen diversas técnicas utilizadas para crear este gradiente. Una de ella consiste en llenar, en primer lugar, la LCZ con el porcentaje de concentración salina de la solución dada hasta alcanzar la altura escogida de la zona. Luego se llena la NCZ, en esta zona es importante poder crear el gradiente de concentración requerido, para esto, se pueden agregar capas de un espesor pequeño (depende del espesor total de la NCZ) de distintas concentraciones tal que se vaya disminuyendo la concentración de sal, esto se realiza hasta completar el espesor de la NCZ. La adición en esta zona se realiza bombeando lentamente cada capa pequeña con su concentración salina en la solución ya lista, esto se puede realizar añadiendo la solución sobre un disco flotante con agujeros que se encuentra sobre la superficie de la poza para realizar la adición lentamente de cada capa sobre la capa anterior. Finalmente, se llena la UCZ con la solución de concentración salina escogida para esta zona hasta completar su espesor [1].

Los gradientes de concentración en las distintas zonas se pueden ver afectados por distintos fenómenos. La concentración de la UCZ se puede ver alterada por fenómenos de evaporación de agua hacia el exterior de la poza, y por fenómenos de difusión desde las otras capas, ambos generan un aumento de la concentración salina. Así como también, la LCZ se ve afectada también por la difusión disminuyendo su concentración salina. Se debe regular estos fenómenos constantemente para no afectar el gradiente de la poza generando pérdidas por desbalance de gradiente. Para regular la UCZ se puede remover solución de

la superficie del estanque y luego inyectar agua pura. Para compensar las pérdidas de sal por difusión en la LCZ se puede agregar sal concentrada a esta zona [3].

## 2.1. Aporte energético y pérdidas

La radiación incidente de la poza solar no es absorbida totalmente ya que una fracción es reflejada, como se puede ver en el esquema de la Figura 2.1. La parte incidente y reflejada pueden calcularse a partir de las ecuaciones de Fresnel y existen tablas que muestran los valores de la fracción de radiación solar que penetra la superficie de la poza [6].

En cuanto a las pérdidas, como se dijo anteriormente existen pérdidas por reflexión de la radiación. Además, se tienen pérdidas por evaporación, la cual se da en el agua de la UCZ. Para evitar inestabilidades debido a olas generadas en la superficie de la poza debido al viento se puede cubrir la superficie de la poza con grillas de algún material [3]. También existen pérdidas por conducción, las cuales representan la pérdida de calor desde la LCZ hacia las otras zonas debido a la transferencia de calor por conducción. Debido a que la solución no presenta un alto coeficiente conductivo, estas pérdidas son pequeñas [4]. Además, existen pérdidas por conducción a través de las paredes y suelo de la poza.

Las temperaturas alcanzadas por la LCZ, zona en la cual el calor es extraído desde la poza solar, son entre los 50 y 100°C aproximadamente dependiendo de las características de la poza, ambientales y de la radiación. Estos sistemas pueden mantener altas temperaturas en la zona inferior durante el día y la noche.

La eficiencia de extracción de calor se puede definir como la proporción entre calor total removido desde la poza solar y la radiación total que incide sobre la superficie de la poza en un período de tiempo [3]. La eficiencia de una poza varía entre un 15 y 20% dependiendo de la temperatura de ésta. El rendimiento de estas pozas puede verse afectado por pérdidas mencionadas anteriormente, por el espesor de la UCZ ya que si ésta es muy gruesa puede reducir la cantidad de energía solar que llega al fondo de la poza y por la disminución de la NCZ debido a la difusión. También se puede ver afectada por la turbiedad de la solución, la cual genera una menor cantidad de calor almacenado por la LCZ [2].

## 2.2. Balance energético

El balance termodinámico puede tener distintos enfoques. En primer lugar, se presenta el enfoque diferencial, donde se modela el comportamiento del fluido dentro de la poza a partir de las ecuaciones de conservación de la masa, momentum y de energía. A continuación se presentan las ecuaciones relativas a este análisis [5].

Conservación de la masa total:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0 \quad (1)$$

Conservación de masa de una especie (sal):

$$\frac{\partial(\rho S)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V S) = \nabla \cdot (\rho D_s \nabla S) \quad (2)$$

Momentum:

$$\frac{\partial(\rho V)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho VV) = -\nabla P + \mu \nabla^2 V + \rho g \quad (3)$$

Energía:

$$\rho C_p \frac{DT}{Dt} = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi \quad (4)$$

Con:

$$\rho(S, T) = \rho_0 [1 - \beta_T (T - T_0) + \beta_S (S - S_0)] \quad (5)$$

Donde:

*t*: tiempo [s]

*ρ*: densidad [kg/m<sup>3</sup>]

*C<sub>p</sub>*: calor específico a presión constante [J/kgC<sup>-1</sup>]

*k*: conductividad térmica de la solución [Wm<sup>-1</sup>C<sup>-1</sup>]

*D<sub>s</sub>*: difusividad binaria sal – agua [m<sup>2</sup>s<sup>-1</sup>]

*T*: temperatura [°C o K]

*S*: fracción másica de sal

*V*: velocidad [ms<sup>-1</sup>]

*P*: presión [Nm<sup>-2</sup>]

*μ*: viscosidad dinámica [Nsm<sup>-2</sup>]

*Φ*: tasa de generación de calor interno [Wm<sup>-3</sup>]

*g*: aceleración gravitacional [ms<sup>-2</sup>]

*ρ<sub>0</sub>*: densidad de referencia [kgm<sup>-3</sup>]

*T<sub>0</sub>*: temperatura de referencia [°C o K]

*S<sub>0</sub>*: salinidad de referencia

*β<sub>T</sub>*: coeficiente de expansión térmica [C<sup>-1</sup>]

*β<sub>S</sub>*: coeficiente de expansión másica [%<sup>-1</sup>]

Para una solución de agua con NaCl se tiene  $\beta_T = 5,24 \times 10^{-4} [C^{-1}]$  y  $\beta_S = 6,82 \times 10^{-3} [\%^{-1}]$ .

El sistema anterior representa un enfoque diferencial completo del problema, sin embargo, para la modelación del balance energético se utilizará un balance global macroscópico transiente unidimensional. En el balance global se consideran temperaturas uniformes en las zonas convectivas y que existe un gradiente vertical de temperatura en la zona no convectiva. Se asignan espesores a las diferentes zonas, definiendo volúmenes de control sobre los cuales se formulan los balances de energía. Estos consideran todas las entradas y salidas de energía térmica de cada volumen de control, así como también la variación de energía interna en el tiempo debida a estos flujos.

Este balance energético está dado por la ecuación (6) para un volumen de control determinado, el cual para el caso de este trabajo, será el volumen de cada zona de la poza solar, exceptuando la zona intermedia la cual se divide en varios volúmenes debido a su gradiente térmico y de concentración.

$$\begin{aligned}
& \frac{d}{dt} (K_{tot} + \phi_{tot} + U_{tot}) \\
& = \sum \left( \frac{1}{2} \frac{\langle v_1^3 \rangle}{\langle v_1 \rangle} + gh_1 + \widehat{H}_1 \right) w_1 - \sum \left( \frac{1}{2} \frac{\langle v_2^3 \rangle}{\langle v_2 \rangle} + gh_2 + \widehat{H}_2 \right) w_2 \\
& \quad + W_m + Q
\end{aligned} \tag{6}$$

Donde  $K_{tot}$  es la energía cinética total,  $\phi_{tot}$  es la energía potencial total y  $U_{tot}$  la energía interna total.  $v_i$  es la velocidad del fluido,  $h_i$  es la cota,  $\widehat{H}_i$  es la entalpía,  $w_i$  es el flujo másico,  $W_m$  es el trabajo termodinámico,  $Q$  es el calor y  $g$  la aceleración gravitatoria. Los subíndices 1 y 2 se refieren al punto de entrada y salida respectivamente [7].

Se utilizará el balance energético macroscópico debido a que el trabajo se desea enfocar en la extracción de energía más que en la predicción del gradiente dentro de la poza.

Se tomará en cuenta las ganancias, acumulación y pérdidas de energía en la poza mediante un balance de éstas mediante la siguiente ecuación.

$$C_p M \frac{dT}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \tag{7}$$

Donde  $Q_{in}$  y  $Q_{out}$  es el calor que ingresa y sale de la poza respectivamente.  $C_p$  es el calor específico del fluido y  $M$  la masa.  $T$  es la temperatura del fluido la cual varía en función del tiempo debido a los flujos de calor.

### 2.3. Métodos de extracción de calor

Existen dos métodos principales de extracción de calor desde la LCZ de la poza solar. El primero consiste en la extracción de calor mediante un intercambiador interno en la LCZ con un ciclo cerrado de agua, luego, esta agua con el calor extraído de la poza, va hacia otro intercambiador de calor externo para entregar la energía térmica captada a otro proceso (Figura 2.2). El segundo método consiste en un intercambiador de calor externo que extrae la solución de la LCZ, esta pasa por un intercambiador de calor externo y luego es devuelta a la zona inferior de la poza (Figura 2.3). La velocidad de este último ciclo se debe regular tal que no se altere el gradiente dentro de la poza [3]. Este último método posee las ventajas de poder mover el punto de extracción al punto de la máxima temperatura almacenada y devolver la solución a la parte inferior de la zona, sin embargo, presenta desventajas debido a la necesidad de materiales resistentes a los efectos de las sales, lo que aumenta el costo de inversión [3]. El primer método de intercambiador de calor interno implica altos costos iniciales también y de altos costos de mantenimiento, éste método es utilizado para pozas solares de pequeña escala, por el contrario, el segundo método, es más utilizado en pozas solares de mayor escala [6].

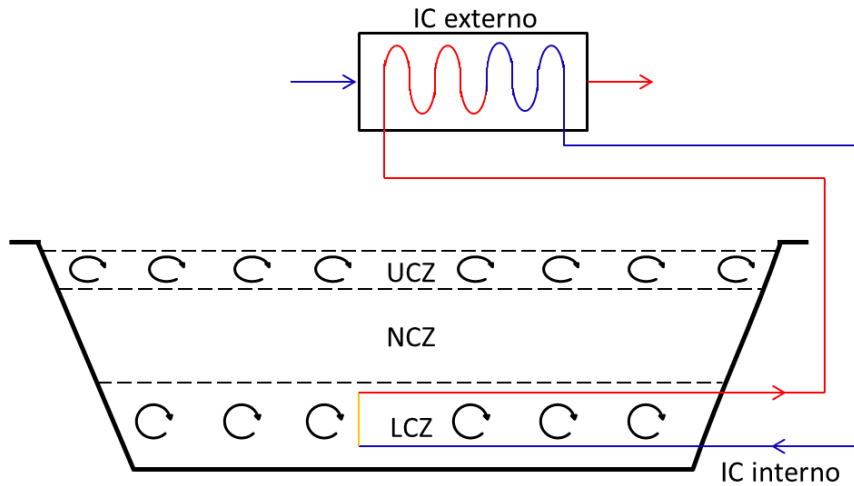


Figura 2.2: Método de extracción con intercambiador de calor interno y externo

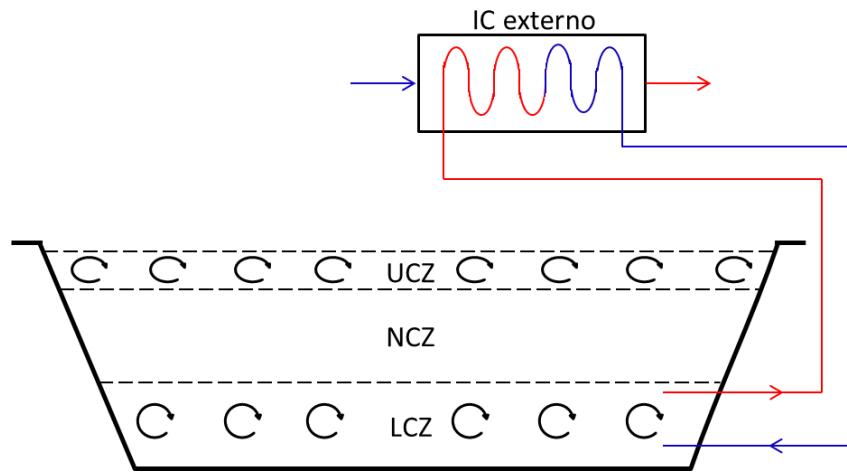


Figura 2.3: Método de extracción con intercambiador de calor externo

#### 2.4. Cargas y condiciones externas

Los procesos mineros a los cuales es factible entregarle calor mediante el sistema de pozas solares debido a sus temperaturas necesarias, son los procesos de lixiviación y de electro-obtención.

El proceso de lixiviación es un proceso hidrometalúrgico que permite obtener el cobre de los minerales oxidados que lo contienen. Esto se logra aplicando una disolución de ácido sulfúrico y agua. Para esto, se crean pilas de material extraído de la mina (anteriormente chancado). A estas pilas se les aplica la solución de ácido sulfúrico mediante un sistema de riego con aspersores. También existe la biolixiviación, la cual es un proceso natural de disolución que se lleva a cabo por bacterias con la habilidad de oxidar minerales sulfurados, esto permite que se libere el metal contenido en ellos. Este proceso se puede realizar a temperatura ambiente, sin embargo, estudios han indicado que al aumentar la temperatura de riego



aumenta la extracción de cobre en el proceso de lixiviación. Las temperaturas posibles a utilizar para aumentar la eficiencia de extracción son alrededor de los 30°C.

La electro-obtención es un proceso electrometalúrgico en el cual se recupera el cobre disuelto en una solución concentrada de cobre. Mediante este proceso se generan cátodos de alta pureza (de un 99,99%). En esta técnica se lleva la solución electrolítica, que es la que contiene el cobre como sulfato de cobre  $\text{CuSO}_4$ , a celdas de electro-obtención donde se generan los cátodos de cobre. Para que este procedimiento funcione correctamente, la solución electrolítica que ingresa a las celdas de electro-obtención debe ser calentado previamente a temperaturas entre los 40 y 50°C. En general, el aporte de calor a este circuito se realiza mediante sistemas de calderas, las cuales utilizan diésel u otro combustible fósil para realizar la combustión. Por otra parte, en esta etapa también se debe generar agua caliente para el lavado y despegado los cátodos resultantes. El lavado se realiza en distintas duchas a distintas temperaturas, las cuales van desde los 50 hasta los 90°C aproximadamente.

### **3. Desarrollo**

En primer lugar se recopiló y estudió bibliografía sobre el funcionamiento de las pozas solares, sus características, ganancias y pérdidas térmicas, y los distintos métodos de extracción de calor a partir de ellas.

Se definió la localización de la poza solar y el proceso al cual se le entrega el calor obtenido, esto último se realizó tomando en cuenta la temperatura necesaria en este proceso. Con esto, se obtuvieron las características del lugar y la demanda energética requerida por el proceso escogido.

Luego se definieron los espesores de las zonas de la poza (LCZ, NCZ, UCZ) mediante datos empíricos obtenidos a través de bibliografía.

Posteriormente, se implementó un modelo macroscópico de la evolución térmica de una poza solar, en base a su capacidad de acumulación, y de los inputs y outputs de energía. Se utilizó el software MATLAB para generar este modelo, con el cual se puede determinar la capacidad de extracción de calor de las pozas solares según sus dimensiones (ancho, largo, profundidad y espesores de las zonas) obteniendo el estado térmico en cualquier instante, es decir, la energía disponible y su nivel de temperatura.

Utilizando este modelo se generó un estudio del comportamiento de la poza frente a una extracción de calor desde la LCZ, y así, poder obtener el máximo valor de calor extraíble desde ésta. Esto permite determinar la demanda energética que se podrá suplir, mediante el sistema de pozas solares, para el proceso minero escogido.

Dado el calor extraíble de la poza se diseñó el intercambiador de calor a utilizar para el intercambio térmico entre los dos fluidos, definiendo un área y un coeficiente global de transferencia.

A partir de esta información, se realizó una evaluación económica de la construcción y operación del sistema de pozas junto con el intercambiador de calor. En ésta se incluyeron los costos de construcción, operación y mantenimiento del sistema, y los ingresos posibles a generar. Este estudio permite analizar la factibilidad económica de realizar el proyecto, además de poder comparar con otras pozas construidas.

A continuación se desarrolla cada etapa de la metodología realizada.

#### **3.1. Ubicación geográfica**

La ubicación de la planta se decidió en base al recurso solar disponible en la zona y a las industrias mineras establecidas en el sector, debido a que el proceso al cual se le suministra el calor obtenido mediante el sistema de pozas solares debe ser un proceso minero.

Se decidió ubicar el sistema en la II Región de Antofagasta debido al alto recurso solar disponible en la región y a una gran concentración de industrias mineras de Cobre en esta misma zona.

Se utilizaron los datos de radiación, temperatura ambiente y velocidad del viento de un lugar de referencia dentro de esta región que estuviera cercano a diversas mineras (se utilizó las coordenadas latitud: -22,81; longitud: -69,52, correspondientes al Suroeste de Calama). Estos datos se obtuvieron mediante el explorador de energía solar [12]. En la Figura 3.1 se puede ver el sitio escogido en un mapa.



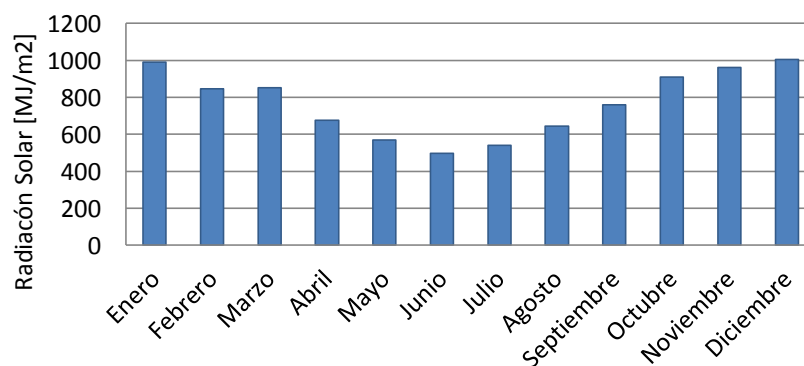
**Figura 3.1: Ubicación Poza solar en la Región de Antofagasta**

Los datos utilizados son del año 2010 para la localidad mencionada anteriormente. En la Tabla 3.1 se muestra la radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento promedio mensual en la zona para el año 2010.

**Tabla 3.1: Promedio mensual datos meteorológicos para el año 2010 [12]**

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octubre	Nov.	Dic.
Radiación [ $\text{W}/\text{m}^2$ ]	369,5	350,5	317,1	260,2	212,2	192,0	200,6	239,6	292,5	338,9	370,1	374,5
Temperatura ambiente [ $^{\circ}\text{C}$ ]	19,5	20,0	19,8	18,4	16,1	15,7	13,2	16,4	16,2	16,7	17,3	17,5
Velocidad viento [ $\text{m}/\text{s}$ ]	3,9	4,0	4,1	3,4	3,8	3,5	3,8	3,8	4,3	4,2	4,2	4,1

Además, la Figura 3.2 muestra la energía mensual por radiación para el año 2010 en la localidad escogida.



**Figura 3.2: Radiación mensual para el año 2010 [12]**

### 3.2. Proceso al cual se le suministra el calor

El proceso al cual se le suministra el calor obtenido mediante el sistema de pozas solares se decidió en base a la temperatura necesaria de éste.

Se escogió el proceso de electro-obtención utilizado en la minería del cobre. Este proceso utiliza un fluido el cual se debe llevar a una temperatura cercana a los 50°C.

En este trabajo se utilizará un rango de calor necesario de este proceso, el cual fue elegido en base a las necesidades térmicas de mineras de escala pequeña y mediana.

Se utilizará un rango entre los 100 y 1000 kW.

Las propiedades del electrolito son [19]:

- Calor específico:  $C_{pe} = 3530 J/kg^{\circ}C$
- Densidad:  $\rho_e = 1185 kg/m^3$
- Viscosidad dinámica  $\mu_e = 0,0015 Pa \cdot s$
- Conductividad térmica:  $k_e = 0,6 W/mK$

Las temperaturas de entrada y salida del electrolito son:

- Temperatura de entrada al intercambiador:  $T_{ein} = 45^{\circ}C$
- Temperatura de salida del intercambiador de calor varía en función del tiempo
- Temperatura de entrada al proceso de electro-obtención:  $T_{elecobt} = 55^{\circ}C$

El flujo másico depende de la demanda energética del proceso.

### 3.3. Balance energético

Para el balance energético, en primer lugar se realizó un balance para cada zona de la poza y luego se unieron mediante condiciones de borde para obtener el balance total de la poza solar.

El esquema de la poza solar se presenta en la Figura 3.3, en ésta se puede ver que la dirección de la coordenada z que se utiliza en el balance va desde la superficie de la poza ( $z=0$ ) hasta la base de ésta ( $z=H$ ).

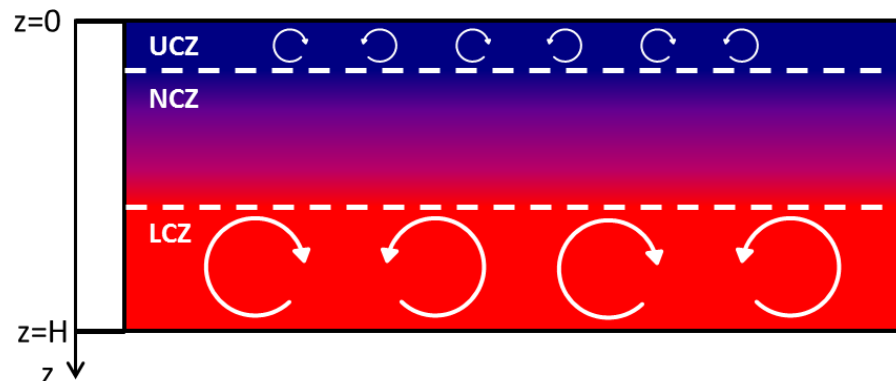


Figura 3.3: Esquema de zonas en un pozo solar

Se supuso temperatura uniforme a lo largo del eje horizontal de la poza en la UCZ y LCZ debido a que se desprecian las variaciones por la convección presente en estas zonas [16].

Se realizó un balance energético transiente utilizando cada zona de la poza como volumen de control. Para éste se consideraron las pérdidas y ganancias de energía mediante la siguiente ecuación.

$$C_p \rho V_{ol} \frac{dT}{dt} = \sum Q_{in} - \sum Q_{out} \quad (8)$$

Con  $C_p$  el calor específico [J/kgC] del fluido,  $\rho$  la densidad [kg/m<sup>3</sup>],  $V_{ol}$  el volumen [m<sup>3</sup>] de la zona estudiada,  $Q_{in}$  y  $Q_{out}$  el calor por unidad de área [W/m<sup>2</sup>] que entra y sale del volumen respectivamente.

Se utilizó una expresión para la densidad variable en función de la temperatura y de la concentración salina, la cual se presenta a continuación [5,9,13].

$$\rho(S, T) = \rho_0 [1 - \beta_T(T - T_0) + \beta_s(S - S_0)] \left[ \frac{kg}{m^3} \right] \quad (9)$$

Donde  $\rho_0$ ,  $T_0$  y  $S_0$  son la densidad, temperatura y salinidad de referencia respectivamente.  $\beta_T = 5,24 \times 10^{-4}$  [°C<sup>-1</sup>] y  $\beta_s = 6,82 \times 10^{-3}$  [%<sup>-1</sup>] son los coeficientes de expansión térmica y de concentración respectivamente [5]. Como referencia se tomó una temperatura  $T_0 = 60$  [°C], salinidad del  $S_0 = 15\%$  y densidad  $\rho_0 = 1088,6$  kg/m<sup>3</sup>.

El calor específico se asumió constante para toda la poza. Esta aproximación se utilizó debido a que su valor no varía significativamente para el rango de salinidad y temperatura utilizado, como se puede ver en el gráfico presentado en el Anexo C. El valor máximo y mínimo de esta propiedad para los límites de salinidad y temperatura utilizados en la poza son los siguientes: para una temperatura de 20°C y salinidad 0% se tiene un valor de 4180 J/kg°C, y para una temperatura de 90°C y salinidad 30% tiene un valor igual a 4055 J/kg°C.

El coeficiente conductivo del fluido utilizado se asumió constante para las tres zonas, a pesar de las diferencias de concentración salina entre ellas. Se tomó un valor de  $k = 0,6$  [W/mK] el cual corresponde a la conductividad del agua pura.

Los espesores de cada zona de la poza se asignan en base a espesores utilizados en pozas de dimensiones parecidas revisadas en la literatura.

A continuación se muestra el balance realizado para cada zona.

### 3.3.1. Zona convectiva superior (UCZ)

En la Figura 3.4 se muestra un esquema de la zona superior de la poza con las entradas y salidas de calor presentes en ella.

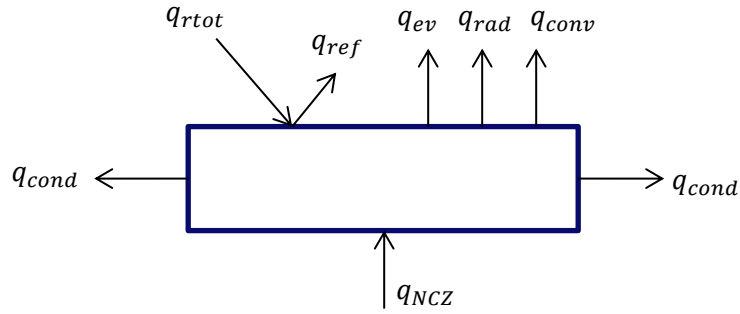


Figura 3.4: Esquema de ganancias y pérdidas energéticas en la UCZ

A continuación se explica cada uno de estos flujos de calor para la poza.

- *Radiación incidente:* Esta es la radiación que efectivamente incide dentro de la poza. Es la radiación total que llega a la superficie de la poza menos la radiación reflejada.

El índice de reflexión está dado por [9]:

$$r = 0,5 \left[ \frac{\tan^2(\theta_i - \theta_r)}{\tan^2(\theta_i + \theta_r)} + \frac{\sin^2(\theta_i - \theta_r)}{\sin^2(\theta_i + \theta_r)} \right] \quad (10)$$

Donde  $\theta_i$  es el ángulo de incidencia sobre la superficie de la poza y  $\theta_r$  el ángulo de refracción. El índice de reflexión utilizado en modelos térmicos para la calidad del agua varía entre 0,06 y 0,08 [5]. En este caso se tomó  $r=0,06$ . Se calculó el ángulo de refracción dado para el solsticio de verano en el hemisferio sur (21 de diciembre) a las 2 pm [15] mediante las siguientes ecuaciones. En la Figura 3.5 se presenta el esquema de los ángulos utilizados.

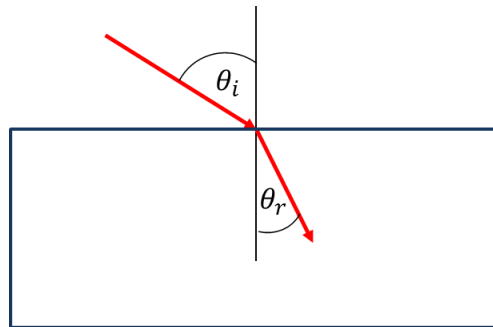


Figura 3.5: Ángulo de incidencia del rayo solar a la poza  $\theta_i$  y ángulo de refracción  $\theta_r$ .

En primer lugar, se calcula el ángulo de incidencia, el cual, para un plano horizontal (caso de la poza) se obtiene mediante la siguiente relación.

$$\cos\theta_1 = \sin\varphi\sin\delta + \cos\varphi\cos\delta\cos AH \quad (11)$$

Donde  $\delta$  es la declinación la cual depende del día juliano  $n$  mediante la siguiente ecuación.

$$\delta = 23,45 \left[ \sin \left( 360 \frac{284 + n}{365} \right) \right] \quad (12)$$

En este caso se tiene  $n = 355$ , lo que da  $\delta = -23,45^\circ$ .

$AH$  es el ángulo horario, dado por:

$$AH = 15(LST - 12) \quad (13)$$

Con  $LST$  la hora solar local. Para las 2 pm toma el valor de  $LST = 14$ , lo que implica  $AH = 30^\circ$ .

Y  $\varphi$  corresponde a la latitud. En este caso,  $\varphi = -22,81^\circ$ .

Reemplazando los resultados de las ecuaciones anteriores, se obtiene un ángulo de incidencia a la poza de  $\theta_1 = 27,55^\circ$ .

Por otra parte, mediante la ley de Snell se puede relacionar el ángulo de incidencia y de refracción:

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (14)$$

Donde  $n_1 = 1$  correspondiente al índice de refracción del aire y  $n_2 = 1,333$  al índice de refracción del agua.

Así, finalmente se puede obtener el valor del ángulo de refracción a utilizar, el cual toma el valor de  $\theta_r = 20,31^\circ$ .

Por otra parte, la radiación que efectivamente incide a la poza está dada por la radiación total que llega a la superficie de ésta ( $q_{rtot}$ ) y el índice de reflexión:

$$q_{inc} = (1 - r)q_{rtot} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (15)$$

La radiación incidente no se consideró directamente en el balance, si no que se consideró dentro del calor absorbido por la poza.

- *Calor absorbido:* Es la radiación absorbida por la solución dentro de la poza. Principalmente se debe a la radiación de longitud de onda corta debido a que la longitud de onda más larga, la que incluye la infrarroja, es absorbida mayoritariamente en la superficie de la poza (por lo tanto en la UCZ). En la Tabla 3.2 se puede ver el porcentaje de la radiación según la longitud de onda que atraviesa un determinado espesor de agua.

**Tabla 3.2: Distribución de la energía en porcentaje en el espectro del rayo de luz solar luego de pasar a través de capas de distinto espesor de agua [15]**

Longitud de onda [ $\mu m$ ]	Profundidad del agua [m]				
	0	0,01	0,1	1	10
0,2-0,6	23,7	23,7	23,6	22,9	17,2
0,6-0,9	36,0	35,3	30,5	12,9	0,9
0,9-1,2	17,9	12,3	0,8	-	-
Mayor a 1,2	22,4	1,7	-	-	-
Total	100,0	73,0	54,9	35,8	18,1

Esos son los porcentajes de la radiación en cada rango de longitud de onda que se absorben a las distancias indicadas. Ahora, cada rango de longitud de onda representa un porcentaje de la radiación total recibida.

Para calcular este calor se utilizó la ecuación de Rabl-Nielsen [5,9,10] la cual considera distintos coeficientes para diferentes longitudes de onda. Es decir, hay mayor absorción para ciertos rangos de longitud de onda.

$$q_z = q_{inc} \sum_{j=1}^4 \gamma_j \exp \left[ -\varepsilon_j \frac{z}{\cos \theta_r} \right] \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (16)$$

El calor volumétrico está dado por:

$$q_{abs} = -\frac{dq_z}{dz} \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (17)$$

Luego, el calor absorbido volumétrico, el cual es el que se utilizó en el balance energético está dado por:

$$q_{abs} = q_{inc} \sum_{j=1}^4 \frac{\varepsilon_j}{\cos \theta_r} \gamma_j \exp \left[ -\varepsilon_j \frac{z}{\cos \theta_r} \right] \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (18)$$

Donde  $\varepsilon_j [m^{-1}]$  corresponde al coeficiente de extinción, el cual incluye efectos de absorción y dispersión del rayo, y  $\gamma_j$  representa la fracción de radiación correspondiente a la absorción de cada longitud de onda. En la Tabla 3.3 se presenta el valor de estos coeficientes.  $z$  es la altura de la posición estudiada en la que se absorbe la radiación en metros [9,10]. En este caso  $z = z_{UCZ}$ , la cual se refiere a la altura del límite entre la UCZ y NCZ.

**Tabla 3.3: Coeficientes de absorción para distintas longitudes de onda [15]**

Longitud de onda [ $\mu m$ ]	$\gamma$	$\varepsilon [m^{-1}]$
0,2-0,6	0,237	0,032
0,6-0,75	0,193	0,450
0,75-0,9	0,167	3,000
0,9-1,2	0,179	35,000

- *Calor por convección:* Es el calor perdido desde la superficie de la poza hacia el exterior debido a la convección, la cual depende de la velocidad del viento. El coeficiente convectivo y el calor perdido por convección se definen respectivamente como [9,13]:

$$h_c = 5,7 + 3,8V \left[ \frac{W}{m^2 C} \right] \quad (19)$$

$$q_{conv} = h_c(T_s - T_a) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (20)$$



Con V la velocidad del viento en [m/s].  $T_s$  y  $T_a$  son la temperatura en la superficie de la poza y temperatura ambiente en [°C] respectivamente. La temperatura en la superficie de la poza es la misma que la temperatura de toda la UCZ.

- *Calor por evaporación:* Se refiere al calor perdido por evaporación en la superficie de la poza [9,13].

$$q_{ev} = \frac{L_v h_c (P_s - P_a)}{1.6 C_{pa} P_{atm}} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (21)$$

Donde:

$L_v$ : Calor latente de evaporación del agua, 2257000 [J/kg]

$C_{pa}$ : Calor específico del aire, 1012 [J/kgC]

$P_{atm}$ : Presión atmosférica, 101325 [kPa]

$P_s$  y  $P_a$  son la presión de vapor del agua en la superficie y la presión parcial de vapor de agua en el aire respectivamente. Para obtener estos valores se utiliza la ecuación de Antoine, la cual se muestra a continuación [17].

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = A - \frac{B}{T/T_0 + C} \quad (22)$$

Donde P es la presión de vapor para una temperatura T determinada.  $P_0$  y  $T_0$  son una presión y temperatura de referencia y A,B y C son constantes que dependen del fluido utilizado.

En este caso se utilizó como fluido agua pura. Reemplazando las constantes para este caso se obtiene la siguiente ecuación para la presión de vapor en la superficie.

$$P_s = \exp\left(16,29 - \frac{3816,44}{T_s + 227,02}\right) [kPa] \quad (23)$$

La presión parcial de vapor se calcula tomando en cuenta la humedad relativa mediante la siguiente ecuación.

$$P_a = R_h \exp\left(16,29 - \frac{3816,44}{T_a + 227,02}\right) [kPa] \quad (24)$$

Con  $R_h$  la humedad relativa. Se utilizó la humedad promedio de la ubicación la cual es 0,3.

- *Calor por radiación al cielo:* Este calor refleja la radiación desde la poza al cielo o desde el cielo a la poza. Si es de signo negativo, significa que existe una ganancia de calor desde el cielo a la poza por radiación [9,13].

$$q_{rad} = \varepsilon \sigma \left[ (T_s + 273,15)^4 - (T_{sky} + 273,15)^4 \right] \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (25)$$

Donde:

$$T_{sky} = T_a + [0,55 + 0,704\sqrt{P_a}]^{0,25} \quad (26)$$

$T_{sky}$  es la temperatura del cielo modificada según la presión parcial de vapor de agua en el aire la cual depende de la humedad relativa y la temperatura ambiente.  $\epsilon$  es la emisividad del agua de 0,97 y  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann de  $5,67 \times 10^{-8} [W/m^2K^4]$ .

- *Calor por conducción:* Calor perdido por conducción a través de las paredes laterales suponiendo tierra (arena seca) como primera aproximación [13].

$$q_{cond} = U_{gr}(T_s - T_g) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (27)$$

Donde:

$U_{gr}$ : Coeficiente global conductivo de la tierra, supuesto como 0,5 W/m<sup>2</sup>C

$T_g$ : Temperatura tierra, 10°C

- *Calor desde la NCZ:* Es el calor transferido desde la zona no convectiva a la zona superior. Se utiliza el balance energético en la NCZ y LCZ para obtenerlo. Está dado por:

$$q_{NCZ} = \frac{k_1}{d_1} (T_{NCZ1} - T_s) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (28)$$

Donde  $k_1$  es la conductividad térmica del fluido mencionada anteriormente,  $d_1 [m]$  es un espesor dado y  $T_{NCZ1} [°C]$  es la temperatura de la primera capa de la NCZ.

Se asumió la temperatura de la zona estudiada constante en cada punto de ésta, es decir,  $T_{UCZ} = T_s$ .

Reemplazando los términos anteriores en la ecuación (8) se obtiene:

$$C_p \rho V_{oUCZ} \frac{dT}{dt} = q_{abs}(a_p l_p e_{UCZ}) - (q_{rad} + q_{conv} + q_{ev})(a_p l_p) - q_{cond}(2a_p e_{UCZ} + 2l_p e_{UCZ}) \quad (29)$$

Donde  $a_p$ ,  $l_p$  y  $e_{UCZ}$  son el ancho y largo de la poza y el espesor de la UCZ en metros respectivamente.

Se discretizó de manera explícita la ecuación (29) para obtener una solución numérica para la temperatura de la forma:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{T_{n+1} - T_n}{\Delta t} \quad (30)$$

Con  $T_n$  la temperatura en el instante n,  $T_{n+1}$  la temperatura en el instante n+1 y  $\Delta t$  el paso del tiempo. Mediante la ecuación (29) y (30) se obtiene una solución para la temperatura en función del tiempo.

$$T_{n+1} = \frac{\Delta t}{C_p \rho V_{olUCZ}} [(q_{abs} - q_{rad} - q_{conv} - q_{ev})(a_p l_p) - q_{cond}(2a_p z_{UCZ} + 2l_p z_{UCZ})] + T_n \quad (31)$$

### 3.3.2. Zona no convectiva (NCZ)

Esta zona posee un gradiente de concentración salina y de temperatura. Para simular este gradiente se dividió la zona en N capas de un espesor  $d_i$  [m]. Esta zona tiene transferencia de calor por conducción a las paredes, entre cada capa perteneciente a ella, hacia la UCZ en el límite superior y conducción a la LCZ en el límite inferior.

La Figura 3.6 muestra el esquema general de la NCZ, donde se puede ver la conducción hacia las otras zonas (UCZ y LCZ) y a las paredes, además de la ganancia térmica de la zona, la cual se debe al calor por absorción.

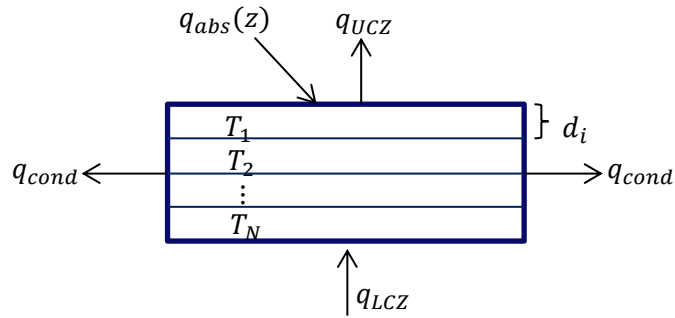


Figura 3.6: Esquema de ganancias y pérdidas energéticas de la NCZ

En la Figura 3.7 se muestra el esquema de cada capa que compone la NCZ. En éstas se tiene conducción hacia la capa superior (capa  $i - 1$ ) y desde la capa inferior (capa  $i + 1$ ).

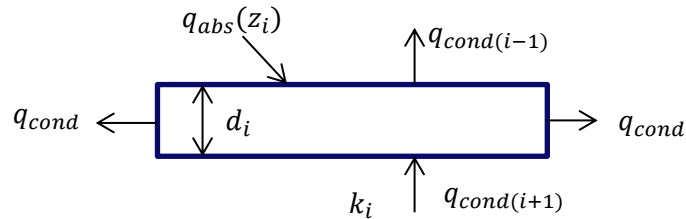


Figura 3.7: Balance energético capa j de la NCZ

A continuación se analiza cada calor asociado a esta zona.

- *Calor por conducción hacia las paredes:* Se calculó de la misma forma que para el caso de la UCZ.
- *Calor absorbido:* También se calculó de forma análoga a la UCZ. En este caso, la altura es de:

$$z = e_{UCZ} + i d_i$$

Por lo tanto, la ecuación para el calor absorbido es:

$$q_{abs_i} = q_{inc} \sum_{j=1}^4 \frac{\varepsilon_j}{\cos\theta_r} \gamma_j \exp \left[ -\varepsilon_j \frac{e_{UCZ} + id_i}{\cos\theta_r} \right] \left[ \frac{W}{m^3} \right] \quad (32)$$

- *Calor por conducción al fluido:* Es el calor que se transfiere debido a la conducción entre el fluido en la NCZ y en los límites con la UCZ y LCZ. Depende del coeficiente conductivo  $k_i$  de la solución.

Incluye el calor transferido a la capa superior (ecuación (33)) y a la capa inferior (ecuación (34)).

$$q_{condsup} = \frac{k_i}{d_i} (T_i - T_{i-1}) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (33)$$

$$q_{condinf} = \frac{k_i}{d_i} (T_{i+1} - T_i) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (34)$$

Reemplazando los términos de calor en la ecuación (8) se obtiene:

$$C_p \rho V_{olNCZ} \frac{dT}{dt} = q_{abs_i} (a_p l_p e_i) - q_{cond} (2a_p e_i + 2l_p e_i) - q_{condsup} (a_p l_p) + q_{condinf} (a_p l_p) \quad (35)$$

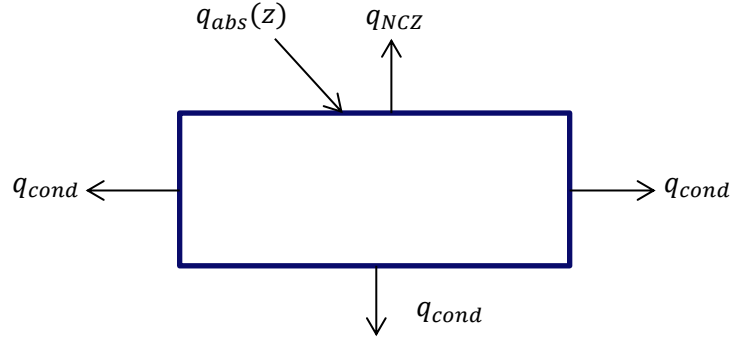
Discretizando la temperatura:

$$T_{n+1} = \frac{\Delta t}{C_p \rho V_{ol}} \left[ q_{abs_i} (a_p l_p e_{NCZ}) - q_{cond} (2a_p e_{NCZ} + 2l_p e_{NCZ}) - q_{condsup} (a_p l_p) + q_{condinf} (a_p l_p) \right] + T_n \quad (36)$$

El gradiente de concentración salina en esta zona se supuso estabilizado artificialmente en el inicio del funcionamiento de la poza, asumiendo un aumento lineal desde la concentración de la UCZ a la LCZ.

### 3.3.3. Zona convectiva inferior (LCZ)

Esta zona posee una concentración salina constante cercana al punto de saturación. La Figura 3.8 muestra el esquema de las ganancias y pérdidas energéticas en esta zona. Se supuso temperatura uniforme  $T_L$  en toda la zona.



**Figura 3.8: Esquema de ganancias y pérdidas energéticas de la LCZ**

- *Calor por conducción a las paredes:* Es análogo al calor por conducción de la UCZ.
- *Calor absorbido:* Se calculó de la misma manera que la UCZ pero con la profundidad de esta zona ( $z_{LCZ}$ ). La ecuación queda de la siguiente manera.

$$q_{abs_i} = q_{inc} \sum_{j=1}^4 \frac{\varepsilon_j}{\cos\theta_r} \gamma_j \exp\left[-\varepsilon_j \frac{z_{LCZ}}{\cos\theta_r}\right] \left[\frac{W}{m^3}\right] \quad (37)$$

- *Calor por conducción hacia el suelo:* Es el calor perdido por conducción al fondo de la poza. Se calculó mediante la siguiente ecuación.

$$q_{condgr} = U_{gr}(T_L - T_g) \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (38)$$

- *Calor conducido a la NCZ:* Es el calor transferido por conducción hacia la NCZ.

$$q_{condNCZ} = \frac{k_N}{d_N}(T_L - T_N) \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (39)$$

- *Radiación remanente:* Se refiere a la radiación que no fue absorbida por ninguna de las zonas. Se supone que al llegar al fondo de la poza es absorbido por el fondo y transferido al líquido [5,9,13]. Se calculó mediante la ecuación (16) la cual entrega una expresión para el calor absorbido superficialmente, evaluada para la profundidad de la poza, es decir  $z_{LCZ}$ . Es de aproximadamente el 20% de la radiación total.

$$q_{rem} = q_{inc} \sum_{j=1}^4 \gamma_j \exp\left[-\varepsilon_j \frac{z_{LCZ}}{\cos\theta_r}\right] \left[\frac{W}{m^2}\right] \quad (40)$$

Para calcular la temperatura en cada instante se utiliza la siguiente ecuación, donde se incluyen las pérdidas y ganancias vistas anteriormente.

$$C_p \rho V_{olNCZ} \frac{dT}{dt} = q_{abs}(a_p l_p e_{LCZ}) - q_{cond}(2a_p e_{LCZ} + 2l_p e_{LCZ}) - q_{condgr}(a_p l_p) - q_{condNCZ}(a_p l_p) + q_{rem}(a_p l_p) \quad (41)$$

Discretizando la temperatura se obtiene:

$$T_{n+1} = \frac{\Delta t}{C_p \rho V_{ol}} [q_{abs}(a_p l_p e_{LCZ}) - q_{cond}(2a_p e_{LCZ} + 2l_p e_{LCZ}) - q_{condgr}(a_p l_p) - q_{condNCZ}(a_p l_p) + q_{rem}(a_p l_p)] + T_n \quad (42)$$

### 3.3.4. Extracción de calor

Se consideró una extracción de calor desde la LCZ a partir del período en que el perfil de la NCZ toma una forma lineal, es decir, desde que el gradiente de temperatura en dicha zona se estabiliza. Y continúa hasta el fin del período de funcionamiento de la poza.

El método de extracción de calor, como se explicó en la sección de antecedentes, puede ser mediante sólo un intercambiador de calor (IC) externo, donde se toma el mismo fluido de la poza, o mediante un intercambiador de calor interno con un ciclo cerrado de otro fluido. En este caso se decidió utilizar el método del IC externo debido a que, dentro de la poza se tiene sólo convección natural, por lo que, para el caso del método con un IC interno, se tendría un bajo coeficiente de transferencia de calor, a menos que se agregara convección forzada, sin embargo, esto último podría desestabilizar el gradiente de concentración salina y temperatura en la NCZ.

#### 3.3.4.1. Extracción de calor constante

En primer lugar, se incluye una extracción constante de calor en el balance energético de la LCZ mediante las siguientes ecuaciones. Este enfoque permite obtener el límite de calor extraído sin que se pierda el perfil lineal de temperatura en la NCZ.

Para el flujo extraído desde la poza se tiene:

$$Q_{ext} = \dot{m} C_p T_{LCZ} [W] \quad (43)$$

Donde  $\dot{m}$  [kg/s] es el flujo másico del fluido extraído de la poza y  $T_{LCZ}$  [°C] es la temperatura de la zona convectiva inferior.

Análogamente, para el flujo reinyectado a la poza:

$$Q_{in} = \dot{m} C_p T_{retorno} [W] \quad (44)$$

Donde  $T_{retorno}$  [°C] es la temperatura a la cual se reinyecta el fluido a la poza.

El flujo másico y la temperatura de retorno dependen del calor que se desea extraer y de las temperaturas del fluido utilizado en el proceso al cual se le suministra el calor, el cual, como se dijo anteriormente, es la electro-obtención, con una temperatura inicial de 45°C y una final de 55°C.

La temperatura mínima admisible para el fluido de la poza es de 60°C debido a que ésta debe ser mayor que la temperatura a la que se tiene que llevar el electrolito.

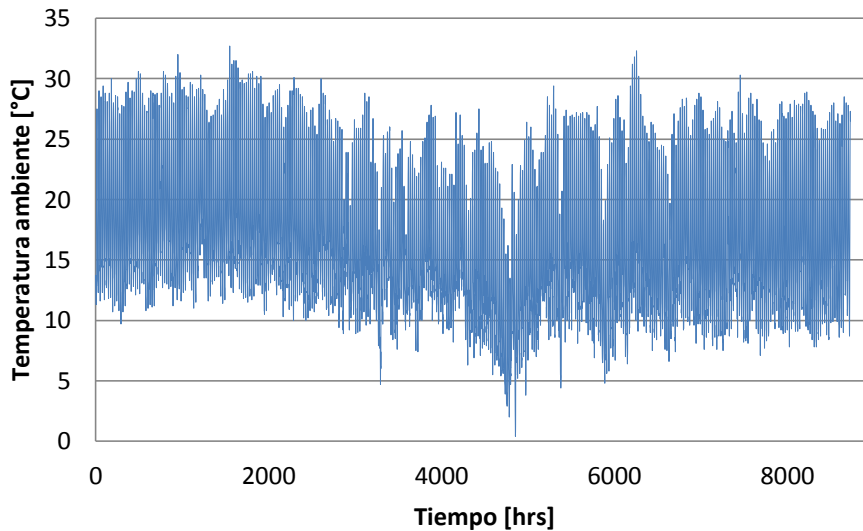
Para obtener el flujo másico necesario y la temperatura de retorno se asumió un valor del calor requerido y de la variación de temperatura admisible ( $\Delta T = T_{retorno} - T_{LCZ}$ ).

Finalmente, la ecuación para obtener la temperatura en la LCZ incluyendo la extracción de calor queda de la siguiente forma.

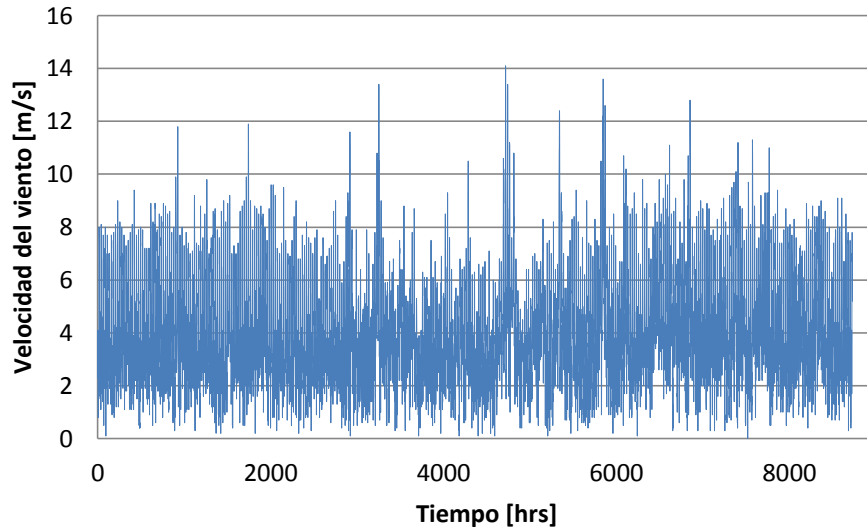
$$T_{n+1} = \frac{\Delta t}{C_p \rho V_{ol}} [q_{abs}(a_p l_p e_{LCZ}) - q_{cond}(2a_p e_{LCZ} + 2l_p e_{LCZ}) - q_{cond,gr}(a_p l_p) - q_{cond,NCZ}(a_p l_p) + q_{rem}(a_p l_p) + Q_{in} - Q_{ext}] + T_n \quad (45)$$

Para obtener la solución de las ecuaciones de temperatura se realizó un modelo numérico en el software Matlab. En el Anexo A se presenta el modelo utilizado.

Para realizar el modelo transiente del balance energético se tomaron datos del explorador solar [12] de radiación [ $W/m^2$ ], velocidad del viento [ $m/s$ ] y temperatura ambiente [ $^{\circ}C$ ] cada una hora en la ubicación escogida durante el año 2010. En la Figura 3.9 y Figura 3.10 se muestra un gráfico de la temperatura ambiente y velocidad del viento en función del tiempo respectivamente de los datos utilizados para el año 2010, el gráfico de la radiación se muestra en la Figura 4.1. En el Anexo B se muestra una tabla con los valores de las tres variables mencionadas anteriormente para el primer día.



**Figura 3.9: Temperatura ambiente en función del tiempo para el año 2010**



**Figura 3.10: Velocidad del viento en función del tiempo para el año 2010**

Debido a que los datos obtenidos son valores cada 1 hora, el paso del tiempo utilizado para la discretización de la temperatura en función del tiempo es de 1 hora, es decir,  $\Delta t = 1 \text{ hr}$ .

La temperatura inicial se supuso como la temperatura ambiente del primer día del año 2010 a las 12 del día a lo largo de toda la poza.

Se utilizó una humedad relativa del 30%, la cual equivale al promedio anual en la localidad de Calama.

### **3.3.5. Eficiencia de extracción**

Esta eficiencia compara el calor extraído frente a la radiación incidente en la poza en un período determinado de tiempo.

Se define como:

$$\eta = \frac{\text{Calor extraído}}{\text{Radiación incidente}} \quad (46)$$

El período de tiempo utilizado es del tiempo de análisis de la poza, que en este caso es de 3 años. Esta eficiencia es la eficiencia real del sistema.

## **3.4. Intercambio térmico para suministrar calor al proceso**

El intercambio de calor se genera entre la solución salina de la poza y el fluido de electrolito. El valor del calor transferido se supuso conocido. En la Figura 3.11 se muestra el esquema del intercambiador.



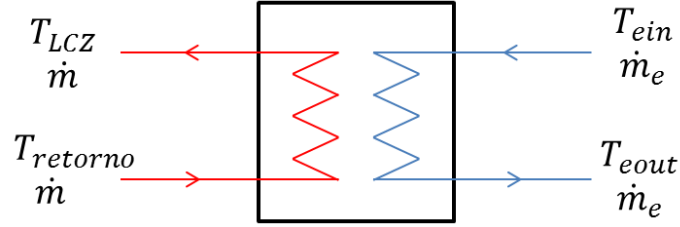


Figura 3.11: Esquema del intercambiador de calor entre el fluido de la poza y el electrolito

Con  $T_{ein}$  [ $^{\circ}C$ ] y  $T_{eout}$  [ $^{\circ}C$ ] la temperatura de entrada y salida del electrolito respectivamente,  $\dot{m}_e$  [ $kg/s$ ] el flujo másico del electrolito y el resto de las variables ya fueron mencionadas.

La temperatura  $T_{LCZ}$  es conocida y varía en función del tiempo ya que está dada por la dinámica de la poza. Dado un flujo másico fijo, al variar la temperatura de la LCZ varía el calor posible a entregar. Es por esto que el calor entregado varía en función del tiempo, y por lo mismo, puede ser imposible entregar el calor necesario para el proceso de electro-obtención en invierno debido a que en esta estación es cuando se tienen las menores temperaturas. Si la temperatura mínima obtenida para el fluido de la poza es menor a la temperatura admisible para entregar calor, se suspenderá la entrega de calor para estas fechas. Sin embargo, se buscó una extracción de calor que lograra tener las mayores temperaturas posibles, para suministrar calor el mayor tiempo posible, sin disminuir en gran cantidad la eficiencia de la poza. Esto último se debe a que al extraer más calor, se tienen menores temperaturas pero una mayor eficiencia (debido a que se extrae más calor en el mismo período de tiempo).

Se puede obtener el calor que es posible entregar ( $Q$  [ $W$ ]).

$$Q = \dot{m}C_p(T_{retorno} - T_{LCZ}) \quad (47)$$

Para el caso del electrolito, las temperaturas de entrada y salida que se desean obtener son conocidas, así como también el flujo másico, con lo que se puede saber el calor necesario que debe recibir para poder variar su temperatura ( $Q_e$  [ $W$ ]), el cual está dado por:

$$Q_e = \dot{m}_e C_{pe}(T_{ein} - T_{eout}) \quad (48)$$

Sin embargo, como el flujo másico extraído de la poza es constante pero la temperatura del fluido cambia, el calor posible a extraer también varía en función del tiempo.

Se puede obtener una expresión para el calor extraído mediante el balance energético para el fluido de la poza, el cual está dado por la ecuación (47) y el fluido del electrolito, dado por la ecuación (48), además del balance para el intercambiador de calor, tomando en cuenta el área de éste ( $A_{ic}$  [ $m^2$ ]) y su coeficiente de transferencia global ( $U$  [ $W/m^2^{\circ}C$ ]).

La inercia térmica del IC es despreciable con respecto a la de la poza. Por lo tanto, los balances térmicos de éste son instantáneos. Los flujos en el IC están en contracorriente.

Para el IC se tiene la siguiente ecuación para el flujo de calor.

$$Q = UA_{ic}\Delta T_{ln} \quad (49)$$

Con  $\Delta T_{ln}$  [ $^{\circ}C$ ] la diferencia media logarítmica de temperatura entre los dos fluidos, dada por:

$$\Delta T_{ln} = \frac{(T_{LCZ} - T_{eout}) - (T_{retorno} - T_{ein})}{\ln\left(\frac{T_{LCZ} - T_{eout}}{T_{retorno} - T_{ein}}\right)} \quad (50)$$

Despejando  $T_{retorno}$  y  $T_{eout}$  de la ecuación (47) y (48) respectivamente se tiene:

$$T_{retorno} = T_{LCZ} - \frac{Q}{\dot{m}C_p} \quad (51)$$

$$T_{eout} = T_{ein} + \frac{Q}{\dot{m}_e C_{pe}} \quad (52)$$

Reemplazando en la ecuación (49) el  $\Delta T_{ln}$  y las expresiones obtenidas para  $T_{retorno}$  y  $T_{eout}$ , y luego reordenando, se obtiene la siguiente expresión.

$$Q = \frac{(T_{LCZ} - T_{ein})(1 - B)}{\left(\frac{1}{\dot{m}_e C_{pe}} - \frac{B}{\dot{m}C_p}\right)} \quad (53)$$

Con:

$$B = \exp\left(UA\left(\frac{1}{\dot{m}C_p} - \frac{1}{\dot{m}_e C_{pe}}\right)\right) \quad (54)$$

Considerando constante la temperatura de entrada del electrolito, se puede evaluar el calor entregado al proceso, y extraído de la poza, en función de la temperatura de extracción  $T_{LCZ}$  y sus variaciones en el tiempo.

Luego, con este calor, es posible saber la temperatura de salida del electrolito y la temperatura de retorno del fluido de la poza mediante las ecuaciones (52) y (51) respectivamente.

Estas ecuaciones se incluyen en el programa Matlab para obtener el calor extraído y la temperatura de salida del electrolito en función del tiempo, que es la que se desea llevar a  $55^{\circ}C$ . Esto es necesario para saber el período de tiempo en que no es posible suministrar el calor necesario al electrolito, ya que en este período se necesitará un sistema de respaldo. Además, también existen períodos de tiempo en que la temperatura del electrolito superará los  $55^{\circ}C$ , en estos casos, este fluido se mezclará con el electrolito de entrada al IC (a  $45^{\circ}C$ ), para bajar su temperatura hasta los  $55^{\circ}C$  necesarios.

Finalmente, mediante estas ecuaciones se obtienen los parámetros iniciales para el diseño del intercambiador.

La temperatura  $T_{LCZ}$ , como ya se mencionó, varía con el tiempo, teniendo mínimas en invierno y máximas en verano. Para el diseño del IC se utiliza la temperatura máxima debido a que es la condición límite.

#### **3.4.1. Intercambiador de calor**

Se evaluó la elección entre un IC de placas y un IC de tubos y carcaza. Finalmente, se decidió utilizar un IC de placas debido a lo siguiente.

En primer lugar, debido al tipo de fluidos que se tienen, los cuales son una solución salina y el otro un ácido, es necesario utilizar como material acero inoxidable. El uso de este material en un IC de placas es más común y barato que en un IC de tubos y carcaza.

Por otra parte, el IC de placas presenta un diseño modular, por lo que en el caso de ser necesario, el área se puede disminuir para invierno mediante las placas. A diferencia del IC de tubos y carcazas, presentan una baja razón volumen/área.

Además, el IC de placas presenta altos coeficientes de transferencia y cumplen con los requerimientos de temperatura y presión que se tienen.

Los parámetros relevantes para el IC son:

- Temperatura del fluido de la poza que entra al intercambiador  $T_{LCZ}$ . Como esta temperatura varía en función del tiempo, se utilizó el máximo valor de ésta, es decir,  $T_{LCZmax}$ .
- Temperatura del fluido de la poza que sale del intercambiador  $T_{retorno}$ . Esta temperatura también varía en función del tiempo, por lo que se utilizó la máxima,  $T_{retornomax}$ .
- Temperatura del electrolito que entra al intercambiador. Ésta es fija y toma un valor de  $T_{ein} = 45^{\circ}C$ .
- Temperatura del electrolito que sale del intercambiador. Este valor varía en función del tiempo por lo que se utilizó su máximo valor  $T_{eoutmax}$ .
- Flujo másico del fluido de la poza y del electrolito.
- El área del intercambiador. En primera instancia se calculó un área preliminar mediante el diseño del IC a partir de las temperaturas y flujos másicos de entrada y de salida. Luego, esta área se varió en el programa Matlab para determinar el área óptima para obtener la temperatura del electrolito deseada. Se detalla la metodología para calcularla en la siguiente sección.
- Coeficiente global de transferencia U, el cual depende del tipo de fluido utilizado para el IC. Se obtiene mediante la Tabla de Coulson y Richardson [21] para distintos fluidos en un intercambiador de calor de placas. En este caso se supuso un  $U=4000 \text{ W/m}^2\text{K}$  preliminar, para un fluido de solución acuosa y otro fluido agua.
- Potencia Q, la cual se obtiene mediante la ecuación (53).
- Material del intercambiador, el cual debe ser un tipo de acero inoxidable debido a los fluidos utilizados (agua salina y ácido).

##### **3.4.1.1. Diseño del intercambiador de calor**

Como se dijo anteriormente, es necesario obtener un área preliminar para obtener una aproximación del área a utilizar en el programa Matlab.

Para esto, se realizó el diseño del intercambiador de placas [20]. Con esto, se puede obtener además un coeficiente de transferencia global más exacto, a partir del coeficiente global preliminar mencionado anteriormente.

En primer lugar, se necesitan las temperaturas de entrada y salida y los flujos másicos de ambos fluidos.

La temperatura de entrada al IC del fluido de la poza ( $T_{LCZ}$ ) y del electrolito ( $T_{ein}$ ) es conocida. Para obtener la temperatura de retorno del fluido a la poza ( $T_{retorno}$ ), se asumió una variación entre ésta y  $T_{LCZ}$ . Los flujos másicos de ambos fluidos se suponen conocidos. Con estos datos se puede obtener el valor del calor a intercambiar y la temperatura de salida del IC del electrolito ( $T_{eout}$ ) mediante la ecuación (47) y (52) respectivamente.

Primero se calculó la diferencia logarítmica de temperatura mediante la ecuación (50). Luego se calculó el valor de  $\theta_1$  para el fluido con la variación máxima entre su temperatura de entrada y de salida al IC.

$$\theta_1 = \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{ln}} \quad (55)$$

Se calculó un factor de corrección ( $F_t$ ) para la diferencia logarítmica de temperatura. Para este caso se utilizó un arreglo de flujo en serie, para el cual se tiene un valor típico de  $F_t = 0,95$  [21].

La diferencia logarítmica a utilizar queda como:

$$\Delta T_{inc} = F_t \Delta T_{ln} \quad (56)$$

Con esto se calculó el área utilizando el U preliminar mediante la siguiente ecuación.

$$A = \frac{Q}{U \Delta T_{inc}} \quad (57)$$

Además, se escogieron las dimensiones de las placas a utilizar. Las dimensiones utilizadas, las cuales corresponden a dimensiones típicas de las placas [21], son: Un área efectiva de la placa de  $A_{placa} = 0,75 \text{ m}^2$ , un largo efectivo de  $L_{placa} = 1,5 \text{ m}$  y un ancho de  $b_{placa} = 0,5 \text{ m}$ .

Luego se calculó el número necesario de placas mediante la siguiente ecuación.

$$N = \frac{A}{A_{placa}} \quad (58)$$

El número de canales por paso se obtiene a partir de:

$$N_{cpp} = \frac{N - 1}{2} \quad (59)$$

Además, se asumió un espaciado entre las placas de  $e_{ep} = 3 \text{ mm}$ . Con esto se puede calcular el área transversal del canal y el diámetro equivalente.

$$A_{tc} = e_{ep} b_{placa} \quad (60)$$

$$d = 2e_{ep} \quad (61)$$

Con esto, se calculó para cada fluido el coeficiente convectivo  $h$  de éste en el IC. Éste se calculó mediante el número de Nusselt (Nu), el cual se obtiene a partir del número de Reynolds (Re), que incluye la velocidad del fluido ( $u$ ). La ecuación para obtener Nu se obtiene a partir de la correlación de Kumar para intercambiadores de placas.

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho} \frac{1}{A_{tc}} \frac{1}{N_{c_{pp}}} \quad (62)$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (63)$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (64)$$

$$Nu = 0,26 Re^{0,65} Pr^{0,4} \quad (65)$$

$$h = \frac{k Nu}{d} \quad (66)$$

Con  $\rho$  [kg/m<sup>3</sup>] la densidad,  $\mu$  [kg/ms] la viscosidad dinámica,  $k$  [W/mK] la conductividad térmica y  $C_p$  [J/kgK] el calor específico del fluido.

Por otra parte, son necesarios los coeficientes de ensuciamiento de cada fluido. Para el caso del agua salina se tiene  $R_p = 6000$  [W/m<sup>2</sup>K] y para el electrolito  $R_e = 5000$  [W/m<sup>2</sup>K] [21].

También es necesaria la conductividad del material del IC, en este caso, de acero inoxidable se tiene  $k_{IC} = 16$  [W/mK]. El espesor de las placas se supone de  $e_{placa} = 0,75$  mm.

Con esto se puede obtener el nuevo valor del coeficiente global de transferencia mediante la siguiente ecuación.

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_p} + \frac{1}{h_e} + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_e} + \frac{e_{placa}}{k_{IC}}} \quad (67)$$

Donde  $h_p$  y  $h_e$  son el coeficiente convectivo del fluido de la poza y del electrolito obtenido respectivamente.

Si es que este  $U$  obtenido es muy distinto al preliminar, se repite el proceso utilizando el último  $U$  obtenido hasta que converja.

Para corroborar los resultados entregados por el software Matlab, se utilizó una planilla Excel, mostrada en el Anexo D con las mismas ecuaciones mencionadas anteriormente para obtener el calor entregado por el fluido de la poza al electrolito. La planilla entrega resultados para casos puntuales de temperatura, a diferencia del Matlab que entrega diversos resultados en función del tiempo. Por lo tanto, para corroborar se tomaron determinados tiempos y para éstos se calculó el calor mediante las dos herramientas.

Por otra parte, el calor en un intercambiador tiene un comportamiento asintótico, es decir, hay un punto que, a pesar de aumentar el área de transferencia, el calor no sigue aumentando y se mantiene constante, es decir, una vez alcanzado este estado no vale la pena seguir aumentando el área, ya que el calor máximo que se puede transferir está determinado por los caudales y temperaturas de entrada. Debido a esto, en la planilla se agregó además el número de unidades de transferencia (NUT), el cual marca la asintoticidad del calor, donde el valor límite de NUT es 4. Este número está dado por la siguiente ecuación.

$$NUT = \frac{A_{IC}U}{(\dot{m}C_p)_{min}} \quad (68)$$

Donde  $(\dot{m}C_p)_{min}$  es el producto entre el flujo másico y calor específico menor entre los dos fluidos utilizados.

#### **3.4.1.2. Material del intercambiador de calor**

El material del IC debe ser acero inoxidable, sin embargo, existen varios tipos de éste. Debido a esto, se utilizó el software CES EduPack para seleccionar el material a utilizar.

Se tomaron dos variables a considerar, la corrosión al metal por parte de ambos fluidos (electrolito y solución salina) y la durabilidad del material frente a estos fluidos.

El electrolito se asumió como un ácido fuerte y el fluido de la poza como una solución salina.

En cuanto a la durabilidad, se buscó materiales que presentaran una durabilidad excelente frente a estos dos fluidos. Luego, se graficó la conductividad térmica en función del precio por kg de los materiales que cumplieran estos requisitos. En la Figura 3.12 se muestra el gráfico obtenido.

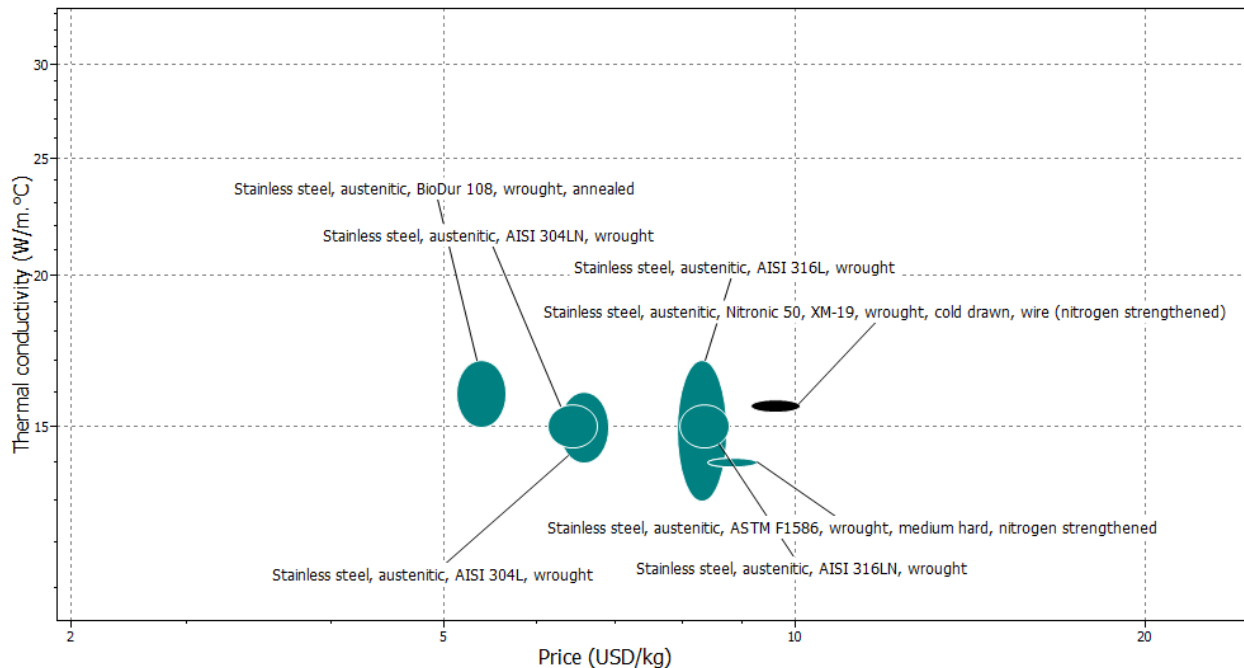


Figura 3.12: Tipos de acero inoxidable que cumplen con una excelente durabilidad frente al agua salina y ácido fuerte

Dentro de estos materiales, se buscó los que cumplieran con una resistencia a la corrosión desde moderada hasta excelente frente a los dos fluidos. Los que cumplieran con estas condiciones son los siguientes.

- AISI304L con resistencia moderada al agua salina y moderada al ácido fuerte.
- AISI316L con resistencia buena al agua salina y moderada al ácido fuerte.
- Nicotronic 50, XM-19 con resistencia excelente al agua salina y moderada al ácido fuerte.

El material Nicotronic 50, XM-19 se descartó debido a su alto costo. Finalmente se decidió utilizar AISI 304L debido a que cumple con los requerimientos del IC, tiene un menor costo comparado con el AISI316 y su conductividad térmica es similar a los otros aceros inoxidables mostrados.

### 3.5. Análisis económico

Este análisis incluye los costos de construcción, operación y mantenimiento de la poza, y del sistema de extracción. Además de los ingresos posibles de esta planta.

#### 3.5.1. Costos e ingresos

En primer lugar, se muestran los costos de inversión, operación y mantenimiento del proyecto. Los costos de construcción de la poza se obtuvieron a partir de valores dados en publicaciones de pozas anteriormente construidas.

##### 3.5.1.1. Costos de inversión, operación y mantenimiento

A continuación se muestran los costos de inversión. Esta incluye la excavación de la poza, su revestimiento, el agua y la sal necesaria para su llenado, las bombas utilizadas y el intercambiador de calor para suministrar el calor.

En cuanto a la excavación de la poza se tiene un precio de 2,2 USD/m<sup>3</sup> [23], considerando el valor del dólar en \$600, se tiene un precio de 1.320 \$/m<sup>3</sup>. Este costo incluye tanto la maquinaria necesaria para realizar la excavación, como el personal necesario para ésta.

El costo del revestimiento utilizado es de 8 USD/m<sup>2</sup> [23], lo que equivale a 4.800 \$/m<sup>2</sup>. Consiste en 2 capas de arcilla compactada con una membrana plástica entremedio, en este caso, polietileno de baja densidad.

El agua y sal total necesaria para la poza se calculó según el porcentaje de sal presente en cada zona mediante las siguientes ecuaciones.

$$V_{zona} = \frac{1}{\rho_{agua}} C_{agua} M_{total} + \frac{1}{\rho_{sal}} C_{sal} M_{total} \quad (69)$$

$$M_{total} = \frac{V_{zona}}{\frac{C_{agua}}{\rho_{agua}} + \frac{C_{sal}}{\rho_{sal}}} \quad (70)$$

$$M_{agua} = C_{agua} M_{total} \quad (71)$$

$$M_{sal} = C_{sal} M_{total} \quad (72)$$

Donde  $V_{zona}$  [m<sup>3</sup>] es el volumen de la zona,  $\rho_{agua}$  [kg/m<sup>3</sup>] y  $\rho_{sal}$  [kg/m<sup>3</sup>] es la densidad del agua y sal respectivamente,  $C_{agua}$  y  $C_{sal}$  es el porcentaje de agua y sal respectivamente que tiene la zona, este valor varía entre 0 y 1,  $M_{total}$  [kg],  $M_{agua}$  [kg] y  $M_{sal}$  [kg] es la masa total, de agua y de sal de la zona respectivamente.

Para el caso de la NCZ se realizó este proceso de cálculo para varias capas de pequeño espesor, análogamente como se calcula la temperatura en esta zona.

El precio de la sal utilizado es de 40 USD/ton [24], equivalente a 24.000 \$/ton. El precio final se calculó utilizando la masa de sal total de la poza calculada mediante las ecuaciones anteriores.

Para el caso del agua, se tiene un precio de 339 \$/ton [26]. También se calculó utilizando la masa total de agua de la poza calculada.

El intercambiador de calor tiene un precio de \$15.333.840 para un flujo de 18 kg/s, el cual fue cotizado en empresas del mercado chileno del rubro. Este precio es para el caso de mayor tamaño de la poza, el cual implica los flujos máxicos máxicos.

En el caso de las bombas, se contemplan 4 unidades. El precio por unidad es de \$1.428.480, también cotizada en empresa. Este costo también es para el caso de mayor tamaño de poza, por lo tanto, para los mayores flujos máxicos.



El financiamiento del proyecto se supuso dado por un préstamo que cubre un porcentaje de la inversión. Se asume el préstamo a cuota constante con una tasa de interés dependiente de la inversión implicada en el proyecto. La cuota  $C$  a pagar se calculó mediante la siguiente ecuación, donde  $VP$  es el valor presente del dinero, el cual en este caso sería la inversión que es la que se financia con el préstamo,  $r$  es la tasa de interés y  $t$  el período de tiempo.

$$C = VP \frac{r(1+r)^t}{(1+r)^t - 1} \quad (73)$$

En cuanto a los costos de operación y mantenimiento se incluyeron los costos por reposición de agua y sal, por la clarificación de la poza, por la energía eléctrica utilizada en la operación y por los sueldos del personal.

Para la reposición de la sal, se supuso que anualmente se debe inyectar  $18,86 \text{ kg/m}^2$  [27].

En el caso del agua, la cantidad necesaria a reponer anualmente se calculó utilizando el programa Matlab. Este último entrega el valor del calor perdido debido a la evaporación del agua de la poza. A partir de éste, se obtuvo la energía perdida por evaporación total en el período de un año. Mediante este valor se calculó la masa perdida de agua mediante la siguiente ecuación.

$$M_{aguaev} = \frac{Q_{ev}}{\lambda_{agua}} \quad (74)$$

Donde  $M_{aguaev} [kg]$  es la masa de agua evaporada en un año,  $Q_{ev} [J]$  la energía perdida por evaporación para un año y  $\lambda_{agua} [J/kg]$  es el calor latente del agua.

La clarificación de la poza se refiere a la limpieza de partículas o sustancias que se generan dentro de ella o llegan desde el exterior luego de un tiempo, lo que provoca una disminución en la transparencia del agua, lo que genera una menor eficiencia de la poza. El costo anual de este proceso es de 2.000 USD [22] para una poza de superficie de  $22.500 \text{ m}^2$ , el cual consiste en añadir sulfato de cobre e hipoclorito de calcio al fluido de la poza.

En cuanto a la energía eléctrica, se supuso un uso de 150 kW para el sistema [24], lo que implica 1.314.000 kWh al año. El costo de la energía se obtuvo mediante el promedio anual del costo marginal de energía del sistema interconectado del norte grande, el cual para el año 2014 es de 43,49 \$/kWh. Además, se asumió un aumento progresivo del precio de la energía del 1% anual [28].

Para el caso del personal, se supuso un ingeniero, con un sueldo de \$3.000.000, 1 encargado de mantención, con un sueldo de \$1.000.000, 2 técnicos con sueldo de \$600.000 y 6 operarios en total con un sueldo de \$600.000 cada uno.

Además de lo anterior, se deben agregar los costos por el funcionamiento del sistema de respaldo para los períodos en que no se es posible llevar a la temperatura necesaria al electrolito sólo mediante la poza solar. Para calcular la potencia faltante al sistema de pozas solares se utilizó el programa Matlab, en éste se obtuvo la energía total que hizo falta para un año completo. El sistema de respaldo escogido es un sistema de calderas, las cuales se supone que utilizan gas licuado de petróleo (GLP), con un precio de 480

\$/L. El poder calorífico del GLP ( $PC_{GLP}$ ) es de 7,17 kWh/L, por lo tanto, los litros necesarios de GLP a utilizar ( $L_{GLP}$  [L]) a partir de la energía faltante del sistema de pozas ( $Q_{faltado}$  [kWh]) son:

$$L_{GLP} = \frac{Q_{faltado}}{PC_{GLP}} \quad (75)$$

Luego, mediante los litros necesarios de GLP anualmente y el precio de éste por litro se puede obtener el costo anual del sistema de respaldo.

### 3.5.1.2. Ingresos

Ahora, se analizan los ingresos posibles de la poza solar.

En el primer año, se tiene una extracción que comienza luego de 1,5 meses del comienzo del año, a diferencia del resto de los otros, los cuales tienen una extracción desde el inicio hasta el final de éstos.

Se supuso un valor de venta de energía de 68.000 \$/MWh, el cual coincide con el costo del GLP por energía.

En primer lugar, se obtuvo mediante el programa Matlab la energía entregada al proceso de electrolito desde la poza solar para un año completo. Existen períodos en los que la energía suministrada por parte de la poza al electrolito excede la energía necesaria, por lo que el electrolito llega a temperaturas mayores de 55°C. Estos excesos de energía no se toman en cuenta en la venta de ésta, es decir, para los períodos en que se tiene un exceso de energía, se vende sólo hasta la necesaria para que el electrolito llegue a los 55°C.

Por otra parte, para los períodos en que no se alcanza la energía necesaria para llevar el electrolito a los 55°C, se suministra una parte de esta energía. Esta última si se toma en cuenta en la venta de energía debido a que ayuda a subir la temperatura del electrolito, aunque no sea hasta los 55°C. El resto de la energía necesaria se incluye como un costo del sistema de respaldo.

Luego, mediante el valor de la energía suministrada anualmente y el precio de la energía se puede obtener los ingresos anuales obtenidos.

### 3.5.2. Indicadores económicos

En esta sección se analiza los indicadores económicos a calcular para estudiar la factibilidad económica del proyecto.

Se utilizaron dos indicadores distintos, el VAN y la TIR, los cuales se detallan a continuación.

El VAN calcula el valor actual de todos los flujos del proyecto. Se define como:

$$VAN = \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1 + r_t)^t} \quad (76)$$

Donde  $C_t$  es el valor del flujo en el período  $t$  y  $r_t$  es la tasa de descuento del período  $t$ . Esta última se supuso constante para el largo del proyecto y de un valor de  $r_t = 0,1$ , el cual es utilizado para proyectos de energías renovables.

Si es que el VAN es mayor a 0, quiere decir que el proyecto es rentable.

La TIR busca la tasa de descuento a la cual el VAN se hace 0, es decir, la tasa de descuento máxima para la cual el proyecto se hace rentable. Se calculó mediante la herramienta “Solver” de Excel, la cual busca la tasa de descuento para la cual VAN=0, tomando en cuenta el flujo de caja.

Además, se calculó el valor de construcción de la poza por m<sup>2</sup> para realizar una comparación con otras pozas existentes. También se calculó el costo de producir 1 MWh térmico mediante el sistema de pozas solares.

## 4. Resultados y discusión

### 4.1. Radiación diaria

En primer lugar, se muestra en la Figura 4.1 la distribución de la radiación solar incidente durante el año 2010. Ésta es la fuente principal de energía de la poza solar.

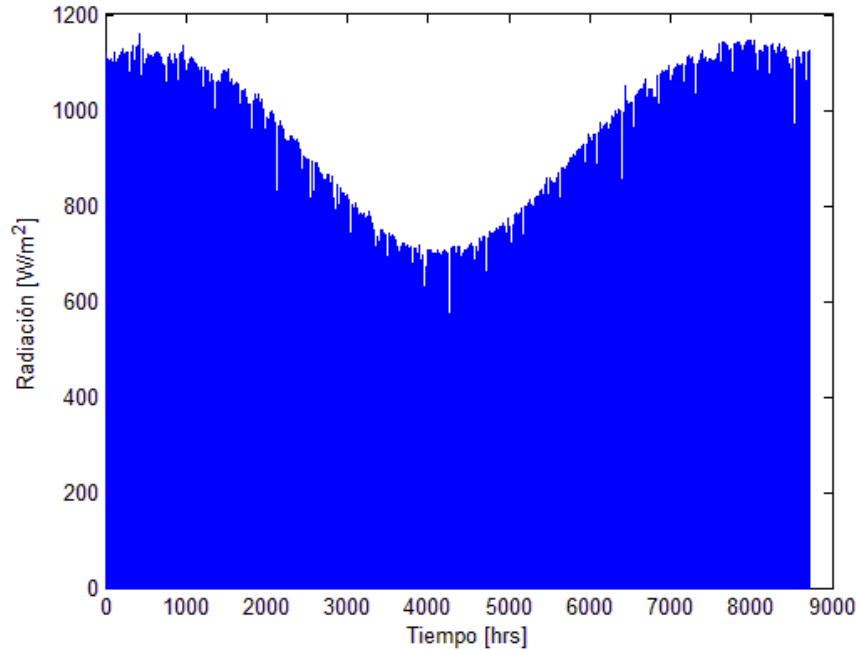


Figura 4.1: Radiación incidente en función del tiempo para el año 2010

### 4.2. Evolución y perfil de temperatura en la UCZ, NCZ y LCZ

En primer lugar, se muestran los resultados obtenidos para el modelo con las siguientes dimensiones de la poza y de sus zonas sin extracción de calor.

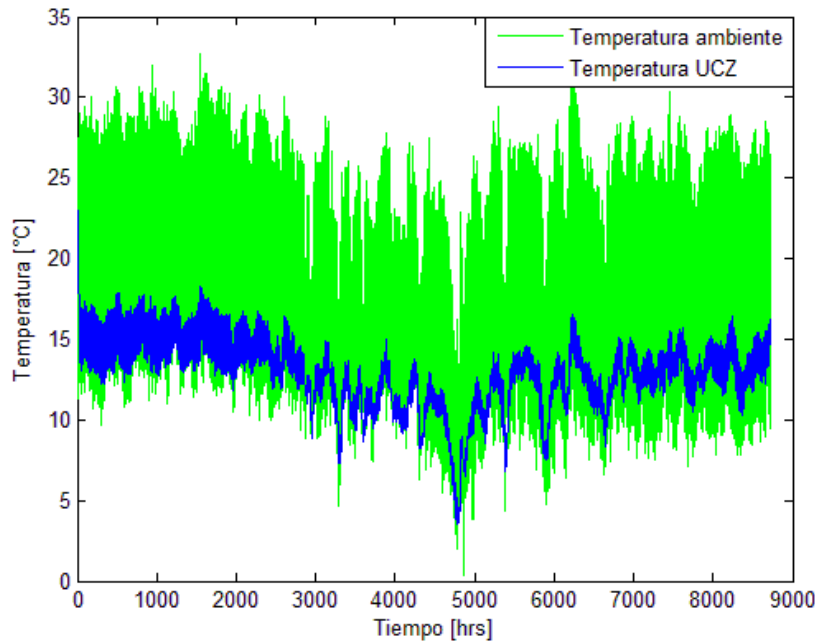
- Ancho poza:  $a_p = 50 \text{ m}$
- Largo poza:  $l_p = 50 \text{ m}$
- Área superficial  $A = 2500 \text{ m}^2$
- Profundidad poza:  $p_p = 3,1 \text{ m}$
- Espesor UCZ:  $e_{UCZ} = 0,7 \text{ m}$
- Espesor NCZ:  $e_{NCZ} = 1,1 \text{ m}$
- Espesor LCZ:  $e_{LCZ} = 1,3 \text{ m}$
- Paso del tiempo:  $\Delta t = 1 \text{ hr}$
- Tiempo de estudio:  $8.721 \text{ hrs}$  (1 año aprox., año 2010)
- NCZ dividida en 22 capas, lo que implica,  $d_i = 0,06 \text{ m}$
- Concentración salina UCZ:  $S_{UCZ} = 0\%$
- Concentración salina LCZ:  $S_{LCZ} = 25\%$

- Concentración salina NCZ: Varía por cada capa. Aumenta en un 1,1% para cada capa, comenzando con un 1,1% para la capa 1. Esto se debe a que se desea un aumento lineal entre la concentración de la UCZ y de la LCZ.
- Temperatura inicial:  $T_0 = 24^{\circ}C$ . Se aplica esta condición inicial a cada zona de la poza. Esta temperatura es igual a la temperatura ambiente del instante inicial.

Antes de mostrar los resultados de temperatura obtenidos en cada zona se muestran los porcentajes de radiación absorbida en cada una de éstas para un caso específico de tiempo.

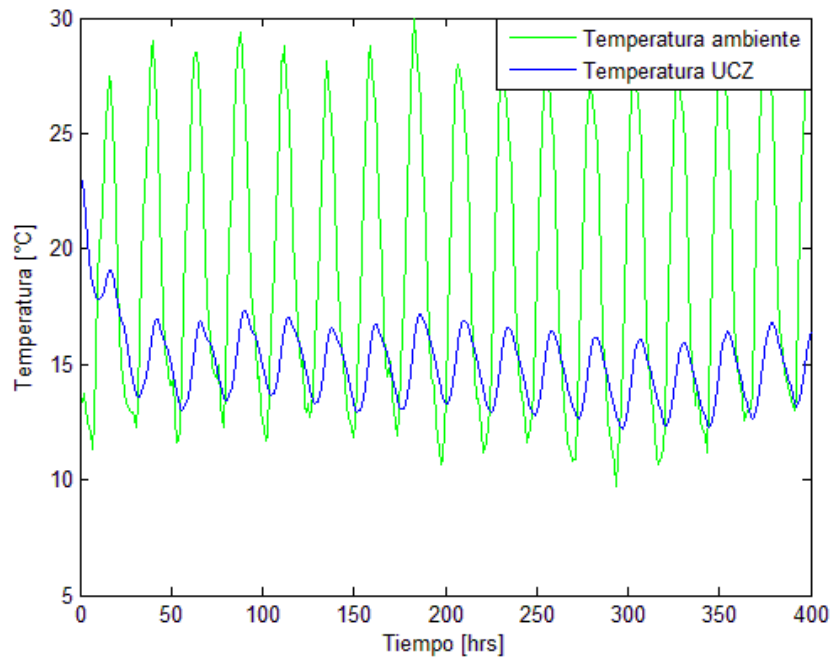
Para una poza con las características mencionadas anteriormente y para un tiempo de 8721 hrs, lo cual corresponde a aproximadamente un año se tiene una absorción del 31,6% de la radiación incidente en la UCZ, donde un 22,4% de ésta corresponde a la longitud de onda larga, la cual es absorbida en el primer centímetro de la poza, por lo tanto, un 9,2% es absorbido en el volumen de la UCZ sin contar la de longitud de onda larga. La NCZ absorbe un 8,9% de la radiación incidente. En la LCZ se absorbe en total un 28,5% de la radiación incidente, sin embargo, de este porcentaje un 25% es absorbido por el fondo de la poza y transferido al fluido y un 3,4% es absorbido por el fluido en el volumen de la LCZ directamente. En total, se obtuvo una absorción de un 69% de la radiación incidente en el volumen completo de la poza.

En cuanto a las temperaturas obtenidas en las diversas zonas, en primer lugar se muestra la variación de la temperatura en la UCZ y de la temperatura ambiente en función del tiempo, éste gráfico se puede ver en la Figura 4.2.



**Figura 4.2: Evolución de la temperatura en UCZ en función del tiempo para los datos del año 2010**

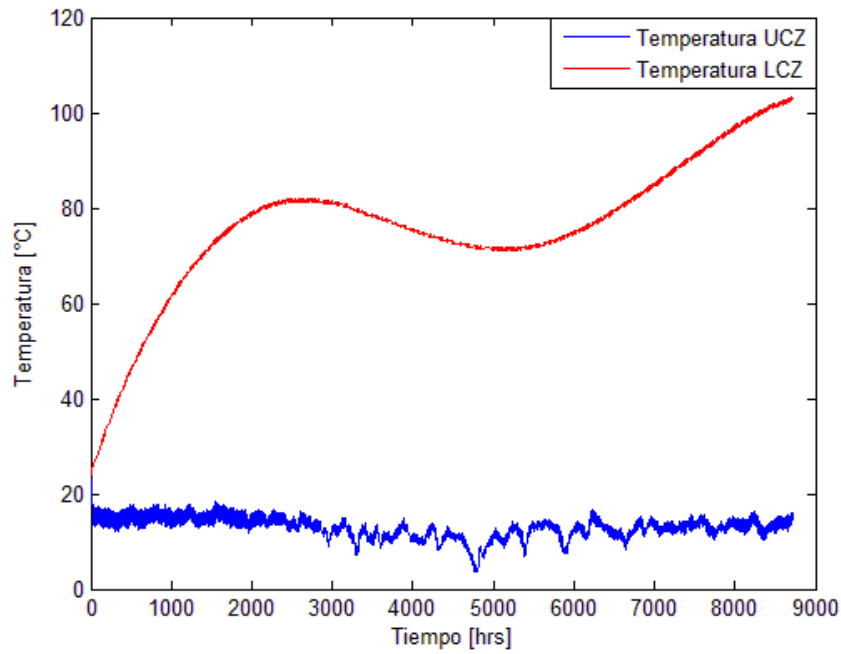
En la Figura 4.3 se muestra la temperatura de la UCZ en función del tiempo para el primer mes del año estudiado.



**Figura 4.3: Evolución de la temperatura en la UCZ en función del tiempo para el primer mes del año 2010**

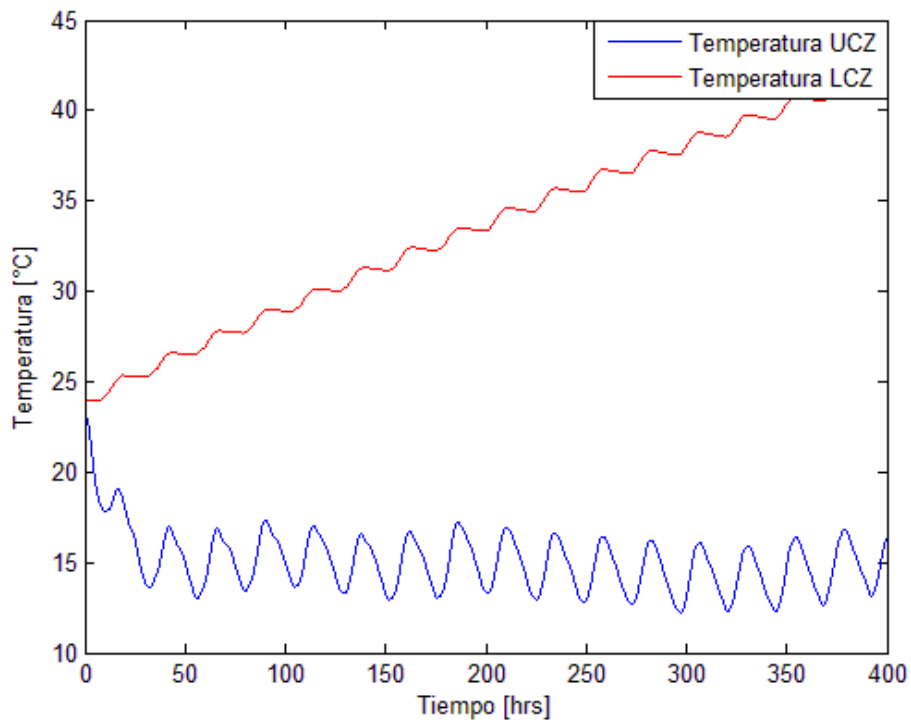
Al comparar la temperatura de la UCZ con la temperatura ambiente se puede ver que la de esta zona sigue el comportamiento de la ambiente, sin embargo, las fluctuaciones en la UCZ se presentan más amortiguadas que las de la temperatura ambiental. Esto indica que la poza posee un buen comportamiento en esta zona ya que logra reducir las fluctuaciones de temperatura en ésta.

Por otra parte, la Figura 4.4 muestra la evolución de la temperatura obtenida para la UCZ y LCZ a lo largo del año 2010. La temperatura a finales de este año obtenida para este caso es de 103°C.



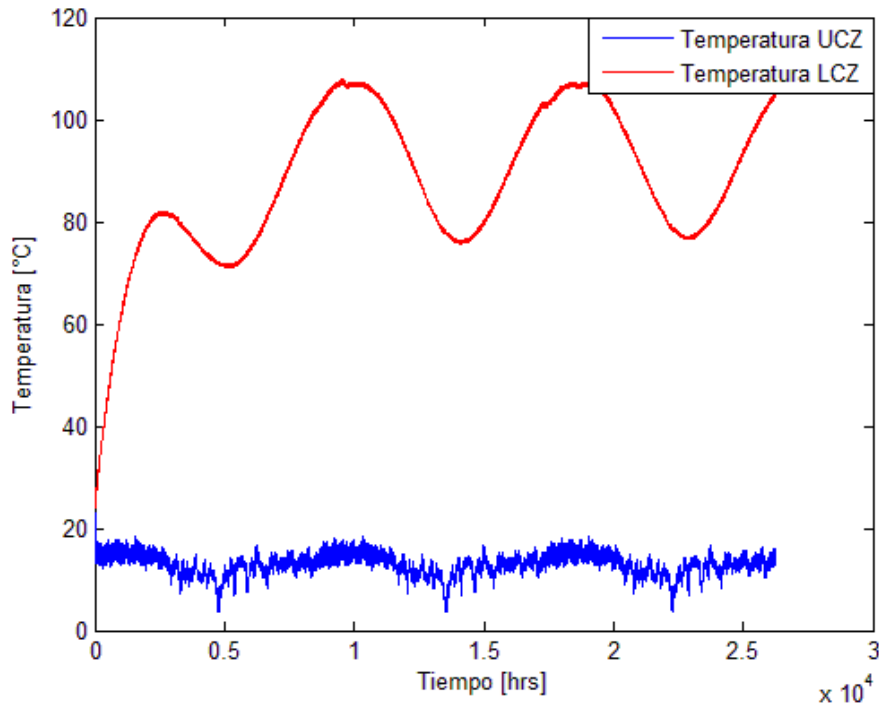
**Figura 4.4:** Evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ en función del tiempo para los datos del año 2010

La Figura 4.5 muestra la evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ para el primer mes del año 2010.



**Figura 4.5:** Evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ en función del tiempo para el primer mes del año 2010

Además, se realizó el estudio para un período de 3 años para poder analizar el comportamiento de la temperatura sin el efecto de las condiciones iniciales. Debido a que no se tenían los datos de temperatura ambiental y velocidad del viento para el período de 3 años pero sí de radiación, se utilizaron los datos del 2010 para cada año de temperatura y viento, pero los datos de radiación del año 2010, 2011 y 2012. Además, al utilizar sólo los datos del 2010 se puede apreciar mejor el efecto que genera las condiciones iniciales en la variación de la temperatura en la LCZ y la curva que adopta al estabilizarse. El gráfico obtenido para la temperatura de la LCZ se muestra en la Figura 4.6.



**Figura 4.6:** Evolución de la temperatura en la UCZ y LCZ en función del tiempo para un período de 3 años, utilizando los datos del 2010 para cada año

En cuanto a la temperatura en la LCZ, en un comienzo existe un aumento grande de ésta debido a que la temperatura inicial de la zona es bastante baja en comparación a la que puede alcanzar, de hecho, se puede notar que para el primer año, aún en invierno, la zona presenta pequeñas bajas de temperatura. Sin embargo, luego de un tiempo, un año aproximadamente en este caso, comienza a estabilizarse la temperatura en la zona, presentado fluctuaciones no muy grandes debido a las estaciones del año. Este último comportamiento es el que se espera en una poza solar, que la zona inferior logre mantener la temperatura con una amplitud de variación baja y, por lo tanto, presente fluctuaciones pequeñas ante las condiciones climáticas y de radiación durante el año.

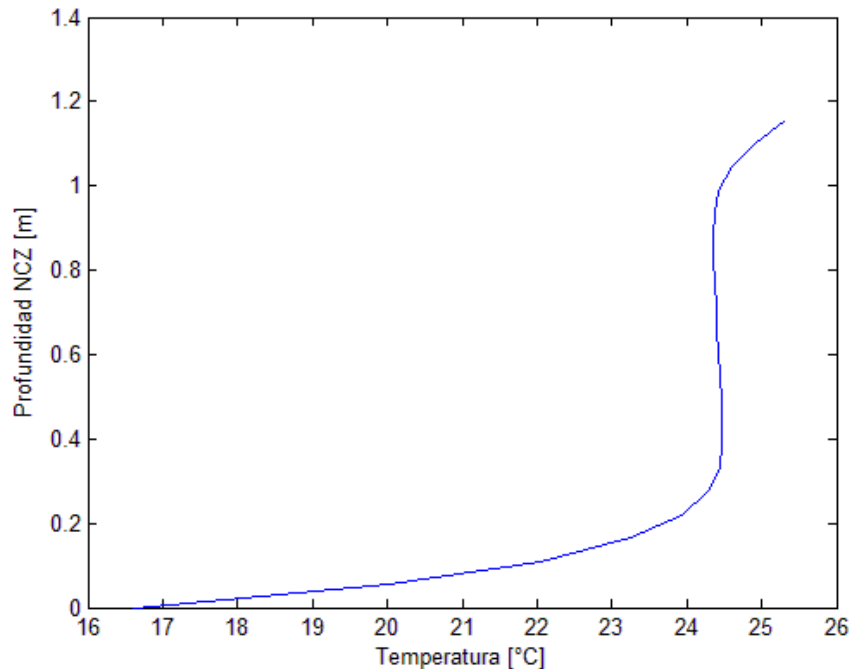
Según este estudio, la poza tiene un tiempo de establecimiento térmico de unas 10000 horas, equivalente aproximadamente a 14 meses. Luego, sigue un periodo estable de variación estacional de la temperatura de la LCZ en donde se tiene una temperatura y variación promedio de 92°C y 31°C respectivamente, con una máxima de 107°C y una mínima de 76°C. Es importante notar que la temperatura máxima excede el punto de ebullición del agua pura, sin embargo, se encuentra por debajo del punto de ebullición de una



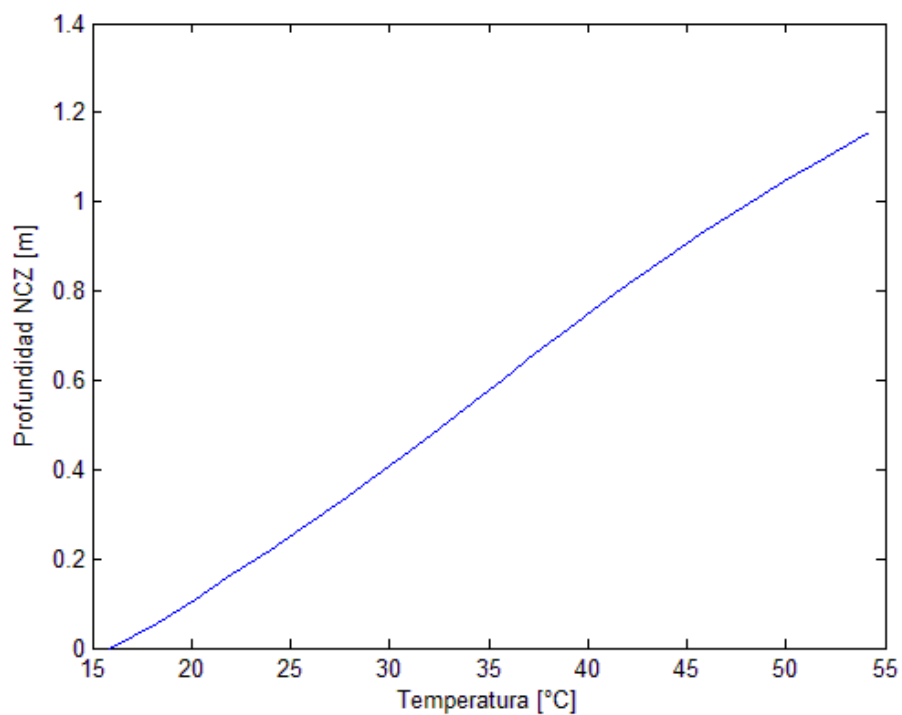
solución salina saturada el cual es de  $109^{\circ}\text{C}$  [18], que es el caso utilizado. Sin embargo, estos datos son para un supuesto de 3 años con iguales condiciones climáticas, lo cual es irreal, por lo que se tendría una mayor variación probablemente para condiciones reales.

Por otra parte, al observar el comportamiento de la temperatura en la LCZ a corto plazo, se puede ver que ésta presenta variaciones bastante bajas, lo que demuestra que los cambios climáticos a corto plazo, como puede ser la nubosidad, cambios de radiosidad por hora o la nula radiación en las noches no afecta de manera significativa a la temperatura de esta zona. En este caso se tiene una variación de temperatura entre el día y la noche mínima de  $0,56^{\circ}\text{C}$  en invierno y una máxima de  $0,74^{\circ}\text{C}$  en verano. Esto último también indica una buena predicción por parte del modelo debido a que el propósito de la LCZ es que logre mantener la temperatura en la misma zona ante cambios ambientales.

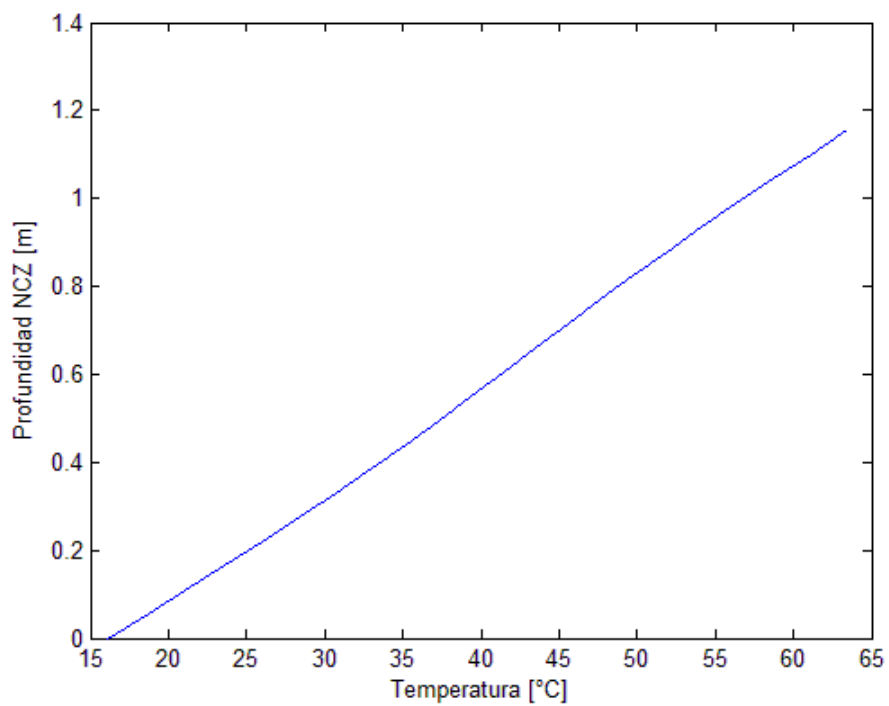
Para analizar el gradiente de temperatura generado en la NCZ, se graficó la temperatura en función de la profundidad de esta zona para distintos instantes de tiempo. Los gráficos obtenidos se presentan en la Figura 4.7 para el fin del primer día del año, Figura 4.8 para el primer mes, Figura 4.9 luego de 1,5 mes, Figura 4.10 para el tiempo de 1 año y Figura 4.11 luego de 3 años, donde  $z=0$  representa el inicio de la NCZ (límite entre la UCZ y NCZ).



**Figura 4.7:** Temperatura de la NCZ en función de su profundidad para fines del primer día del año 2010



**Figura 4.8:** Temperatura de la NCZ en función de su profundidad para luego de 1 mes en el año 2010



**Figura 4.9:** Temperatura de la NCZ en función de su profundidad luego de 1,5 mes del año 2010

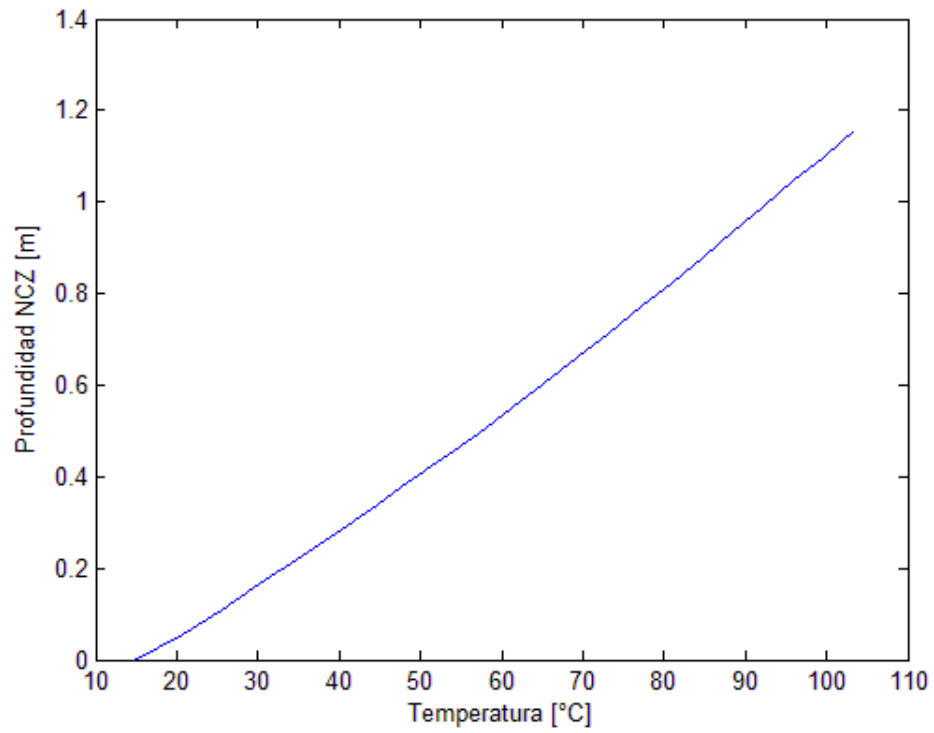


Figura 4.10: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad luego de 1 año del inicio del estudio

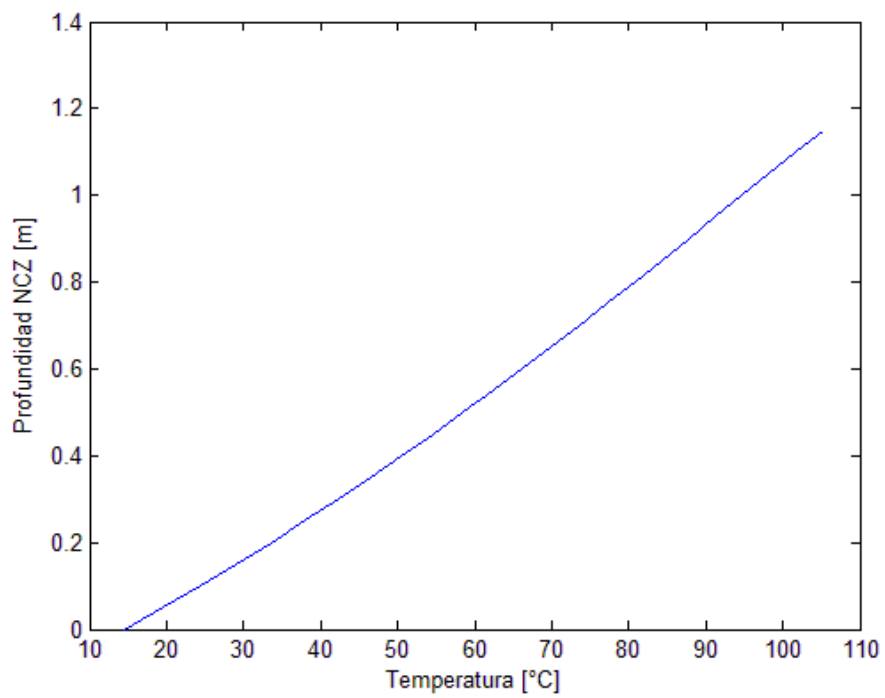
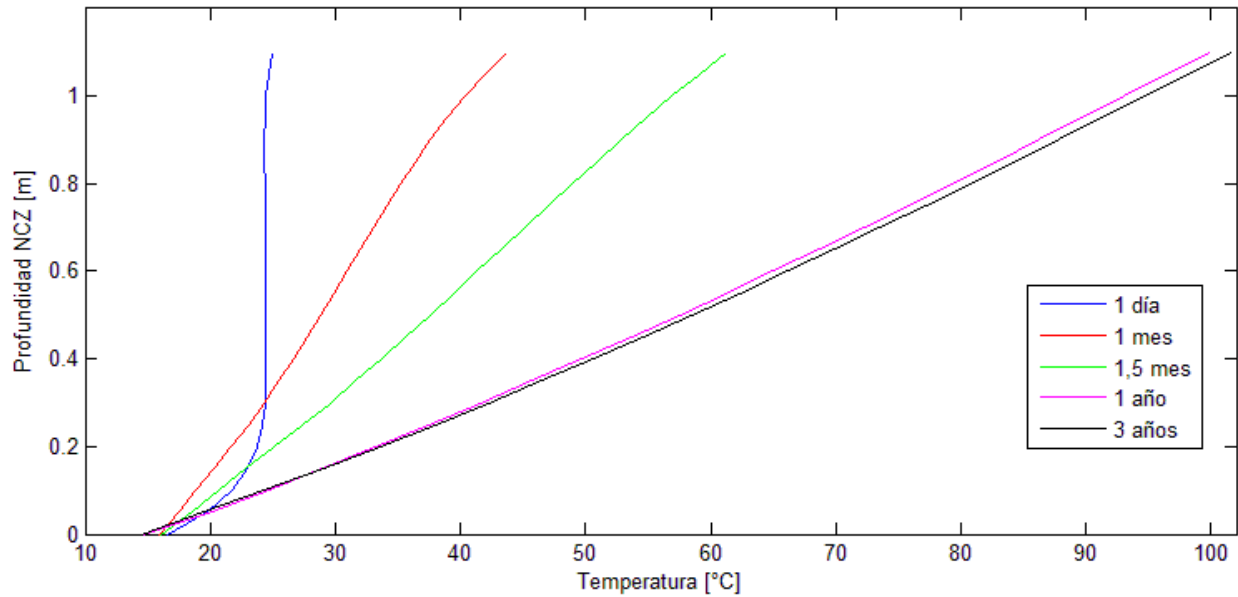


Figura 4.11: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad luego de 3 años del inicio del estudio

En la Figura 4.12 se muestra los perfiles de temperatura de la NCZ mostrados anteriormente en conjunto para una mejor comparación.



**Figura 4.12: Temperatura de la NCZ en función de su profundidad para 1 día, 1 mes, 1,5 mes, 1 año y 3 años**

En cuanto a la NCZ, observando los gráficos de la temperatura en esta zona para diferentes tiempos se puede ver que la temperatura superior de la zona coincide con la de la UCZ, aumentando hasta llegar a la inferior que coincide con la LCZ. Sin embargo, este aumento para los primeros tiempos no es lineal, lo que indica que el gradiente de temperatura no se ha estabilizado por completo debido a que inicialmente se tenía una temperatura uniforme en esta zona. Esto se aprecia en la Figura 4.7, la que muestra el perfil de temperatura a fines del primer día de estudio, en ésta se ve claramente que el gradiente aún se está formando. Se puede ver también que al 1,5 mes aproximadamente ya está cerca del perfil estabilizado y al año el gradiente ya presenta una variación totalmente lineal. Para tiempos mayores, el gradiente de temperatura mantiene este último comportamiento entre la UCZ y la LCZ.

Por otra parte, las pozas solares poseen un límite de temperatura que pueden alcanzar en la LCZ desde una dimensión determinada, para esta última y para mayores dimensiones, la poza se mantiene en este límite máximo de temperatura. En el caso de este estudio, la temperatura máxima de la poza no varía para dimensiones mayores o iguales a los 3000 m<sup>2</sup> aproximadamente.

### 4.3. Extracción de calor

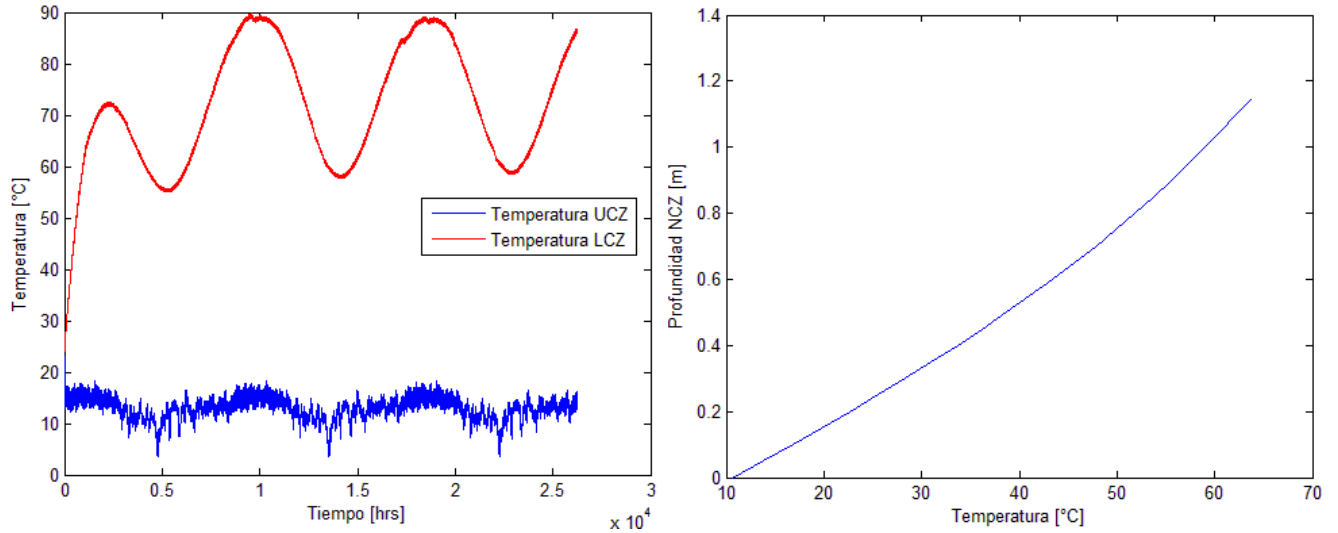
#### 4.3.1. Evolución de temperatura en la LCZ con extracción de calor constante

En esta sección se muestran los resultados de temperatura obtenidos en la LCZ incluyendo una extracción de calor constante (la cual no será la extracción real, dado que ésta variará en función del tiempo, pero permite determinar la magnitud de los calores que se pueden extraer sin desestabilizar la poza) desde esta misma zona para apreciar el comportamiento en ella frente a las variaciones de calor extraído.

En primer lugar, se muestra la evolución de la temperatura en la LCZ y el perfil de temperatura en la NCZ para una poza de 50×50 m<sup>2</sup> para distintos valores de calor extraído. La extracción de calor comienza

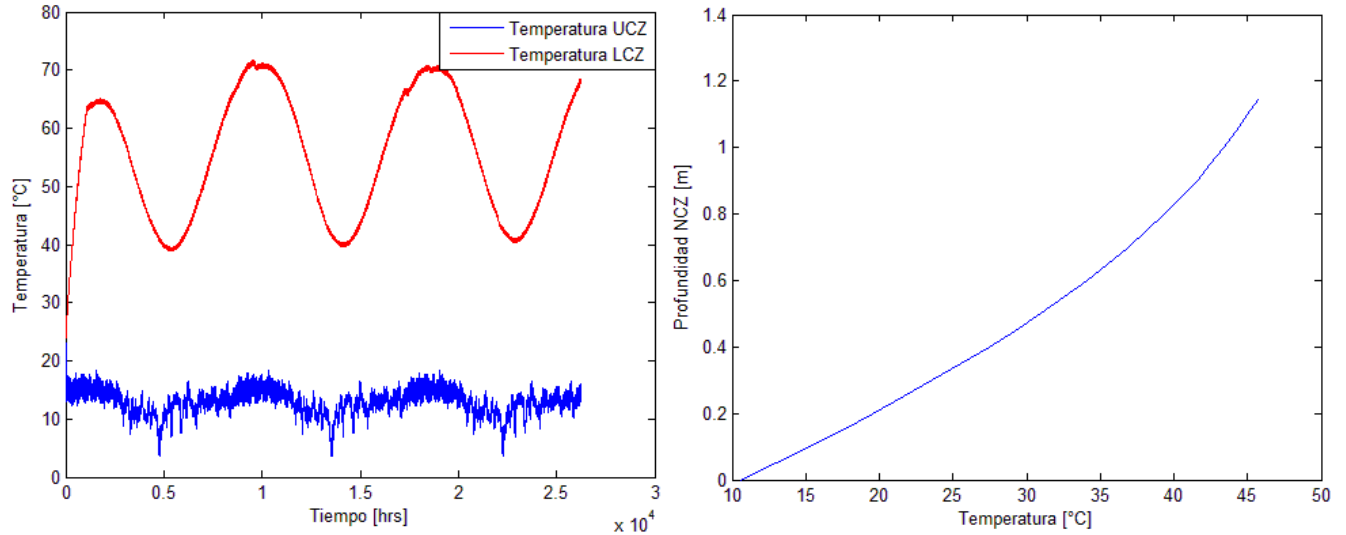
desde las 1080 hrs, lo que equivale a 1,5 meses, debido a que en este tiempo el perfil de temperatura en la NCZ ya está establecido.

En la Figura 4.13 se puede observar la temperatura en función del tiempo para la LCZ, y la temperatura en función de la profundidad de la poza para la NCZ luego de 2,5 años (se muestra el perfil en este instante debido a que aquí se tiene la menor temperatura, por lo tanto, la mayor inestabilidad) para una extracción de 50 kW, con  $\Delta T = 15^\circ C$  y  $\dot{m} = 0,8 \text{ kg/s}$ . Esto entrega una eficiencia de extracción de  $\eta = 0,07$ . En este caso se obtuvo una temperatura máxima de  $90^\circ C$  y una mínima de  $55^\circ C$ .



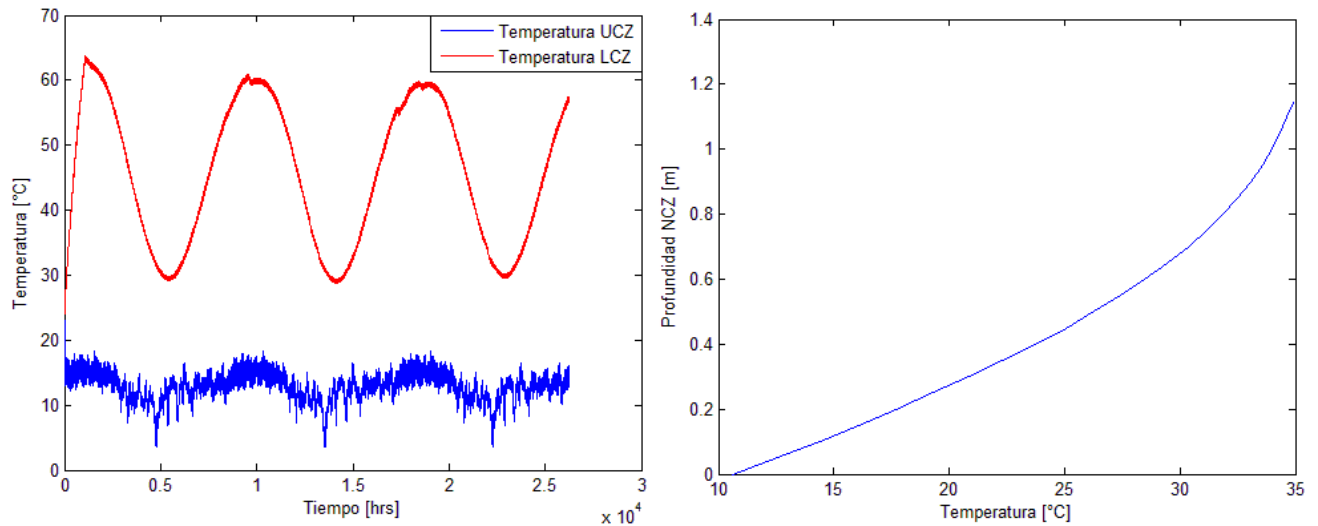
**Figura 4.13: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ para el instante de 2,5 años para una extracción de 50 kW**

La Figura 4.14 muestra la evolución y perfil de temperatura en la LCZ y NCZ respectivamente para una extracción de 100 kW, con  $\Delta T = 15^\circ C$  y  $\dot{m} = 1,6 \text{ kg/s}$ . En este caso se tiene una eficiencia de  $\eta = 0,13$ , una temperatura máxima de  $74^\circ C$  y una mínima de  $40^\circ C$ .



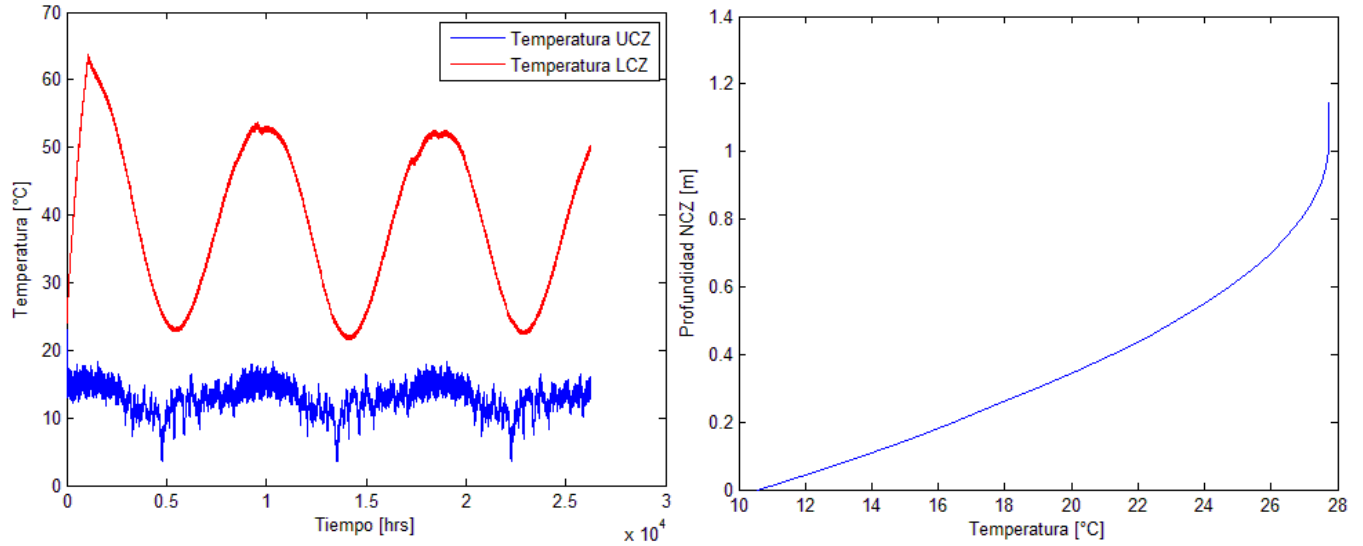
**Figura 4.14: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ para el instante de 2,5 años para una extracción de 100 kW**

En la Figura 4.15 se puede observar la evolución y perfil de temperatura en la LCZ y NCZ respectivamente para una extracción de 130 kW, con  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  y  $\dot{m} = 2,1 \text{ kg/s}$ . Para este caso se tiene una eficiencia de  $\eta = 0,17$ , una temperatura máxima de  $60^\circ\text{C}$ , y una mínima de  $31^\circ\text{C}$ .



**Figura 4.15: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ para el instante de 2,5 años para una extracción de 130 kW**

En la Figura 4.16 se observa la evolución y perfil de temperatura en la LCZ y NCZ respectivamente para una extracción de 150 kW, con  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  y  $\dot{m} = 2,4 \text{ kg/s}$ . Para este caso se tiene una eficiencia de  $\eta = 0,20$ , una temperatura máxima de  $63^\circ\text{C}$ , sin embargo ésta se tiene antes de comenzar a extraer calor, luego se llega a temperaturas máximas de  $54^\circ\text{C}$  y una mínima de  $24^\circ\text{C}$ .



**Figura 4.16: Temperatura en función del tiempo para la LCZ y en función de Z para la NCZ para el instante de 2,5 años para una extracción de 150 kW**

Como se puede ver en la Figura 4.13, para una extracción de 50 kW el perfil de temperatura en la NCZ mantiene el perfil lineal. En cambio, para el caso de la extracción de 100 kW se puede ver que el perfil comienza a perder su linealidad. Ahora, para la extracción de 150 kW se puede ver que la NCZ perdió totalmente el perfil lineal lo que genera una desestabilización en el gradiente de temperatura. En este caso, se tiene que el límite de extracción de calor (sin que se desestabilice el perfil de temperatura) es de 110 kW aproximadamente. Por otra parte, se puede ver que a mayor extracción de calor, la temperatura del fluido en la LCZ disminuye. Esto último es relevante debido a que el proceso al cual se le suministra calor tiene una temperatura mínima para operar, por lo que, la temperatura del fluido en la LCZ no puede ser menor a éste, lo cual es un limitante a la cantidad máxima de calor extraíble desde la poza.

#### **4.3.2. Extracción de calor para distintos tamaños de poza**

Se estudiaron distintas dimensiones para la poza con diferentes valores de calor extraído. En esta sección se analizará los resultados de temperatura obtenida en la LCZ para estos casos. Los tamaños utilizados de las pozas se suponen de base cuadrada.

Se realizó el estudio para 4 pozas de distinto tamaño, una de  $50 \times 50 \text{ m}^2$ , otra de  $70 \times 70 \text{ m}^2$ , de  $100 \times 100 \text{ m}^2$  y de  $150 \times 150 \text{ m}^2$ . Para cada una de éstas se analizó dos valores de extracción de calor distintos, los cuales permitieran tener un perfil lineal en la NCZ para no desestabilizar la poza solar. Además, se utilizaron valores de calor máximos que permitieran tener la temperatura mínima necesaria para la temperatura de salida del electrolito.

Por otra parte, en esta sección se incluye en el análisis las variables del electrolito (fluido de proceso), las cuales son temperatura de entrada, temperatura de salida y flujo másico. Estas 3 variables se toman constantes a lo largo del tiempo debido a que se asume una demanda constante continua las 24 horas del día. Para cumplir esta demanda se varía el flujo másico del fluido proveniente de la poza según las variaciones de temperatura de este mismo a lo largo del tiempo.

La temperatura a la que se debe llevar el electrolito es de 55°C, la temperatura de entrada de este fluido es de 45°C y su flujo másico varía dependiendo del calor que se extrae desde la poza para suministrarle calor a este fluido.

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos para los distintos tamaños de poza y diferentes valores de calor extraído. Se buscó las temperaturas máximas y mínimas a lo largo del tiempo, estos valores se tomaron luego de que se comienza a extraer calor. El flujo másico del fluido de la poza se calcula para un  $\Delta T = 15^\circ C$ , entre la temperatura de salida ( $T_{LCZ}$ ) y la temperatura de retorno ( $T_{retorno}$ ), y el calor respectivo.

**Tabla 4.1: Temperaturas del fluido proveniente de la poza para distintos tamaños de pozas y valores de calor extraído**

	Dimensiones superficie poza [m <sup>2</sup> ]							
	50×50		70×70		100×100		150×150	
$Q_{ext}$ [kW]	35	45	80	95	170	200	440	500
$T_{max}$ [°C]	100	96	100	96	100	97	98	96
$T_{min}$ [°C]	64	60	63	60	63	60	62	60
$\dot{m}$ [kg/s]	0,56	0,72	1,28	1,52	2,71	3,19	7,02	7,97
$\dot{m}_e$ [kg/s]	0,99	1,27	2,27	2,69	4,82	5,67	12,47	14,16
$\eta$	0,046	0,059	0,054	0,064	0,056	0,066	0,064	0,073

Generalmente, la eficiencia de las pozas solares se encuentra en un rango entre un 10 y un 30%, sin embargo, en los casos mostrados en la Tabla 4.1 se presenta una eficiencia menor al 10%. Esto se debe a que en estas pozas se podría extraer más calor sin que se desestabilice el gradiente, sin embargo, la temperatura disminuiría bajo el límite necesario para suministrar calor a la temperatura necesaria del electrolito.

Por otra parte, se puede ver que los casos presentados entregan temperaturas similares para las distintas dimensiones de la poza, con máximas de alrededor de los 100°C y mínimas de 60°C aproximadamente.

En cuanto al flujo másico del fluido de la poza, dependiendo de las dimensiones, va entre los 0,8 kg/s a los 9,09 kg/s. Considerando que la LCZ tiene un volumen de 3.250.000 L para la poza de 50×50 m<sup>2</sup> y de 29.250.000 L para el caso de 150×150 m<sup>2</sup>, el flujo másico extraído no es muy grande.

Además, se muestran los resultados para las mismas condiciones utilizadas para la Tabla 4.1 pero para valores de extracción de calor que no necesariamente cumplan con las temperaturas mínimas necesarias para la electro-obtención. Estos resultados se muestran en la Tabla 4.2. Debido a que en ciertos períodos de tiempo se tienen temperaturas menores a los 60°C, en estos mismos períodos no sería posible la entrega de calor para llevar al electrolito a su temperatura necesaria, es por esto que en la tabla se agrega el porcentaje de tiempo en que esto sucede, es decir, el porcentaje de tiempo total del funcionamiento de la poza en que ésta no logra tener la temperatura necesaria para el electrolito (tiempo sin extracción: tse).



Tabla 4.2: Temperaturas del fluido proveniente de la poza para distintos tamaños de pozas y valores de calor extraído

	Dimensiones superficie poza [m <sup>2</sup> ]							
	50×50		70×70		100×100		150×150	
$Q_{ext}$ [kW]	80	100	150	180	310	360	690	820
$T_{max}$ [°C]	82	74	85	79	86	81	87	81
$T_{min}$ [°C]	49	41	50	45	50	46	52	46
$\dot{m}$ [kg/s]	1,27	1,59	2,39	2,87	4,94	5,70	11,00	13,08
$\dot{m}_e$ [kg/s]	2,27	2,83	4,25	5,10	8,78	10,20	19,55	23,23
$tse$ [%]	30	43	27	34	27	33	23	35
$\eta$	0,105	0,131	0,100	0,120	0,102	0,118	0,100	0,119

Mediante la Tabla 4.2 se puede ver, en primer lugar, que los calores admisibles a extraer son mucho mayores que los mostrados en la Tabla 4.1. Debido a esto mismo, los valores de eficiencia de la poza también son mayores, todos sobre un 10%, lo cual está dentro del rango común de eficiencia para las pozas solares. Por otra parte, también se puede ver que los caudales del fluido de electrolito a calentar son bastante mayores a los anteriores, sin embargo, se tiene un porcentaje de tiempo en el que no se le puede suministrar el calor total necesario debido a la temperatura de la poza. Este tiempo para las dimensiones y calores utilizados varía entre el 20 y 40% del tiempo total, lo que, para un período de 3 años de estudio de la poza, equivale a aproximadamente entre 6 y 12 meses, los cuales equivalen a la época de invierno para los distintos años.

Debido a la baja eficiencia que se tiene para la poza al obtener temperaturas que permitan llevar al electrolito a la temperatura necesaria durante todo el año, se decidió utilizar una extracción de calor que no necesariamente suministrara el calor total necesario durante el año completo, si no que hayan períodos en que se complemente el suministro de calor mediante otro sistema, como por ejemplo, calderas.

#### 4.3.3. Extracción de calor variable en el tiempo

A diferencia de las secciones anteriores, acá se ve la extracción real de calor de la poza debido a que ésta varía en el tiempo para este caso. Esto se debe a que se debe elegir un flujo másico constante para cada fluido debido al IC, y un área constante para este mismo.

Para esto, se diseñó el IC, según la metodología mostrada en la sección 3.4.1.1., para parámetros de temperatura y flujo másico determinados para obtener un área preliminar ( $A_{pr}$ ) y el coeficiente global de transferencia (U) a utilizar. Para este cálculo se utilizó la temperatura promedio de la LCZ para los 3 años, una temperatura de retorno de 15°C bajo el promedio mencionado anteriormente, la temperatura de entrada del electrolito de 45°C y los flujos másicos de cada fluido, los cuales dependen de cada poza de distinta dimensión ya que se puede extraer una cantidad diferente de calor en cada una de ellas.

A continuación se muestran los resultados de calor extraído y temperatura final del electrolito en función del tiempo para diferentes flujos másicos de los fluidos y área del IC para distintas dimensiones de pozas para un período de estudio de 3 años.

##### 4.3.3.1. Poza de 150×150 m<sup>2</sup>

Para este caso se supone un flujo del electrolito de  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$  constante, lo que implica que este fluido requiere 635 kW para llegar a la temperatura de 55°C.

Para obtener  $A_{pr}$  y  $U$  se utilizó una temperatura de entrada al IC del fluido de la poza de  $T_{LCZ} = 70^{\circ}C$  y un flujo másico de este fluido de  $\dot{m} = 18 \text{ kg/s}$ . Como se dijo anteriormente, la temperatura de retorno a la poza es  $15^{\circ}C$  menos que  $T_{LCZ}$ , por lo que,  $T_{retorno} = 55^{\circ}C$  y la temperatura de entrada al IC del electrolito de  $T_{ein} = 45^{\circ}C$ . Con estos valores se obtiene finalmente un área preliminar de  $A_{pr} = 92 \text{ m}^2$  y  $U=1500 \text{ W/m}^2K$ .

A continuación se presentan distintos casos de flujo másico.

4.3.3.1.1. Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 16 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 42 \text{ m}^2$

En las siguientes figuras se muestran los resultados obtenidos de la temperatura de la LCZ, de retorno y del electrolito en función del tiempo, y también el calor extraído desde la poza en función del tiempo para el caso dado.

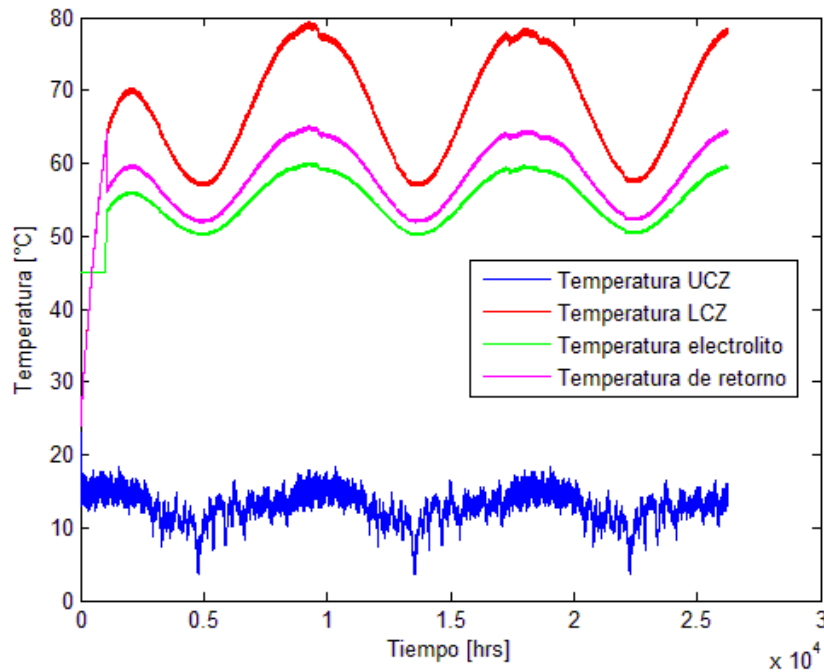


Figura 4.17: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 16 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 42 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

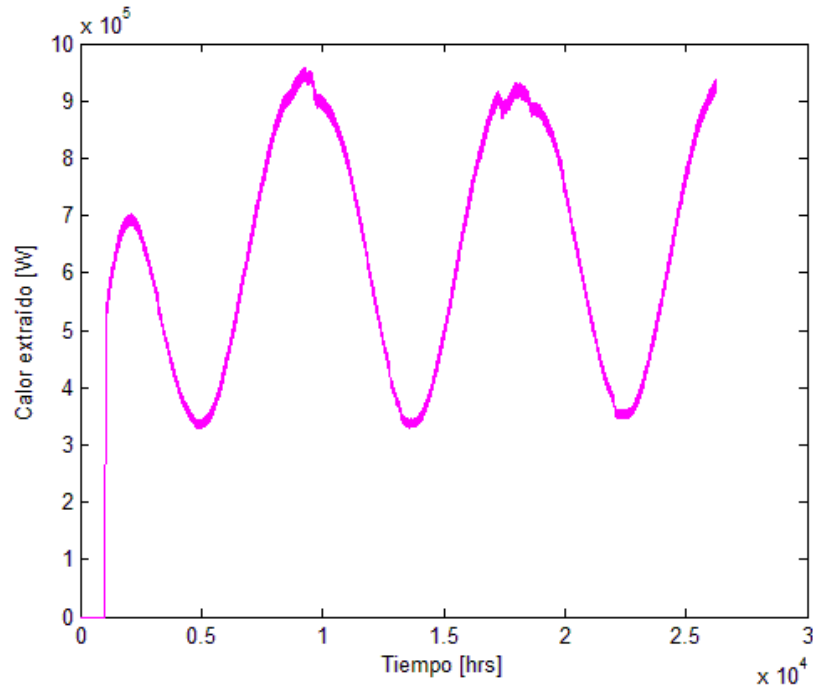


Figura 4.18: Calor extraído para  $\dot{m} = 16 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 42 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

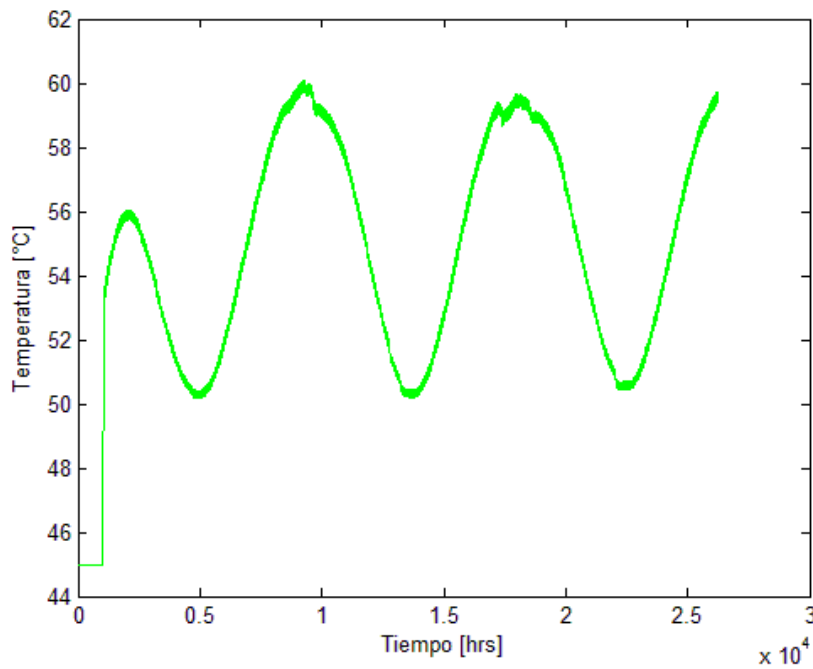


Figura 4.19: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 16 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 42 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

En este caso se obtiene una eficiencia de  $\eta = 14,13\%$ , un calor extraído máximo de  $Q=0,99 \text{ MW}$ , temperatura máxima del electrolito de  $61^\circ\text{C}$  y una mínima de  $51^\circ\text{C}$ . Además, el tiempo en que se tiene una temperatura de salida del electrolito menor a  $55^\circ\text{C}$  (que es la requerida), es del 43% del tiempo de

extracción de calor total. Además, la temperatura de retorno del fluido de la poza ( $T_{retorno}$ ) varía entre 6 y 15°C menos que la temperatura de salida de la poza ( $T_{LCZ}$ ). Por otra parte, para esta área utilizada se tiene un  $NUT=0,86$ , el cual se encuentra en el rango admisible de este valor ya que posee un límite máximo de  $NUT=4$ .

4.3.3.1.2. Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 18 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 60 \text{ m}^2$

En este caso se tiene una mayor transferencia de calor debido a que se tiene un caudal y área mayor. Para estos parámetros se obtuvo una eficiencia de  $\eta = 15,64\%$ , un calor extraído máximo de  $Q=1,09 \text{ MW}$ , este valor es de casi el límite de extracción de calor ( $Q_{max} = 1,1 \text{ MW}$ ) por lo que no es posible aumentar más el flujo o el área utilizada debido a que se podría superar el límite de extracción de calor. Por otra parte, se tiene una temperatura máxima de salida del electrolito de 62°C y una mínima de 51°C. El período en que el electrolito alcanza una temperatura menos a los 55°C es de un 37% del período total de extracción de calor. La temperatura de retorno del fluido a la poza varía entre 6 y 15°C. Finalmente, para este caso se tiene  $NUT=1,23$ .

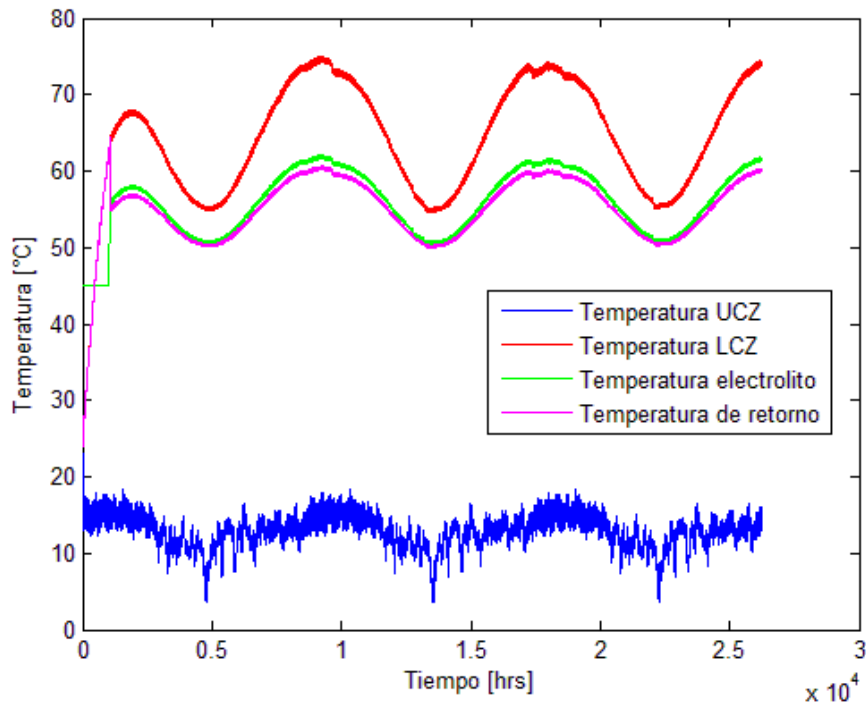


Figura 4.20: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 18 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 60 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

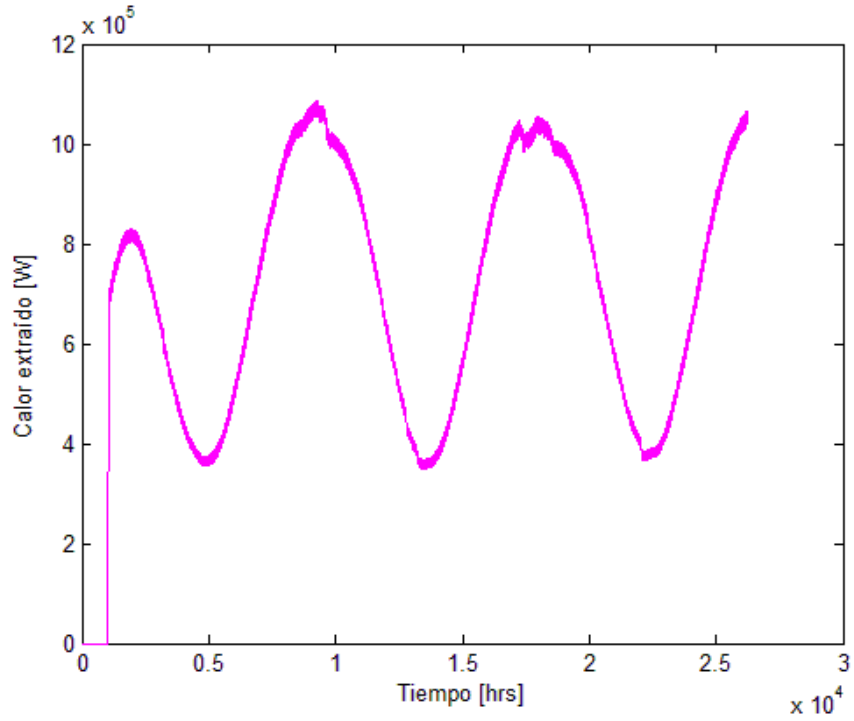


Figura 4.21: Calor extraído para  $\dot{m} = 18 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 60 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

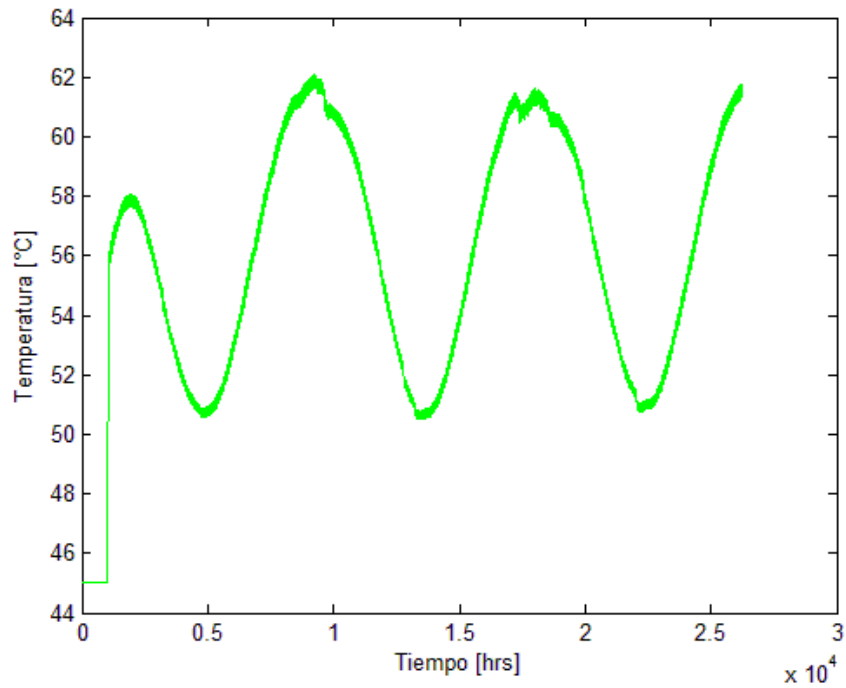


Figura 4.22: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 18 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 60 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

4.3.3.1.3. Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 20 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 51 \text{ m}^2$

En este caso se obtuvo una eficiencia de  $\eta = 15,21\%$  y un calor extraído máximo de  $Q=1,06 \text{ MW}$ , también cercano al límite de extracción de calor. Por otra parte, se tiene una temperatura máxima de salida del electrolito de  $62^\circ\text{C}$  y una mínima de  $51^\circ\text{C}$ . El período en que el electrolito alcanza una temperatura menor a los  $55^\circ\text{C}$  es de un 38% del período total de extracción de calor. La temperatura de retorno del fluido a la poza varía entre  $5$  y  $13^\circ\text{C}$ . Finalmente, para este caso se tiene  $NUT=1,04$ .

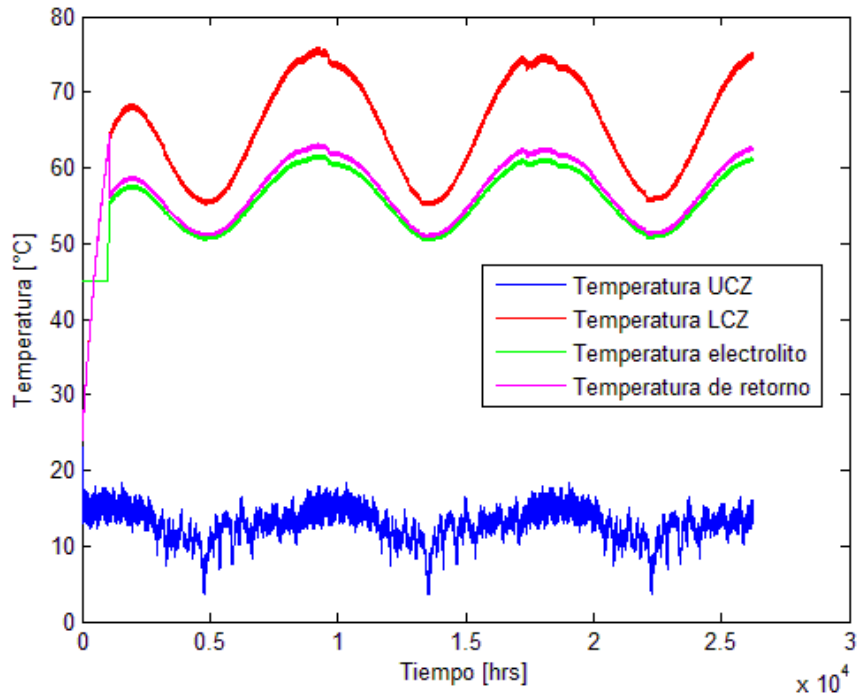


Figura 4.23: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 20 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 51 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

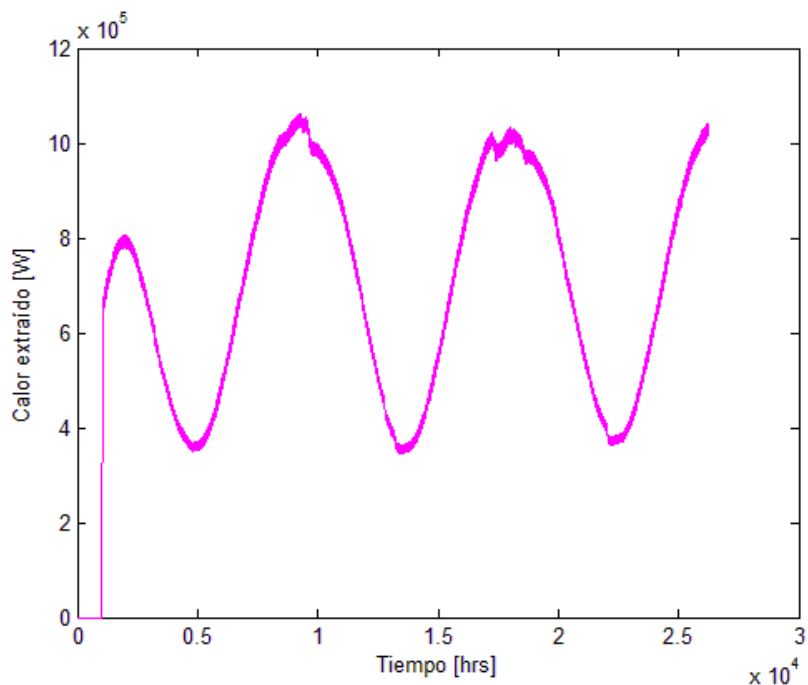


Figura 4.24: Calor extraído para  $\dot{m} = 20 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 51 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

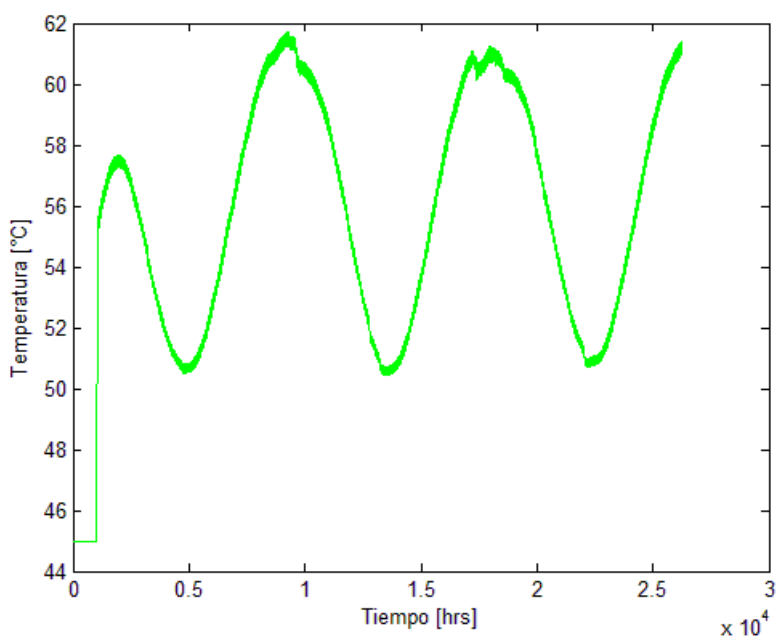


Figura 4.25: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 20 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 51 \text{ m}^2$ , para una poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$

Comparando las tres extracciones de calor distintas anteriores (para los distintos flujos máxicos de la poza y diferentes áreas del IC) se puede ver que el período máximo que se le podría suministrar el calor suficiente al electrolito para llegar a los  $55 \text{ °C}$  es del 63% del período total, sin embargo, el resto del año se lleva al electrolito a temperaturas de al menos  $51 \text{ °C}$ , por lo tanto, también se realiza un aporte térmico

a este fluido, sin embargo, se debe complementar con otro sistema para alcanzar los 55°C. Por otra parte, la eficiencia también llega a su valor máximo de  $\eta = 15,64\%$ . Este valor no puede aumentar debido que para esto se tendría que aumentar la extracción de calor la cual ya llegó a su límite en este caso.

En cuanto al valor de NUT, se puede ver que en los tres casos es lejano a su límite ( $NUT_{max} = 4$ ), en este caso se tiene un máximo de 1,23, el cual se da para el caso del mayor aporte térmico al electrolito. Si se quisiera mantener este suministro de calor disminuyendo el caudal del fluido de la poza, el área del IC debiese aumentar, esto provocaría un aumento del NUT, para que este último llegue a su valor límite, el área debiese llegar hasta 200 m<sup>2</sup> aproximadamente. Sin embargo, el caudal del fluido de la poza debe ser cercano al del electrolito, por lo que no se puede alejar mucho de este valor, es por esto que el área no llega a aumentar tanto.

#### 4.3.3.2. Poza de 100×100 m<sup>2</sup>

Para este tamaño de poza se tiene un límite de extracción de calor constante de 500 kW. Al igual que para el tamaño de poza anterior, este es el límite que se utiliza para la extracción máxima de calor.

Para este caso, el flujo másico del electrolito es menor debido a que hay una extracción de calor admisible menor. Por lo tanto, para esta poza se tiene  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ .

El área preliminar en este caso se calcula con un flujo másico de la poza igual al del electrolito, es decir,  $\dot{m} = 9 \text{ kg/s}$ , con  $T_{LCZ} = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_{retorno} = 55^\circ\text{C}$  y  $T_{ein} = 45^\circ\text{C}$ . Esto entrega un área preliminar de  $A_{ICpr} = 54 \text{ m}^2$  y  $U=1300 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

##### 4.3.3.2.1. Flujo másico de la poza $\dot{m} = 10 \text{ kg/s}$ y área $A_{IC} = 19 \text{ m}^2$

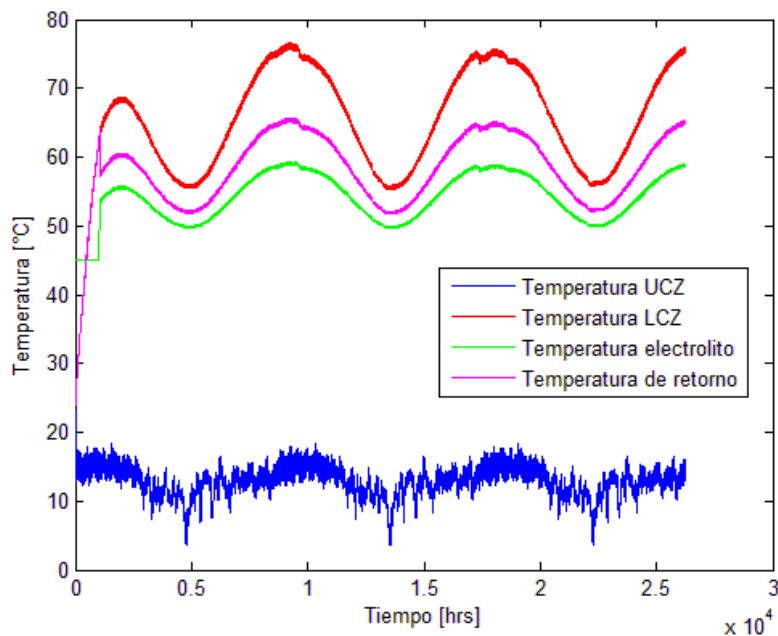


Figura 4.26: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 10 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 19 \text{ m}^2$ , para una poza de 100×100 m<sup>2</sup>



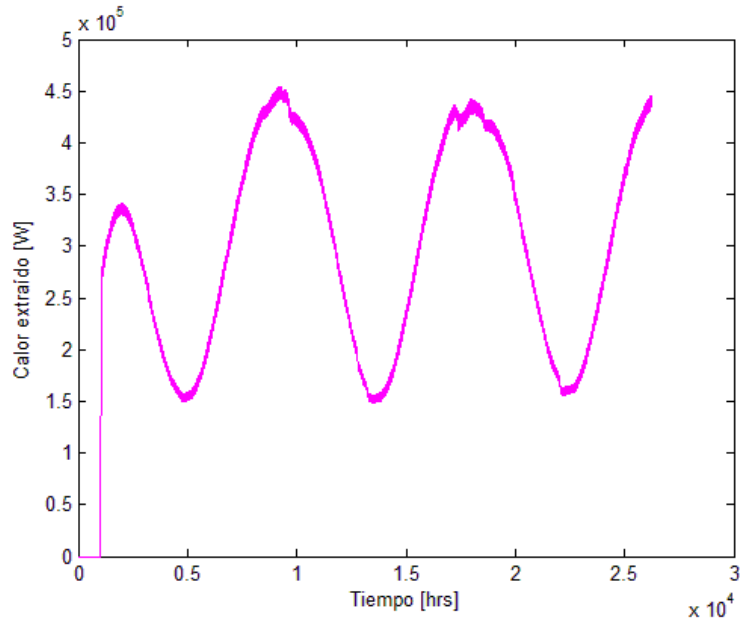


Figura 4.27: Calor extraído para  $\dot{m} = 10 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 19 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

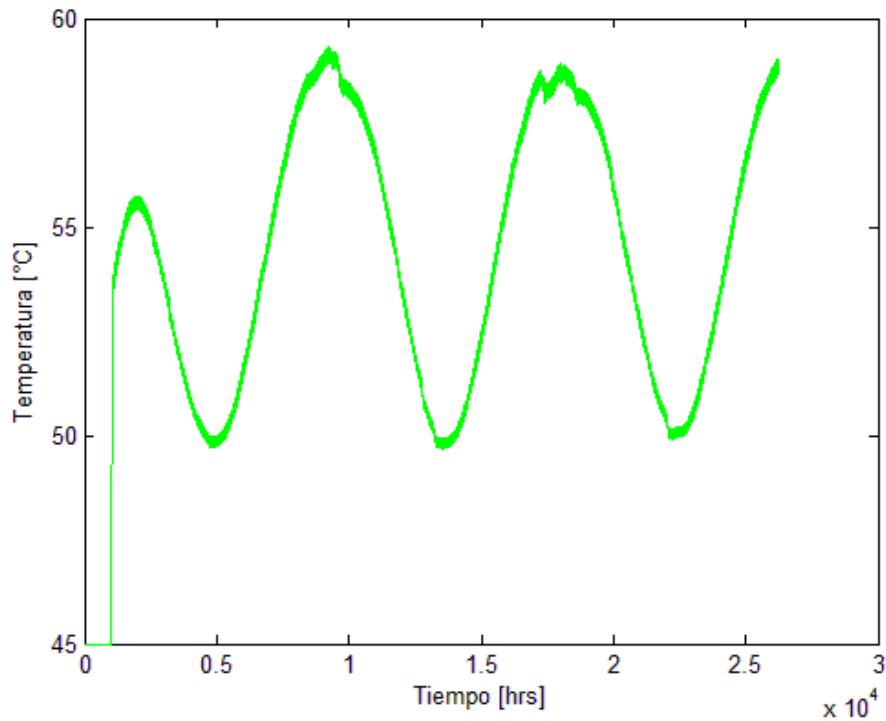


Figura 4.28: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 10 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 19 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

En este caso se obtuvo un calor máximo de  $Q=458 \text{ kW}$  y una eficiencia de  $\eta = 14,8\%$ . En cuanto a la temperatura de salida del electrolito, se obtuvo una máxima de  $59^\circ\text{C}$  y una mínima de  $50^\circ\text{C}$ . El período en que no es posible suministrarle el calor necesario al electrolito para que éste lleve su temperatura a los

55°C es del 50% del tiempo total de extracción. Además, la temperatura de retorno a la poza del fluido de ésta varía entre 4 y 11°C menos que la temperatura de salida de la poza, la variación mínima se obtiene para invierno y la máxima para verano. Por otra parte, el valor obtenido del NUT para esta área es de 0,78.

4.3.3.2.2. *Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 9 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 27 \text{ m}^2$*

Para este flujo másico y área se obtuvo un calor máximo de 495 kW, el cual es bastante cercano al límite que se tiene para este tamaño de poza. La eficiencia obtenida es de  $\eta = 15,98\%$ . La temperatura máxima del electrolito obtenida es de 60°C y la mínima es de 51°C. El período en que no se es posible llevar el electrolito a los 55°C es del 42% del tiempo total de extracción. Además, la temperatura de retorno del fluido de la poza varía entre 5 y 14°C menor que la temperatura de salida del fluido de la poza. En el caso del NUT se obtiene un valor de 1,10. En las siguientes figuras se muestra la evolución de la temperatura del fluido de la poza y del electrolito, además del calor extraído en función del tiempo.

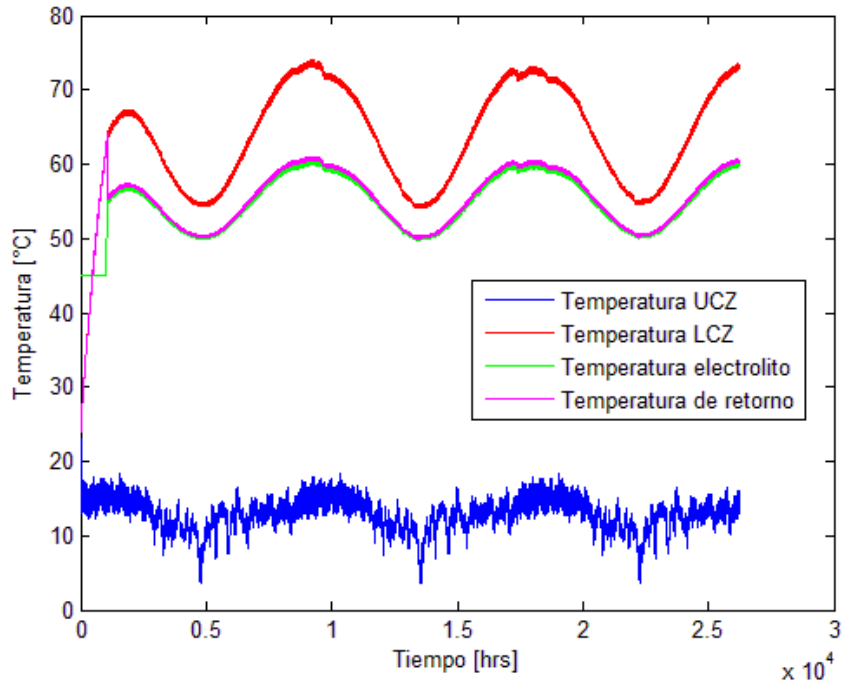


Figura 4.29: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 9 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 27 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

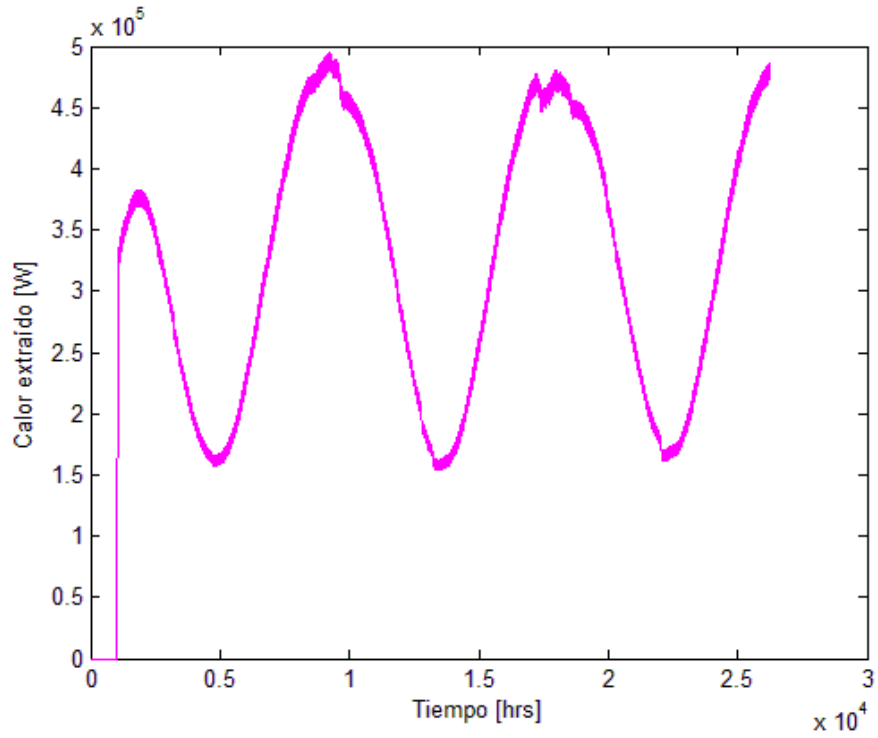


Figura 4.30: Calor extraído para  $\dot{m} = 9 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 27 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

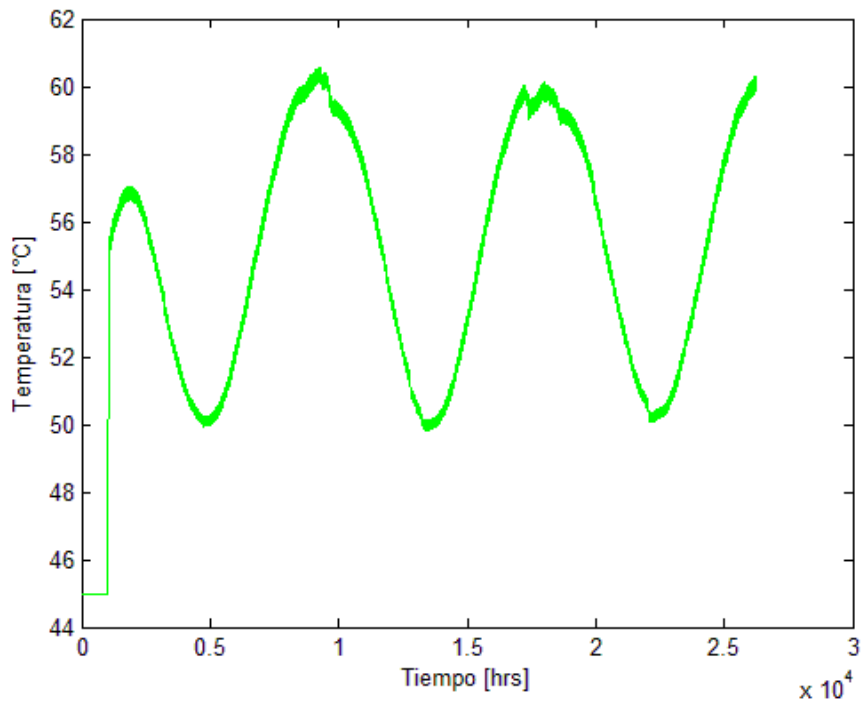


Figura 4.31: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 9 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 27 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

4.3.3.2.3. Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 7 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 31 \text{ m}^2$

En este caso se tiene una eficiencia de  $\eta = 15,97\%$ . Además, el calor máximo extraído desde la poza es de  $Q=494 \text{ kW}$ , también cercano al límite de extracción. En cuanto al electrolito, la temperatura máxima que alcanza en función del tiempo es de  $61^\circ\text{C}$  y la mínima de  $51^\circ\text{C}$ . El período en que este fluido no alcanza la temperatura de  $55^\circ\text{C}$  necesaria es del 44% del período total. Por último, la temperatura de retorno del fluido de la poza varía entre los 6 y  $17^\circ\text{C}$  menor a la temperatura de salida de este mismo fluido, también con la menor variación en invierno y la mayor en verano. El valor de NUT obtenido en este caso es de 1,27.

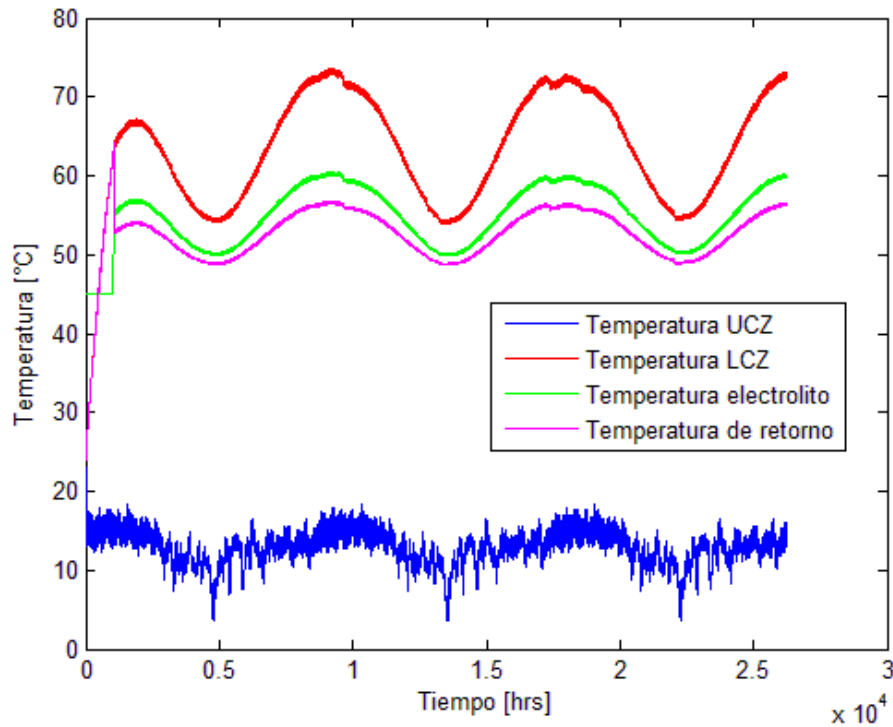


Figura 4.32: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 7 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 31 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

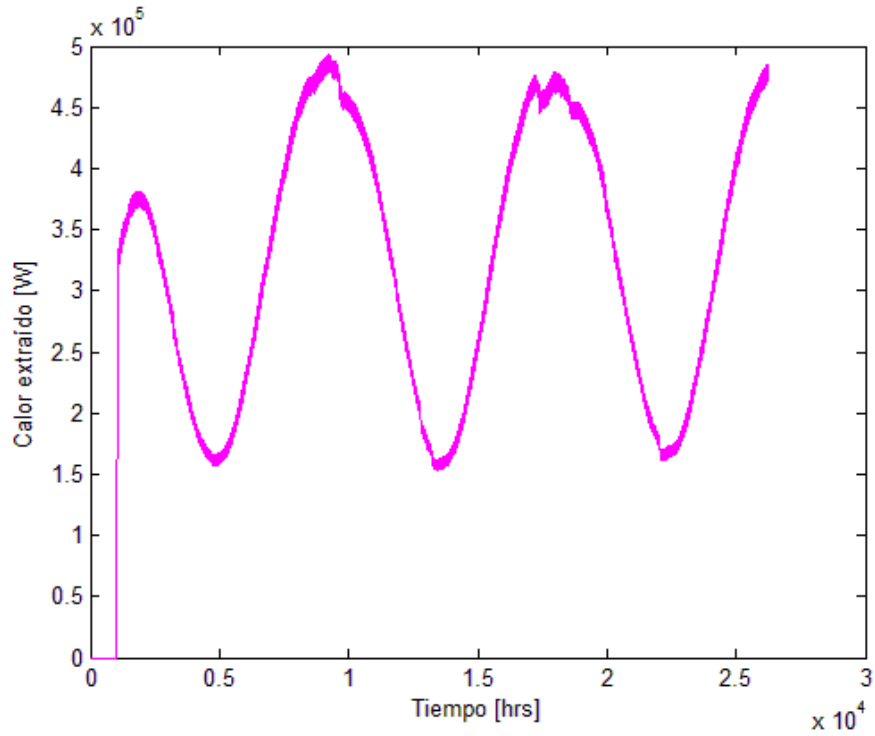


Figura 4.33: Calor extraído para  $\dot{m} = 7 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 31 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

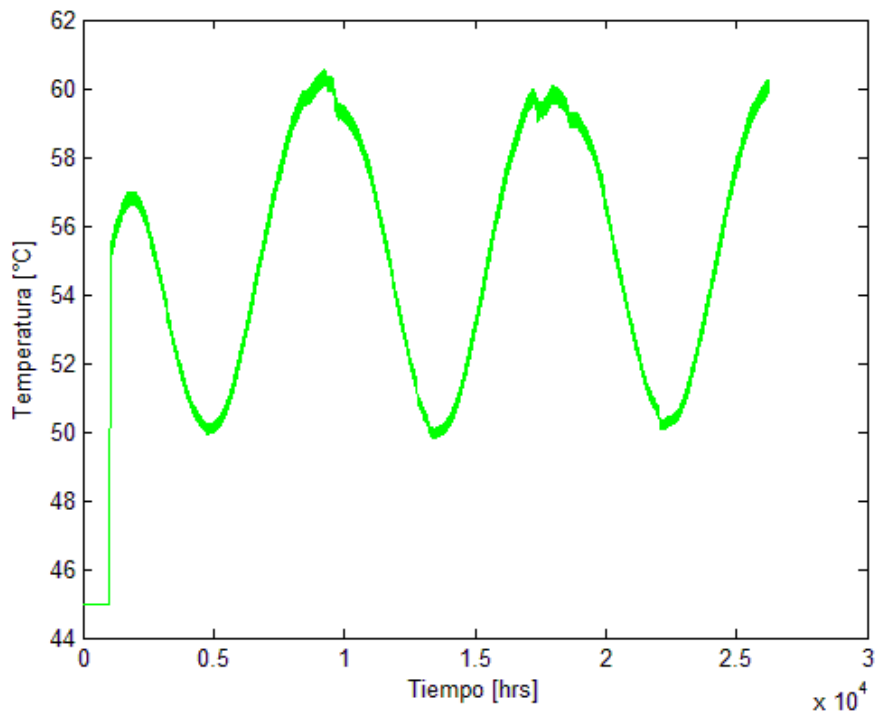


Figura 4.34: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 7 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 9 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 31 \text{ m}^2$ , para una poza de  $100 \times 100 \text{ m}^2$

Al comparar las tres situaciones de flujo másico y área del IC distintos se puede ver que el período máximo que se puede suministrar calor suficiente para obtener los 55°C del electrolito es de 58%, el cual se da para el flujo másico de 9 kg/s y área de 27 m<sup>2</sup>. Esto se debe a que en este caso de flujo y área se tiene una extracción cercana al límite de estabilidad de la poza, por lo que no es posible extraer mayor calor. En el período en que el electrolito no alcanza los 55°C se obtuvieron temperaturas mínimas de 51°C, por lo que, en este tiempo se logra suministrar calor (se aumenta la temperatura de 45 a 51°C) sin embargo es necesario complementar este aporte de calor mediante otro sistema para obtener la temperatura necesaria.

Por otro lado, la eficiencia máxima obtenida es de  $\eta = 15,98\%$ , la cual no puede aumentar mucho debido a que ésta se da para una extracción de calor cercana al límite.

En cuanto al valor de NUT, se puede ver que para esta poza también se obtuvo un valor lejano al límite para los tres casos de flujo másico y área distinta. En este caso se tiene un valor máximo de 1,27 el cual se da para el caso con mayor área, sin embargo, este último no es el mismo donde se obtiene la mayor extracción de calor.

#### **4.3.3.3. Poza de 70×70 m<sup>2</sup>**

Para este tamaño de poza el límite de extracción de calor es de 250 kW. El flujo de electrolito utilizado en este caso es de  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ .

Para cálculo del área preliminar se utiliza  $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$ , con  $T_{LCZ} = 70^\circ\text{C}$ ,  $T_{retorno} = 55^\circ\text{C}$  y  $T_{ein} = 45^\circ\text{C}$ . Esto entrega un área preliminar de  $A_{ICpr} = 24 \text{ m}^2$  y  $U=1300 \text{ W/m}^2\text{K}$ .

4.3.3.3.1. Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 18 \text{ m}^2$

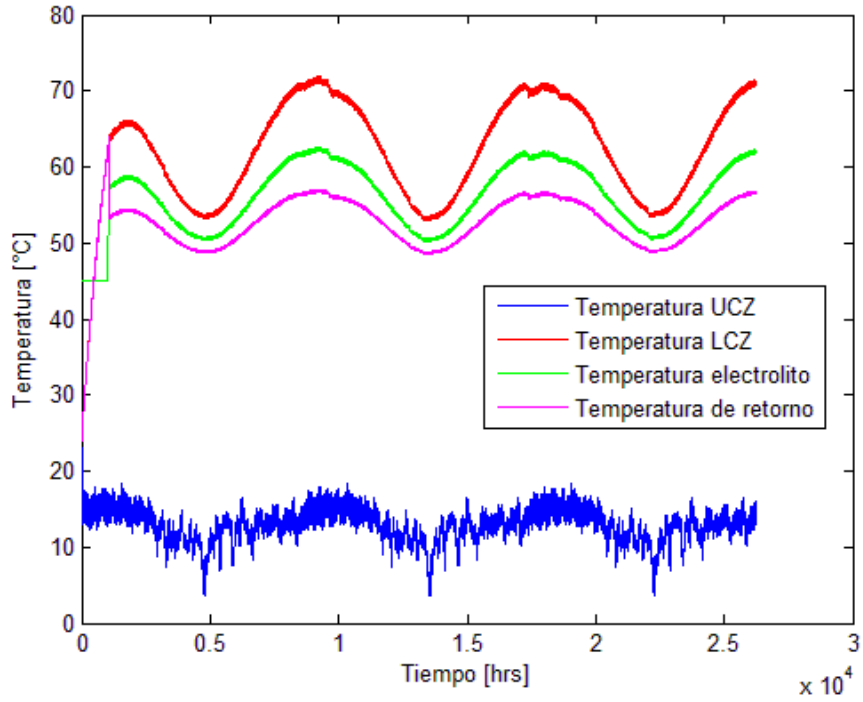


Figura 4.35: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 18 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

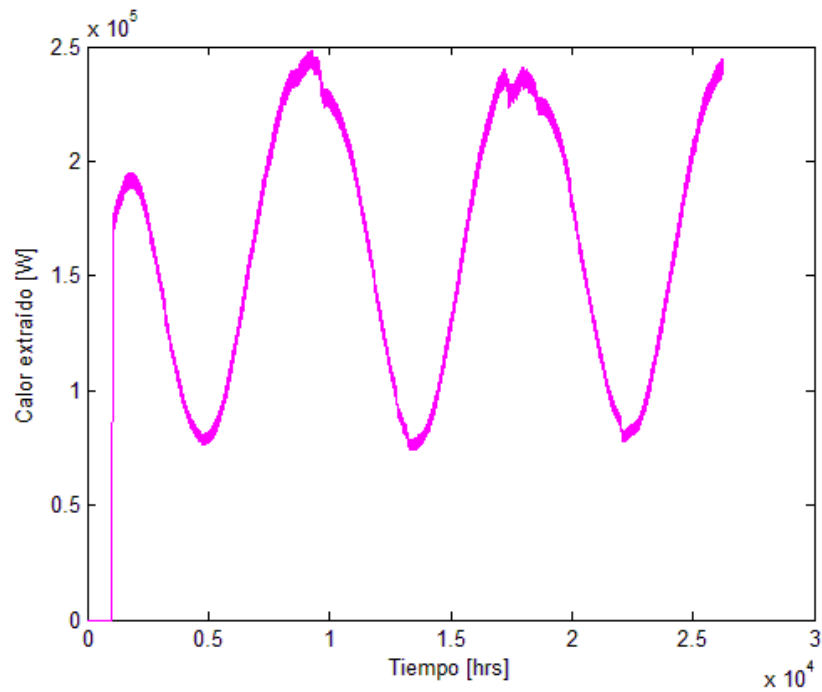
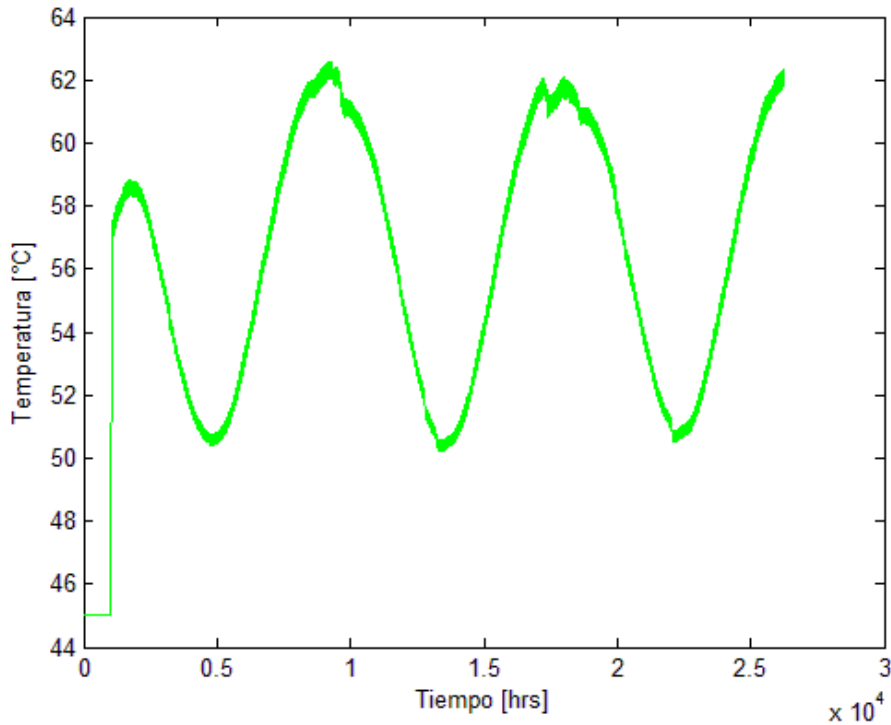


Figura 4.36: Calor extraído para  $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 18 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$



**Figura 4.37:** Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 4 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 18 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

En este caso se obtuvo una eficiencia de  $\eta = 16,38\%$  y un calor máximo de  $Q=248 \text{ kW}$ , valor cercano al límite de extracción. La temperatura máxima obtenida para el electrolito es de  $63^\circ\text{C}$  y la mínima de  $51^\circ\text{C}$ . El tiempo sin extracción obtenido es del 40% del tiempo total de extracción. Además, la temperatura de retorno a la poza está entre  $5$  y  $15^\circ\text{C}$  menos que la temperatura de salida de la poza. Por otra parte, el NUT obtenido es de 1,66.

#### 4.3.3.3.2. Flujo másico de la poza $\dot{m} = 6 \text{ kg/s}$ y área $A_{IC} = 14 \text{ m}^2$

Para este flujo másico y área del IC se obtuvo una eficiencia de  $\eta = 16,16\%$  y un calor máximo de extracción de  $Q=245 \text{ kW}$ . La temperatura del electrolito máxima que se obtuvo es de  $62^\circ\text{C}$  y la mínima es de  $51^\circ\text{C}$ . El tiempo sin el suministro de calor suficiente para obtener los  $55^\circ\text{C}$  del electrolito es del 41% del tiempo total de extracción. La temperatura de retorno a la poza varía entre los  $4$  y  $10^\circ\text{C}$ . Finalmente, el valor de NUT obtenido es de 1,29.



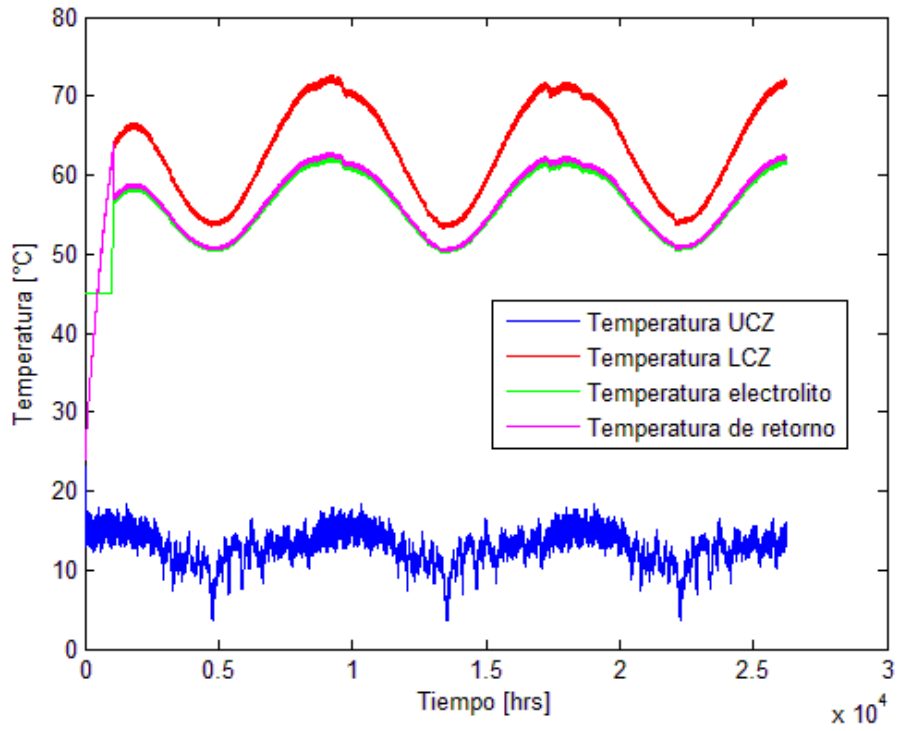


Figura 4.38: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 6 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 14 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

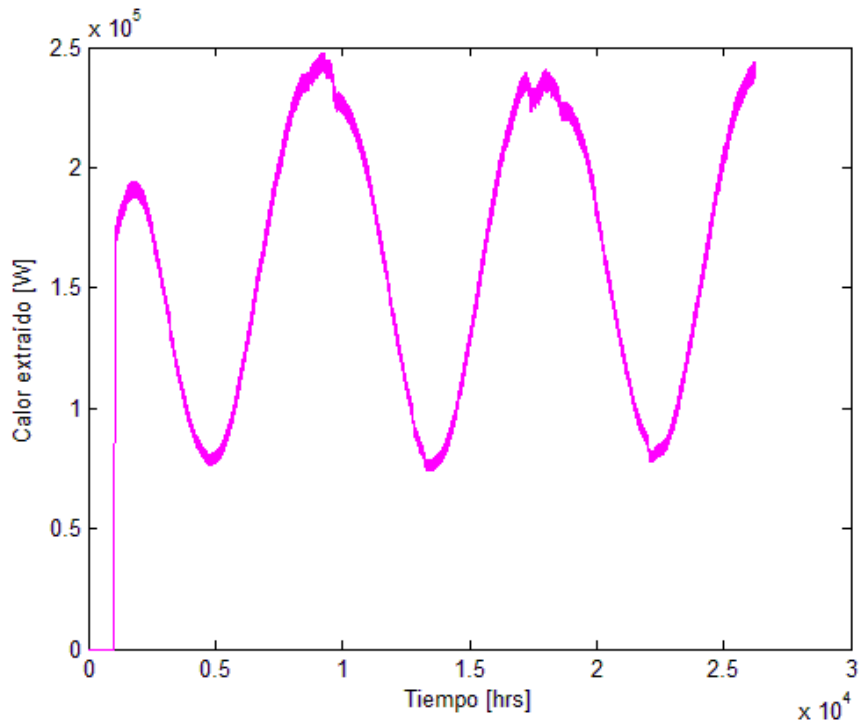


Figura 4.39: Calor extraído para  $\dot{m} = 6 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 14 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

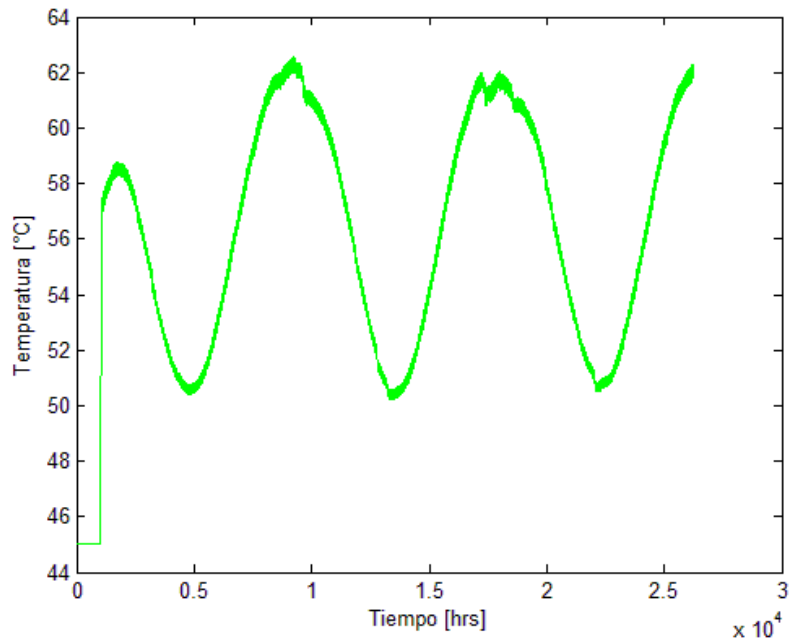


Figura 4.40: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 6 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 14 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

4.3.3.3.3. Flujo másico de la poza  $\dot{m} = 3 \text{ kg/s}$  y área  $A_{IC} = 24 \text{ m}^2$

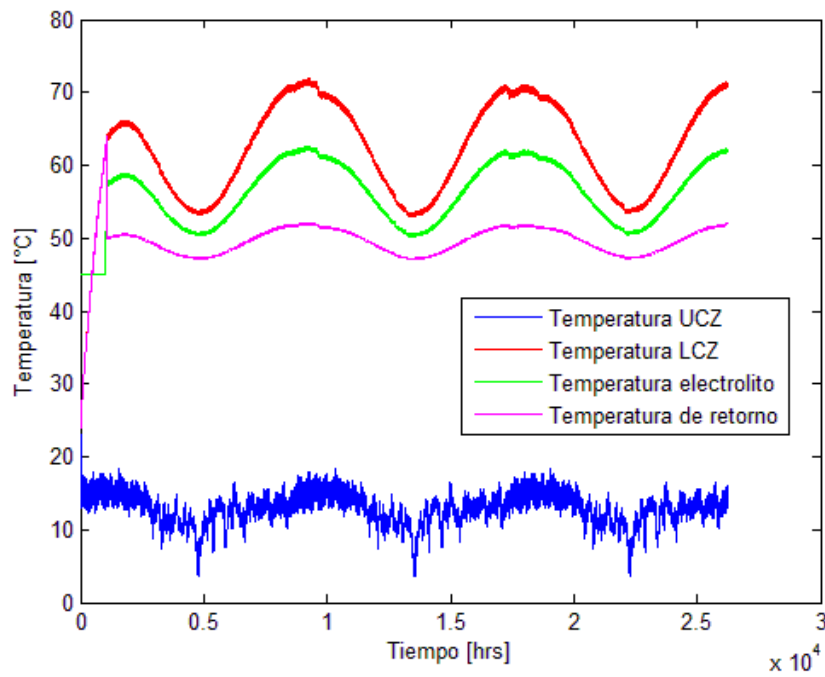


Figura 4.41: Temperatura de la LCZ, de retorno, del electrolito y de la UCZ para  $\dot{m} = 3 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 24 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

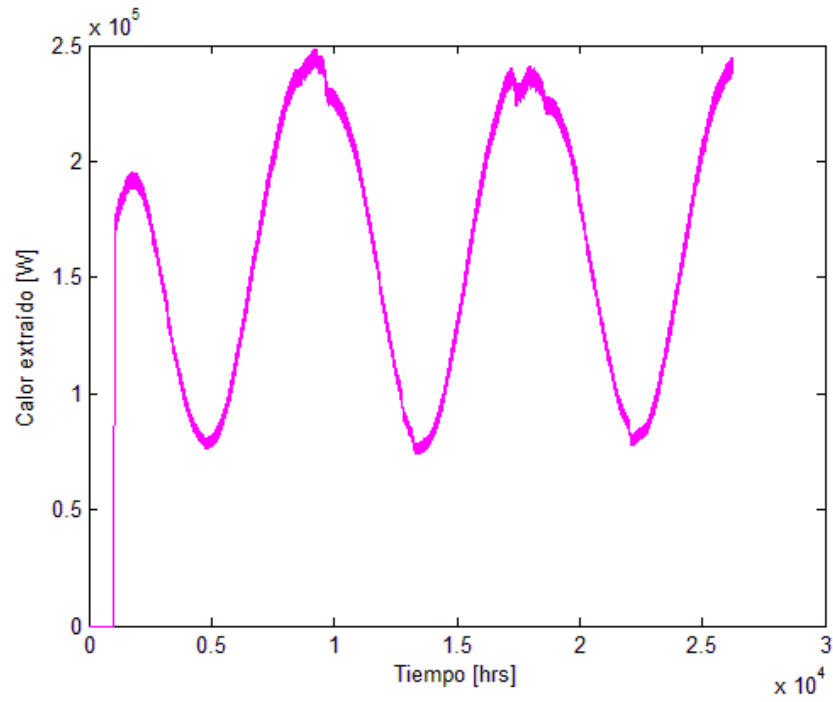


Figura 4.42: Calor extraído para  $\dot{m} = 3 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 24 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

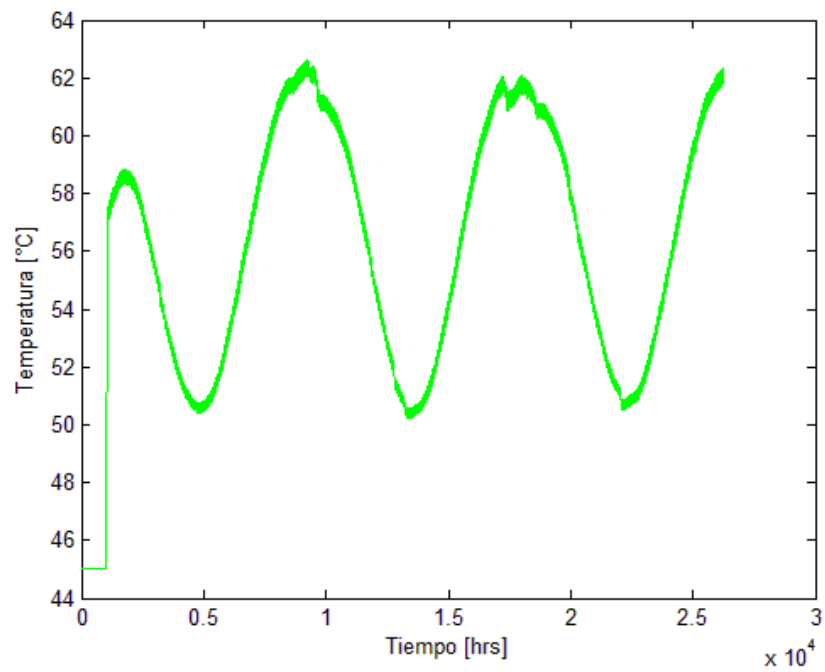


Figura 4.43: Temperatura electrolito para  $\dot{m} = 3 \text{ kg/s}$ ,  $\dot{m}_e = 4 \text{ kg/s}$ ,  $A_{IC} = 24 \text{ m}^2$ , para una poza de  $70 \times 70 \text{ m}^2$

Para este caso se obtuvo una eficiencia de  $\eta = 16,40$  y un valor de calor extraído máximo de  $Q=249$  kW. La temperatura máxima obtenida para el electrolito es de  $63^{\circ}\text{C}$  y la mínima de  $51^{\circ}\text{C}$ . El período en que no es posible aportar el calor necesario para llevar al electrolito a los  $55^{\circ}\text{C}$  es del 36% del tiempo total de extracción. Además, la temperatura de retorno del fluido de la poza varía entre los  $7$  y  $19^{\circ}\text{C}$  menos que la temperatura de salida del fluido de la poza. El valor del NUT obtenido para este caso es de 2,21.

Al comparar los tres casos de flujo másico y área del IC para este tamaño de poza se puede ver que el período máximo en que es posible suministrar el calor necesario al proceso de electro-obtención es para el flujo másico de  $3$  kg/s y el área de  $24$  m<sup>2</sup>, con un período de suministro de 64% del tiempo total de extracción. En este caso se tiene un calor máximo casi igual al límite máximo de extracción por lo que no sería posible tener un mayor período de suministro. Para este mismo caso se tiene la mayor eficiencia del 16,4%.

Las temperaturas máximas del electrolito obtenidas para los tres casos no varían mucho, sin embargo, las máximas se tienen para los casos de mayor extracción de calor.

En cuanto al valor de NUT, el máximo obtenido es de 2,21, el cual es un valor lejano al límite. Éste se da para el caso de mayor área y menor flujo másico.

Por otra parte, se pueden comparar los casos de los tres tamaños de poza distintos.

En primer lugar, se puede ver que el máximo valor de NUT se da para las mayores áreas y menores flujos másicos, concordando con su definición, a pesar de que para distintos valores de éstos se obtenga el mismo calor. Esto se debe a que el NUT depende directamente del área e indirectamente del flujo másico, por lo que en los casos de área grande y flujo másico pequeño es cuando se es más propenso a llegar al límite. Sin embargo, para los tres tamaños de poza el máximo valor de NUT obtenido es bastante lejano al límite de éste.

Además, el tiempo sin extracción (sin extraer el calor total necesario para los  $55^{\circ}\text{C}$  del electrolito) varía entre el 36 y 60%. Esta variación radica principalmente en la cantidad de calor extraído desde la poza. Entre mayor calor, menor será el tiempo con la extracción menor a la necesaria. El período máximo del suministro de calor necesario es de un 64% del tiempo total, sin embargo para los tres casos se tienen tiempos máximos de suministro parecidos a este valor.

En relación a las temperaturas del electrolito obtenida, sus máximas y mínimas no varían mucho entre los casos de los distintos tamaños de poza, con mínimas en general cercanas a los  $50^{\circ}\text{C}$  y máximas a los  $60^{\circ}\text{C}$ . Por lo tanto, para los tres casos se tiene, en el peor caso, un aumento de temperatura del electrolito de  $5^{\circ}\text{C}$  aproximadamente (desde los  $45^{\circ}\text{C}$  a los  $50^{\circ}\text{C}$ ). Por lo que el aporte de calor desde un sistema complementario sería de aproximadamente  $5^{\circ}\text{C}$  máximo.

Finalmente, la diferencia principal entre los tres tamaños de poza distintos radica en el flujo másico de electrolito máximo al cual se le puede suministrar calor. Para el caso de la menor poza ( $70 \times 70$  m<sup>2</sup>) se tiene un flujo de  $4$  kg/s, sin embargo, para el caso de la poza más grande ( $150 \times 150$  m<sup>2</sup>) se tiene un flujo de  $18$  kg/s.

En relación al modelo realizado, se puede decir que genera resultados que reflejan el comportamiento esperado de las temperaturas en cada zona de la poza en largos intervalos de tiempo. Es posible con el

modelo determinar la duración de los períodos transientes, y construir el gradiente de temperatura para un gradiente prefijado de concentración de sal. Los resultados obtenidos de temperatura y capacidad de extracción de calor son similares a los resultados obtenidos en otros estudios, sin embargo, por lo general acá se tienen mayores temperaturas que en los otros. Esto probablemente se debe a que en este caso no se consideró la transferencia de masa en la poza, esto último implica que no se tomó en cuenta la difusión de las partículas, lo que genera pérdidas. Esto último puede generar que la NCZ disminuya su espesor a lo largo del tiempo, lo que genera una zona aisladora entre la LCZ y la UCZ menor e implica mayores pérdidas hacia el exterior. Al incluir este fenómeno se tendrían, por lo tanto, menores temperaturas en la LCZ. Además, las temperaturas mayores también se pueden deber a que la radiación solar en el sector estudiado en este trabajo, es decir, en la región de Antofagasta en Chile, es mayor por lo general que la radiación utilizada en algunos de los estudios con los que se comparó este trabajo, por lo que acá se tiene una mayor entrada de calor.

Por otra parte, es importante mencionar la eficiencia del modelo debido a que el tiempo de procesamiento es bastante bajo, siendo de menos de 1 minuto, aun teniendo que iterar tomando en cuenta datos de 6 años con un paso de tiempo de 1 hora.

Además, este modelo es la herramienta básica para este trabajo de memoria debido a que permite conocer la capacidad de extracción de calor para una poza de determinadas dimensiones y a condiciones meteorológicas específicas.

#### 4.4. Evaluación económica

La poza escogida para realizar esta evaluación es la de dimensiones de  $150 \times 150 \text{ m}^2$ , con un flujo másico de electrolito y de la poza de  $\dot{m}_e = 18 \text{ kg/s}$  y  $\dot{m} = 18 \text{ kg/s}$  respectivamente y un área del IC de  $60 \text{ m}^2$ , debido a que permite suplir la mayor demanda de energía para el mayor flujo másico del electrolito.

Para este caso la cantidad de agua y sal necesaria para la puesta en marcha de la poza en primera instancia se muestra en la Tabla 4.3. Con la masa de ellos se puede calcular el costo anual con el precio por tonelada de cada uno.

**Tabla 4.3: Cantidad de agua y sal necesaria para construir la poza en primera instancia**

	Masa agua [ton]	Masa sal [ton]
UCZ	15.750	0
NCZ	24.362	3.706
LCZ	25.339	8.446
Total	65.452	12.153

En cuanto a la reposición de agua, el valor de ésta se obtiene mediante la energía perdida por evaporación del agua de la poza durante 1 año. Mediante el programa de Matlab se obtiene una masa evaporada de 14.000 ton anuales necesarias a reponer.

La Tabla 4.4 muestra los resultados de los costos de inversión, calculados mediante los valores mencionados en la sección 3.5.1. Además, en la Tabla 4.5 se pueden ver los costos asociados a la mantención y operación de la poza. Como se puede ver en esta última tabla, el costo de operación y

mantención se debe principalmente al personal de la planta. Como se dijo anteriormente, el cambio de moneda utilizado es de \$600.

**Tabla 4.4: Costos de inversión**

	USD	Pesos
Excavación	153.450	92.070.000
Revestimiento	194.880	116.928.000
Agua	36.980	22.188.087
Sal	486.119	291.671.107
Bombas	9.523	5.713.920
Intercambiador de calor	25.556	15.333.840
Total	906.508	543.904.953

**Tabla 4.5: Costos de operación y mantenimiento anuales**

	USD/año	Pesos/año
Agua	7.910	4.746.000
Sal	28	16.974
Personal	176.000	105.600.000
Energía eléctrica	95.243	57.145.860
Clarificación	2.000	1.200.000
Total	281.181	168.708.834

En cuanto a los ingresos, se muestra en la Tabla 4.6 la energía total suministrada al electrolito para un año determinado y el ingreso obtenido según la venta de esta energía a partir del precio mencionado en la sección 3.5.1.

**Tabla 4.6: Energía anual aportado al electrolito e ingresos obtenidos por la venta de ésta para el 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> año de operación**

	Energía anual [MWh]	Ingreso anual [USD]	Ingreso anual [\$]
1 <sup>er</sup> año	4.250	481.667	289.000.000
2 <sup>do</sup> año	5.017	568.556	341.133.333

Similarmente, en la Tabla 4.7 se puede ver la energía anual que faltó para suministrar el calor necesario al electrolito, ésta es la que se debe entregar con el sistema de respaldo. Además, se muestran los litros necesarios de GLP para suplir esta energía y los costos asociados a ésta.

**Tabla 4.7: Energía anual faltante, litros de GLP para suplirla y su costo para el 1<sup>er</sup> y 2<sup>do</sup> año de operación**

	Energía anual [MWh]	Litros GLP [L]	Costo [USD]	Costo [\$]
1 <sup>er</sup> año	1.278	178.212	142.569	85.541.609
2 <sup>do</sup> año	575	80.195	64.156	38.493.724

Para evaluar el préstamo, se debe tomar en cuenta la inversión del proyecto. En este caso toma el valor de \$543.904.953. Suponiendo un préstamo del 100% de la inversión, y un período de pago de 10 años, se asume una tasa de interés del 6%. Esto entrega una cuota anual de pago de \$ 83.033.203.

Finalmente, se realiza el flujo de caja con los valores presentados anteriormente. La depreciación sólo se consideró en los equipos de intercambiador de calor y bombas. Se consideró una depreciación lineal de estos activos en un período de 15 años.

El impuesto de primera categoría se considera de un 21% el primer año, un 22,5% el siguiente año, de un 24% el siguiente, un 25,5% el año siguiente y luego un 27% para el resto de los años [29].

Se asume un valor residual de los activos nulo.

En el Anexo E se muestra el flujo de caja realizado. Mediante éste se puede obtener los indicadores económicos. En la Tabla 4.8 se muestra el VAN obtenido para distintos períodos de vida del proyecto y en la Tabla 4.9 la TIR obtenida para estos mismos períodos.

**Tabla 4.8: VAN obtenido para una poza de 150×150 m<sup>2</sup> para un período del proyecto de 20, 15 y 10 años**

VAN a 20 años	\$ 204.161.740
VAN a 15 años	\$ 136.408.137
VAN a 10 años	\$ 24.313.285

**Tabla 4.9: TIR obtenida para una poza de 150×150 m<sup>2</sup> para un período del proyecto de 20, 15 y 10 años**

TIR 20 años	38,70%
TIR 15 años	37,60%
TIR 10 años	26,60%

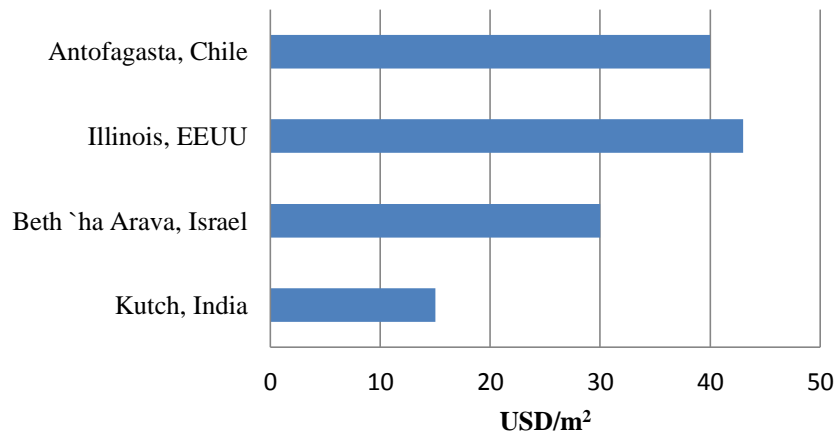
Finalmente, el período de recuperación de la inversión para este caso es de 15 años.

Mediante el análisis económico se puede ver que la construcción de la poza solar en Chile sería factible. Esto se debe a que el VAN se obtiene positivo para los 3 casos distintos de duración del proyecto. Además de dar positivo, para los tres períodos se obtiene un valor bastante alto, lo que lo hace más atractivo. Observando este indicador para los tres años diferentes, convendría realizar el proyecto con una duración de 20 años ya que es cuando se obtiene el VAN mayor.

En cuanto a la TIR, también los valores obtenidos para los 3 tiempos de duración del proyecto da bastante alta. Esto indica que aunque la tasa de descuento, supuesta en un 10%, aumente hasta un 38,7% para el caso de duración del proyecto de 20 años, el proyecto seguiría siendo rentable. Esto último significa que el proyecto sería bastante conveniente.

Por otra parte, el costo de la poza solar y el sistema de suministro de calor tiene un valor de 40 USD/m<sup>2</sup>, lo que equivale a 24.174 \$/m<sup>2</sup>. Además, el costo por producir energía es de 0,12 USD/MWh, equivalente a 71 \$/MWh.

A continuación se compara el resultado obtenido del valor de costo por  $m^2$  con el de distintas pozas construidas. En la Figura 4.44 se puede ver un gráfico comparativo entre estos valores.



**Figura 4.44: Costo en USD/m<sup>2</sup> para distintas pozas solares construidas**

Es importante mencionar el tamaño de cada poza y su año de construcción. Para el caso de la poza en Chile, se tiene una superficie de  $22.500 m^2$  y un año de construcción del 2015. La poza de Illinois en EEUU posee una superficie de  $2.000 m^2$  y se comenzó su construcción el año 1987, la de Kutch, India de  $6.000 m^2$  también del año 1987 y la de Betch`ha Arava, Israel de  $250.000 m^2$  del año 1982.

La diferencia de costos puede estar dada por la tecnología utilizada, también por la profundidad de la poza, ya que ésta influye en los costos de excavación y revestimiento y además del año de construcción. Además de también la diferencia de costo de los distintos equipos o materiales utilizados. Sin embargo, se puede ver que los costos se encuentran en un mismo orden de magnitud.

También se estudió la factibilidad económica de la construcción de pozas de menor tamaño a la anterior.

Se utilizaron las dimensiones de poza usadas en la sección anterior, con los flujos máxicos de los fluidos y área del IC que permitieran un mayor aporte de calor al electrolito.

En primer lugar, se muestra el VAN obtenido para una poza de  $100 \times 100 m^2$ , con un flujo máxico de  $\dot{m}_e = 9 kg/s$  y  $\dot{m} = 9 kg/s$  para el electrolito y el fluido de la poza respectivamente. Además de un área de  $27 m^2$  para el IC.

Siguiendo la misma metodología que para el caso de la poza anterior, se obtiene finalmente un VAN de  $\$-196.218.580$  para un período de vida del proyecto de 20 años. Para períodos más cortos el VAN también negativo. Esto indica que esta poza con esos flujos máxicos no sería rentable.

Para una poza de  $70 \times 70 m^2$ , con un flujo máxico de  $\dot{m}_e = 4 kg/s$  y  $\dot{m} = 3 kg/s$  para el electrolito y el fluido de la poza respectivamente y un área del IC de  $24 m^2$ , se obtuvo un VAN de  $\$-638.265.690$  para un período de vida del proyecto de 20 años, para uno de 10 años el VAN obtenido es de  $\$-438.600.437$ , el cual es mayor que el anterior, sin embargo, sigue siendo negativo por lo que el proyecto tampoco sería rentable.



Por el contrario, para pozas mayores a  $150 \times 150 \text{ m}^2$ , se obtiene un VAN mayor aún, por lo que el proyecto sería aún más rentable. Para una poza de  $200 \times 200 \text{ m}^2$  se obtuvo un VAN de \$ 616.983.077, para 20 años de horizonte del proyecto. Probando para distintas dimensiones de poza, se obtuvo que el límite para obtener un VAN positivo con este proyecto es una poza de  $140 \times 140 \text{ m}^2$  aproximadamente, para dimensiones menores a esta, el VAN obtenido es negativo.

Ahora, al comparar el VAN calculado para 3 tamaños de pozas distintas, se puede ver claramente que el proyecto que sería rentable es el de la poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$  debido a que tiene un VAN positivo, y, además, es bastante rentable debido al alto VAN que tiene. La diferencia entre los distintos tamaños de la poza se puede dar debido a los ingresos generados mediante ésta. Para la poza grande, la venta de energía supera por bastante a la energía faltante que se debe generar por medio de GLP, lo que genera un costo adicional, sin embargo, para pozas más chicas, esta diferencia es menor, por lo que hay menos ingresos por venta de energía y mayores costos por la falta de producción de ésta.

Por otro lado, para pozas pequeñas, los ingresos generados puede que no compensen la inversión realizada para la construcción de la poza, además de los costos anuales generados, sin embargo, con una poza mayor, a pesar de tener una mayor inversión, se tienen mayores ingresos.

Otro punto importante es que el personal requerido para los 3 tamaños de la poza es el mismo. Los sueldos del personal influyen bastante en el VAN obtenido, por lo que son costos que se mantienen constante para los tres tamaños de poza, a pesar de que los ingresos disminuyen para tamaños menores.

Además, es importante mencionar que una de las desventajas de estos sistemas de pozas, que también puede influir en la no rentabilidad de este proyecto, es que hay un gasto grande de energía que se utiliza en calentar el electrolito más de lo necesario y no es vendida, por lo que no es aprovechada.

## 5. Conclusiones

El balance energético del sistema de pozas solares es el aporte principal de este trabajo. Mediante este balance se construyó un modelo en Matlab que permitió predecir el comportamiento térmico de la poza en cualquier instante de tiempo. Debido a esto, el programa utilizado es la herramienta base de este trabajo.

En relación al programa generado en Matlab, éste tiene una alta eficiencia debido a que el tiempo de procesamiento es bastante bajo. No posee problemas de estabilidad numérica y converge en todos los casos. Además, entrega resultados esperados de la poza y que se asemejan a resultados obtenidos en otros estudios.

- Comportamiento de una poza sin carga

A partir de las variables de entrada de las dimensiones de la poza, incluyendo las entradas y salidas de energía en el sistema y los espesores de las tres zonas de la poza, el modelo permitió obtener su temperatura para cada instante de tiempo, obteniendo un comportamiento esperable en función del tiempo para cada una de ellas. Se pudo ver que en la zona convectiva superior, la temperatura seguía el comportamiento de la temperatura ambiente pero con variaciones amortiguadas. En la zona no convectiva se logró alcanzar un perfil lineal de temperatura en función de la profundidad de la poza luego de 2 meses aproximadamente. Además, la temperatura de la zona convectiva inferior, una vez que se alcanza el régimen final, sigue las variaciones estacionales del año, sin embargo, sus variaciones a corto plazo son bastante bajas, teniendo variaciones de 1°C entre el día y la noche aproximadamente, por lo que los cambios meteorológicos a corto plazo no afectan a esta zona. Esto es esperable debido a que se espera que la LCZ sea capaz de amortiguar las variaciones de temperatura dentro de ella y así poder almacenar el mayor calor posible.

En cuanto al gradiente salino y térmico en la zona no convectiva, el cual es determinante para el buen funcionamiento de la poza, se pudo ver que estableciendo el gradiente de concentración salina artificialmente, el cual en este caso se supuso creado desde el inicio del estudio, el gradiente térmico también se establece, tomando un perfil lineal, luego de un corto período de tiempo (meses).

- Extracción de calor

Es importante saber el límite de extracción de calor sin que se desestabilice la poza. Para esto, mediante la simulación con una extracción de calor constante desde la zona inferior, se obtuvo el límite en que la zona intermedia perdía su perfil lineal. Esto entregó el límite de extracción para distintos tamaños de pozas.

Dada la temperatura de la zona inferior en función del tiempo, se pudo determinar la capacidad de extracción de calor de la poza, la cual se realiza desde esta zona. Mediante el programa se pudo determinar la extracción máxima de calor posible sin que se destruyera el gradiente de temperatura en la poza. Este límite existe debido a que a valores muy grandes de extracción, el gradiente de temperatura en la NCZ perdía el perfil lineal y además se disminuía demasiado la temperatura. Se analizó distintos tamaños de pozas, los cuales tenían un límite de extracción distinto debido a su capacidad de almacenamiento, este límite aumentaba con el aumento del área de la poza.

El fluido al cual se le suministra el calor obtenido mediante la poza es el electrolito de cobre, el cual se debe llevar de una temperatura de 45°C a 55°C. Se evaluaron distintos tamaños de poza para suplir diferentes flujos máxicos de electrolito, es decir, para suplir distintas demandas energéticas por parte de este fluido, entre los 100 y 1000 kW. Para el cálculo de la energía entregada desde la poza al electrolito es necesario tomar en cuenta además el sistema de entrega de calor, es decir, el sistema de extracción de este y el intercambiador de calor. Se eligió el método de intercambiador de calor externo debido a que se tenía una mayor transferencia y mediante este método es necesaria una menor mantención. Además, se diseñó el intercambiador de calor para obtener el calor posible a suministrar, obteniendo el área y el coeficiente global de transferencia de éste para cada caso de tamaño de poza distinta.

Por otra parte, para cada simulación de extracción de calor se obtuvo el rendimiento energético de la poza, es decir, la razón entre el calor extraído y la radiación incidente. Esto permitió obtener una noción del calor que se aprovecha en esos sistemas. Dependiendo de la temperatura del fluido de la poza, en este estudio la eficiencia obtenida variaba entre el 5 y 16%.

Sin embargo, también se tomó en cuenta la temperatura del fluido de la poza para suministrar el calor. Mientras mayor es la extracción de calor, la temperatura del fluido en la poza disminuye, esto causa que, a pesar de poder tener una extracción grande sin desestabilizar la poza, se debe buscar el límite de esta extracción para tener la temperatura necesaria para calentar el electrolito. Como se vio anteriormente, para temperaturas muy altas, se tiene una extracción de calor menor, por lo que la eficiencia de la poza solar cae. Es por esto que se tiene que buscar un balance entre la temperatura del fluido y la extracción de calor con el fin de que la eficiencia no caiga demasiado. Debido a esto último, se decidió operar la poza con una extracción de calor relativamente alta que implicara tener períodos en que no se tenga la temperatura del fluido necesaria, y en estos casos usar una fuente de calor de apoyo, y así la eficiencia no disminuyera tanto.

Para evaluar lo anterior, se obtuvieron valores de temperatura del fluido de la poza y de la eficiencia de esta última para distintos valores de extracción de calor. Con esto se pudo ver que para valores de temperatura que estuvieran siempre sobre o igual al valor necesario para suplir la demanda energética en todo momento presentaban valores de eficiencia entre el 5 y el 7%, los cuales son bajos para las eficiencias comunes de las pozas solares que se encuentran entre un 10 y 30%. Para valores de temperatura en que fuera menor a la necesaria en ciertos períodos de tiempo se obtuvieron eficiencias entre el 10 y 14%. Esto indica que debe haber un compromiso entre la eficiencia y la temperatura obtenible.

Finalmente en cuanto a la extracción de calor, se generó el modelo de Matlab para una extracción de calor variable en el tiempo en función del flujo máxico del fluido de la poza y del electrolito y del área de transferencia del intercambiador de calor. Se tomó en cuenta el límite de extracción de calor buscado anteriormente para una extracción constante. Con esto se simuló la temperatura a la que se logra llevar al electrolito en función del tiempo, con lo cual se encontraron períodos en que se tenía un exceso de calor suministrado al electrolito y períodos con un déficit, sin embargo, se buscó la extracción que permitiera tener el menor déficit y el mayor aporte térmico, con la máxima eficiencia posible. Así, se obtuvo para una poza de 150×150 m<sup>2</sup>, un flujo máxico de electrolito posible de calentar de 18 kg/s, con una eficiencia de la poza del 14,13%. Para una poza de 100×100 m<sup>2</sup> un flujo máxico del electrolito de 9 kg/s, con una eficiencia del 15,98%. Y para una poza de 70×70 m<sup>2</sup> un flujo del electrolito de 4 kg/s con una eficiencia

de 16,4%. En estos casos el período sin extracción de calor estaba entre un 30 y 60% del tiempo total de extracción. Las eficiencias obtenidas concuerdan con los valores típicos de eficiencia de las pozas solares.

- Factibilidad Económica

También se realizó un estudio de la factibilidad económica de la construcción de esos sistemas en el norte de Chile. Se realizó este estudio para distintas dimensiones de pozas, por lo tanto, diferentes demandas energéticas por parte del electrolito.

En este análisis se puede ver que el costo por inversión es bastante alto en estos proyectos y los por operación y mantención son menores, donde en estos últimos el personal es el que implica los mayores costos.

Calculando los indicadores económicos del VAN y la TIR para el proyecto se obtuvo para la poza de  $150 \times 150 \text{ m}^2$  con un horizonte de 20 años un VAN positivo bastante grande, del orden de los 200 millones, además de una TIR del 39%, también bastante alta. Esto indica que realizar el proyecto para esta poza es conveniente económicamente. Sin embargo, para dimensiones más pequeñas, de  $100 \times 100 \text{ m}^2$  y de  $70 \times 70 \text{ m}^2$ , se obtuvo un VAN negativo, lo que indica que el proyecto no sería factible económicamente para estas dimensiones.

Esto se debe principalmente a que para dimensiones más bajas, se vio que la diferencia entre los ingresos por la venta de energía y de los costos asociados al déficit de entrega de energía en algunos períodos, el cual se debe suplir con un sistema de calderas, es menor. Así, los ingresos no logran compensar los gastos de inversión y costos anuales del sistema de pozas.

Una de las desventajas de la poza solar para esta aplicación, es que se hay una gran parte de la energía generado por parte de la poza que se utiliza en calentar al electrolito más de lo necesario. Esto sucede debido a que se tiene un flujo másico constante de extracción del fluido de la poza, sin embargo, la temperatura de éste varía en función del tiempo, lo que implica temperaturas muy altas en verano que generan un exceso de energía, la cual se suministra de todas formas, pero al no ser necesaria no se vende por lo que no genera ingresos.

Al comparar los costos de la poza estudiada en este trabajo con los de pozas ya construidas, se obtuvo que este caso se encuentra dentro del rango de los costos típicos de pozas solares.

Es importante mencionar que en este trabajo no se toma en cuenta el fenómeno de transferencia de masa por lo que se sobreestiman las temperaturas en la zona de la LCZ, por lo tanto, también se puede estar sobreestimando la posible extracción de calor de la poza. Esto podría generar que la rentabilidad del proyecto cambie. Sin embargo, en una primera instancia de estudio, para dimensiones grandes de la poza, el proyecto sería rentable.

Finalmente, a partir de este trabajo se puede concluir que la construcción de una poza en el norte de Chile y la utilización de ésta para proveer calor de procesos, es factible técnica y económicamente. Debido a la alta radiación presente en esta ubicación se obtienen altas temperaturas en la poza lo que implica mayor capacidad de almacenamiento de energía, esto genera que la construcción de estos sistemas sea conveniente en Chile. En cuanto a la utilización de la energía generada para suministrar calor al proceso de electro-obtención en la minería del cobre, se puede ver que para cierto rango de dimensión de poza el

proyecto puede ser rentable, en este caso se obtuvo que para pozas mayores a una superficie de  $140 \times 140$  m<sup>2</sup> el proyecto es rentable, obteniendo una mayor rentabilidad para pozas de mayor superficie. Es importante mencionar que el precio de venta de energía utilizado coincide con el precio al cual se vende la energía comúnmente con sistema de calderas utilizando petróleo, por lo que, al utilizar las pozas solares, además de entregar beneficios medio ambientales, no genera un costo adicional para la minera involucrada. Por otra parte, mediante la implementación de este proyecto sería posible participar en la venta de bonos de carbono para generar ingresos adicionales, dependiendo de cómo se desarrolle este último mercado.

## 6. Bibliografía

- [1] Ruskowitz, J. A., Suárez, F., Tyler, S. W. & Childress, A. E. (2014). Evaporation suppression and solar energy collection in a salt-gradient solar pond. *Solar Energy*, 99, 36-46.
- [2] Velmurugan, V. & Srithar, K. (2008). Prospects and scopes of solar pond: A detailed review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2253-2263.
- [3] Leblanc, J., Akbarzadeh, A., Andrews, J., Lu, H. & Golding, P. (2011). Heat extraction methods from salinity-gradient solar ponds and introduction of a novel system of heat extraction for improved efficiency. *Solar Energy*, 85, 3103-3142.
- [4] Kurt, H., Ozkaymak, M. & Binark, A. K. (2006). Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt gradient solar-pond performance under simulated solar-radiation. *Applied Energy*, 83, 324-342.
- [5] Suárez, F., Tyler, S. W. & Childress, A. E. (2010). A fully coupled, transient double-diffusive convective model for salt-gradient solar ponds. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53, 1718-1730.
- [6] Kaushika, N. D. (1984). Solar ponds: A review. *Energy convers*, 24, 353-376.
- [7] R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot. (2006). *Transport Phenomena*, Second Edition.
- [8] R. Siegel, J.R. Howell. (1992). *Thermal radiation heat transfer*, Third edition.
- [9] R. Boudhiaf, A.B. Moussa, M. Baccar. (2012). A Two-Dimensional Numerical Study of Hydrodynamic, Heat and Mass Transfer and Stability in a Salt Gradient Solar Pond. *Energies* 5, 3986-4007.
- [10] J. Lamoureux. (2003). *Heat Transfer in Outdoor Aquaculture Ponds*. Tesis de Magister. LSU, Louisiana, Estados Unidos.
- [11] S.P. Sukhatme, J.K. Nayak. (2008). *Solar energy, Principles of thermal collection and storage*, Third edition.
- [12] Ministerio de energía, Departamento de geofísica, Universidad de Chile. Explorador de energía solar. Recuperado de <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Solar2/>
- [13] R. Mansour, C.Nguyen, N. Galanis. (2005). Transient heat and mass transfer and long-term stability of a salt-gradient solar pond. *Mechanics Research Communications* 33, 233-249.
- [14] J.P. Holman. (1998). *Transferencia de calor*, Octava edición.
- [15] A. Rabl, C.E. Nielsen. (1974). Solar ponds for space heating. *Solar Energy*, Vol 17, pp 1-12.

- [16] Huseyin Kurt, Mehmet Ozkaymak, A. Korhan. (2005). Experimental and numerical analysis of sodium-carbonate salt gradient solar-pond performance under simulated solar-radiation. *Applied Energy* 83, 324–342.
- [17] Aynur Senol. (2013). Solvation-based vapour pressure model for (solvent + salt) systems in conjunction with the Antoine equation. *J. Chem. Thermodynamics* 67, 28–39.
- [18] D. Meranda, W.F. Furfer. (1977). Elevation of the Boiling Point of Water by Salts at Saturation: Data and Correlation. *Journal of Chemical and Engineering Data*, Vol. 22, No. 3.
- [19] D. Fink, H. Beaty, J. Carrol. (1981). Manual práctico de electricidad para ingenieros.
- [20] Alfa-laval. Heat exchanger guide, third edition.
- [21] R.K. Sinnott. (1983). Chemical engineering, Volume 6: Chemical engineering design, third edition.
- [22] T.A. Newell, R.G. Cowie, J. M. Upper, M.K. Smith, G.L. Cler. (1990). Construction and operation activities at the University of Illinois salt gradient solar pond. *Solar Energy* Vol. 45, No. 4, pp. 231-239.
- [23] A. Kumar, V. Kishore. (1998). Construction and operational experience of a 6000 m<sup>2</sup> solar pond at Kutch, India. *Solar Energy* Vol. 65, No. 4, pp. 237–249.
- [24] K.R. Agha. (2008). The thermal characteristics and economic analysis of a solar pond coupled low temperature multi stage desalination plant. *Solar Energy* 83, 501–510.
- [25] R.A. Haj Khalil, B.A. Jubran't, N.M. Faqir. (1995). Optimization of solar pond electrical power generation system. *Energy Conuers. Mgmt Vol. 38 No. 8, pp. 787-798.*
- [26] Gobierno de Chile, Superintendencia de servicios sanitarios. Agua de Antofagasta. Recuperado de [http://www.siss.gob.cl/577/articles-4497\\_Antofagasta\\_G2\\_Sep2014.pdf](http://www.siss.gob.cl/577/articles-4497_Antofagasta_G2_Sep2014.pdf)
- [27] F.B. Alagao, A. Akbarzadeh, P.W. Johnson. (1994). The design, construction, and initial operation of a closed-cycle, salt-gradient solar pond. *Solar Energy*, Vol. 53, No. 4, pp. 343-351.
- [28] Instituto de Asuntos Públicos de la Universidad de Chile, Centro de Innovación en Energía de la Universidad Técnica Federico Santa María. (2008). Aporte potencial de Energías Renovables No Convencionales y Eficiencia Energética a la Matriz Eléctrica, 2008-2025.
- [29] Servicio de impuestos internos. Preguntas frecuentes, impuesto de primera categoría. Recuperado de [http://www.sii.cl/preguntas\\_frecuentes/renta/001\\_002\\_4708.htm](http://www.sii.cl/preguntas_frecuentes/renta/001_002_4708.htm)
- [30] Banco de Chile. Tasas y comisiones Banco de Chile. Recuperado de <http://ww3.bancochile.cl/wps/wcm/connect/personas/portal/ayuda/tasascomisionesbchile>

[31] CDEC-SING. Resumen ejecutivo de la operación. Recuperado de [http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck\\_resumen\\_ejec\\_pub.inf\\_resumen](http://cdec2.cdec-sing.cl/pls/portal/cdec.pck_resumen_ejec_pub.inf_resumen)

[32] V.V.N. Kishore, A. Kumar. (1996). Solar pond: an exercise in development of indigenous technology at Kutch, India. *Energy for Sustainable Development, Volume III No. 1.*

[33] H.Z. Tabor, B. Doron. (1990). The beith ha'arava 5 MW(e) solar pond power plant (SPPP)--Progress report. *Solar Energy Vol. 45. No. 4. 1-247-253.*



## Anexos

### Anexo A: Programa en matlab

En primer lugar se muestra el programa para la extracción de calor constante desde la poza solar.

```
function []=Balancefinal(ap,lp,pp,eucz,encz,elcz,capncz,t,tiextraccion,calor,deltaTretorno)
```

```
t=t; %horas
ap=ap; % m
lp=lp; % m
pp=pp; % m
zucz=eucz; % m
zncz=eucz+encz; % m
zlcz=eucz+encz+elcz; % m
```

```
Rh=0.3; %%
dt=1; %Delta t
di=encz/capncz; % espesor capas NCZ
```

```
Ts=24; % Temperatura inicial ucz [°C]
Tl=24; % Temperatura inicial ncz [°C]
Ti=24; % Temperatura inicial ncz [°C]
Tn=24; % Temperatura inicial ncz [°C]
Tl=24; % Temperatura inicial lcz [°C]
```

```
%-----
% Constantes
%-----
r=0.06; % factor de reflexión
tetar=0.354; % rad, =20.3°
```

```
Lv=2257000; % Calor latente agua [J/kg]
Cpa=1012; % Calor específico aire [J/kgC]
Patm=101.325; % Presión atmosférica [kPa]
ew=0.97; % Emisividad agua
tau=5.67*10^(-8); % Cte. de Stefan Boltzmann [W/m2K4]
```

```
Ug=0.503; % Conduct tierra [W/m2C], Tg a 1 metro
Tg=10; % Temperatura tierra [°C]
```

```
Cp=4180; % Calor específico agua [J/kgC]
rho=1000; % Densidad [kg/m3]
vol=ap*lp*pp; % Volumen poza
volucz=ap*lp*eucz; % Volumen UCZ
vollcz=ap*lp*elcz; % Volumen LCZ
volncz=ap*lp*encz; % Volumen NCZ
```

```
ki=0.61; % Conductividad fluido para NCZ
```

```
%-----
% Datos meteorológicos
%-----
```

```

Rad=xlsread('radiacion 3 años.xlsx');
V=xlsread('viento 3 años.xlsx');
Ta=xlsread('temperatura 3 años.xlsx');

%-----
% Vectores auxiliares
%-----

Tucz=zeros(t,1);% Vector auxiliar para graficar temperatura UCZ
tvec=zeros(t,1); % Vector auxiliar para graficar tiempo
Tamb=zeros(t,1); % Vector auxiliar para graficar temp ambiente
Tncz=zeros(capncz+2,1); % Vector para tener temperatura NCZ para cada capa en tiempo i
Tncz1=zeros(capncz+2,1); % Vector para tener temperatura NCZ para cada capa en tiempo i+1
Tlcz=zeros(t,1); % Vector auxiliar para graficar temperatura LCZ
zvecncz=zeros(capncz+2,1); %% Vector auxiliar para graficar altura ncz
qabstotncz=zeros(capncz,1); %% Vector auxiliar para calor absorbido por capa en NCZ
RadeF=zeros(21900,1); % Vector para sacar la eficiencia para 2,5 años
Calorext=zeros(t,1); % Vector de calor extraído en función del tiempo
Telectrolito=zeros(t,1); % Vector de temperatura electrolito en función del tiempo
Tretornolcz=zeros(t,1); % Vector temperatura retorno a la poza
qevap=zeros(t,1);
Qsumministrado=zeros(1,t);
Qven=zeros(t,1);
Qfaltante=zeros(t,1);

for a=1:(capncz+2) %Para evaluar la temperatura inicial de todas las capas de NCZ
    Tncz(a)=24;
end

for g=0:(capncz+1) %Para hacer vector de altura de la NCZ
    zvecncz(g+1)=di*g;
end

for b=1:21900 %Para evaluar la radiación en el vector para la eficiencia
    RadeF(b)=Rad(b)*3600; %*3600 para dejarlo en [J/m2] (asumo que se tiene esa radiación para toda 1 hr)
end

%-----
% Balance transiente
%-----
for i=1:t

    Tncz(1)=Ts;
    Tncz(capncz+2)=Tl;

%-----
% UCZ
%-----

SU=0; %Salinidad UCZ
rhoU=1088.6*[1-5.24*10^(-4)*(Ts-60)+6.82*10^(-3)*(SU-0.15)]; %Densidad UCZ [kg/m3]

%Calor absorbido

```

```

qabsU=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*0.032/cos(tetar)*exp(-0.032*zucz/cos(tetar))+0.193*0.45/cos(tetar)*exp(-
0.45*zucz/cos(tetar))+0.167*3/cos(tetar)*exp(-3*zucz/cos(tetar))+0.179*35/cos(tetar)*exp(-
35*zucz/cos(tetar))]/(1/3600); %Calor absorbido [J/hm3]
qinfU=(1-r)*Rad(i)*0.224*3600; %Radiación infrarroja absorbida en el 1er cm, un 22,4% de la incidente

%Calor por evaporación
Ps=exp(16.2886-3816.44/(Ts+273-46.13)); %Presión de vapor del agua a la temperaturad la superficie [kPa]
Pa=Rh*exp(16.2886-3816.44/(Ta(i)+273-46.13)); %Presión parcial de vapor de agua a temperatura ambiente
[kPa]

hc=[5.7+3.8*V(i)]/(1/3600); %Coef conduct [J/hm2C]

qev=Lv*hc*(Ps-Pa)/(1.6*Cpa*Patm); %Calor por evaporación [J/hm2]

%Calor por convección
qconv=hc*(Ts-Ta(i)); %Calor por convección [J/hm2]

%Calor por radiación
Tsky=Ta(i)+(0.55+0.704*(Pa^0.5))^0.25; %Temperatura cielo [°K]

grad=[ew*tau*((Ts+273.15)^4-(Tsky+273.15)^4)]/(1/3600); %Calor por radiación [J/hm2]

%Calor por conducción
qcondU=[Ug*(Ts-Tg)]/(1/3600); %Calor por conducción [J/hm2]

%Calor desde la NCZ
qcondncz=[ki*(T1-Ts)]/(1/3600);

qtotalU=qabsU*ap*lp*eucz+(-qev-qconv-grad)*ap*lp-
qcondU*(2*ap*eucz+2*lp*eucz)+qcondncz*(ap*lp)+qinfU*ap*lp; %Calor total [J/hm2]

TsI=(dt/(Cp*volucz*rhoU))*(qtotalU)+Ts; %Temperatura en instante después [°C]

%-----
%NCZ
%-----
for j=2:(capncz+1)

SN=(SU+1.14)/100;
rhoN=1088.6*[1-5.24*10^(-4)*(Tncz(j)-60)+6.82*10^(-3)*(SN-0.15)];
volnczj=di*ap*lp;

qabsN=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*0.032/cos(tetar)*exp(-0.032*(eucz+(j-
1)*di)/cos(tetar))+0.193*0.45/cos(tetar)*exp(-0.45*(eucz+(j-1)*di)/cos(tetar))+0.167*3/cos(tetar)*exp(-3*(eucz+(j-
1)*di)/cos(tetar))+0.179*35/cos(tetar)*exp(-35*(eucz+(j-1)*di)/cos(tetar))]/(1/3600); %Calor absorbido [J/hm3]

qcondN=[Ug*(Tncz(j)-Tg)]/(1/3600); %Calor por conducción [J/hm2]

qsup=[ki*(Tncz(j)-Tncz(j-1))/di]/(1/3600);

qinf=[ki*(Tncz(j+1)-Tncz(j))/di]/(1/3600);

```

```

qtotalN=qabsN*(di*ap*lp)-qcondN*(2*di*ap+2*di*lp)-qsup*(ap*lp)+qinf*(ap*lp);

T1l=(dt/(Cp*volnczj*rhoN))*(qtotalN)+Tncz(j);

Tn=Tncz(j); %Se usa para tener Tn que es el que se usa en la conducción para la NCZ

if j==2
    T1=Tncz(j); %Condición para el T1 que se usa para la UCZ
end

Tncz1(j)=T1l; % vector para guardar temp instante después (Tncz(i+1)), al final del for i se reemplaza Tncz por
Tncz1
qabstotncz(j-1)=qabsN; % vector para guardar calor abs en cada capa
end

%-----
%LCZ
%-----
SL=0.25;
rhoL=1088.6*[1-5.24*10^(-4)*(Tl-60)+6.82*10^(-3)*(SL-0.15)];

qabsL=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*0.032/cos(tetar)*exp(-0.032*zlcz/cos(tetar))+0.193*0.45/cos(tetar)*exp(-
0.45*zlcz/cos(tetar))+0.167*3/cos(tetar)*exp(-3*zlcz/cos(tetar))+0.179*35/cos(tetar)*exp(-
35*zlcz/cos(tetar))]/(1/3600); %Calor absorbido [J/hm3]

Qrem=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*exp(-0.032*zlcz/cos(tetar))+0.193*exp(-0.45*zlcz/cos(tetar))+0.167*exp(-
3*zlcz/cos(tetar))+0.179*exp(-35*zlcz/cos(tetar)))]/(1/3600); %Calor absorbido [J/hm2]

qabsrem=Qrem; %[W/m2]

qcondL=[Ug*(Tl-Tg)]/(1/3600); %Calor por conducción [J/hm2]

qcondsuelo=[Ug*(Tl-Tg)]/(1/3600);

qncz=[ki*(Tl-Tn)/di]*3600;

flujo=calor/(Cp*deltaTretorno);

if i<tiextraccion
    qextraido=0; %Se empieza a extraer desde el 6to día
    qretorno=0;
else
    qext=flujo*Cp*Tl; %[W]
    qextraido=qext*3600;

    qret=flujo*Cp*(Tl-deltaTretorno);
    qretorno=qret*3600;
end

qtotalL=qabsL*(elcz*ap*lp)-qcondL*(2*elcz*ap+2*elcz*lp)-qcondsuelo*(ap*lp)-
qncz*(ap*lp)+qabsrem*(ap*lp)-qextraido+qretorno;

T1l=(dt/(Cp*volncz*rhoL))*(qtotalL)+Tl;

```

```

%Temperatura instante después 3 zonas
Tncz1(1)=Ts1;
Tncz(capncz+2)=Tl1;
Ts=Ts1;
Tncz=Tncz1;
Tl=Tl1;

%-----
% Vectores aux
%-----
tvec(i)=i;
Tucz(i)=Ts;
Tlcz(i)=Tl;
Tamb(i)=Ta(i);

end

%UCZ
Uabs=qabsU/3600;
Utot=qttotalU/3600;
Tsfinal=Ts;

%NCZ
qancz=qabstotncz*di/3600;
Nabs=[sum(qabstotncz)]/3600; %Suma calor absorbido de todas las capas de la NCZ
Ntot=qttotalN/3600;
Tnfinal=Tncz;
qabsnczsuperf=sum(qancz);
b=xlswrite('NCZ1,5mes.xlsx',Tncz,1,'A1')
c=xlswrite('zNCZ.xlsx',zvecncz,1,'A1')

%LCZ
Labs=qabsL/3600;
Ltot=qttotalL/3600;
Tlfinal=Tl;
PTlcz=median(Tlcz);

Tucz;
tvec;

%%%%%%%% Porcentajes de absorción %%%%%%%%%
Porcqrem=100*Qrem/((1-r)*Rad(t)*3600);
Porqucz=100*(Uabs*eucz+qinfU/3600)/((1-r)*Rad(t));
Porqcncz=100*qabsnczsuperf/((1-r)*Rad(t));
Porqlcz=100*Labs*elcz/((1-r)*Rad(t));
Qabsfinal=[Uabs*eucz+qabsnczsuperf+Labs*elcz+Qrem/3600+qinfU/3600];
Porcabs=100*Qabsfinal/((1-r)*Rad(t));

%%%%%%%% Eficiencia%%%%%%%%

Radeficiencia=sum(Radef); %[J/m2]
Radefot=Radeficiencia*ap*lp; %[J]
Calorext=(qextraido-qretorno)*(21900-tiextraccion); %[J]

```

```

Eficiencia=Calorext/Radefot
Tmax=max(Tlcz)
Tmin=min(Tlcz)

```

```

%% %% GRÁFICOS %% %%

```

```

%Para graficar Tncz v/s Z
Tncz(1)=Ts;
Tncz(capncz+2)=Tl;

```

```

figure(1)
plot(Tncz,zvecncz)
%title('Temperatura NCZ')
ylabel('Profundidad NCZ [m]')
xlabel('Temperatura [°C]')

```

```

figure (2)
plot(tvec,Tamb,'g')
hold on
plot(tvec,Tucz,'b')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('Tiempo [hrs]')
legend('Temperatura ambiente','Temperatura UCZ')

```

```

figure(3)
plot(tvec,Tucz,'b')
%title('Temperatura UCZ y LCZ')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('Tiempo [hrs]')
hold on
plot(tvec,Tlcz,'r')
legend('Temperatura UCZ','Temperatura LCZ')

```

```

end

```

A continuación se muestra el programa para la extracción de calor variable en el tiempo. Se muestra desde la iteración del “Balance transiente” debido a que el código anterior es el mismo que el programa anterior.

```

%-----
%Balance transiente
%-----

```

```

for i=1:t

```

```

Tncz(1)=Ts; %temperatura capa 1 ncz es la temp de ucz (Ts)
Tncz(capncz+2)=Tl; %temperatura de última capa ncz es la temp de lcz (Tl)

```

```

%-----
%UCZ
%-----

```

```

SU=0; %Salinidad UCZ
rhoU=1088.6*[1-5.24*10^(-4)*(Ts-60)+6.82*10^(-3)*(SU-0.15)]; %Densidad UCZ [kg/m3]

```

```

% Calor absorbido
qabsU=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*0.032/cos(tetar)*exp(-0.032*zucz/cos(tetar))+0.193*0.45/cos(tetar)*exp(-
0.45*zucz/cos(tetar))+0.167*3/cos(tetar)*exp(-3*zucz/cos(tetar))+0.179*35/cos(tetar)*exp(-
35*zucz/cos(tetar))]/(1/3600); % Calor absorbido [J/hm3]
qinfU=(1-r)*Rad(i)*0.224*3600; % Radiación infrarroja absorbida en el 1er cm, un 22,4% de la incidente [J/hm2]

% Calor por evaporación
Ps=exp(16.2886-3816.44/(Ts+273-46.13)); % Presión de vapor del agua a la temperatura la superficie [kPa]
Pa=Rh*exp(16.2886-3816.44/(Ta(i)+273-46.13)); % Presión parcial de vapor de agua a temperatura ambiente
[kPa]

hc=[5.7+3.8*V(i)]/(1/3600); % Coef convectivo [J/hm2C]

qev=Lv*hc*(Ps-Pa)/(1.6*Cpa*Patm); % Calor por evaporación [J/hm2]

% Calor por convección
qconv=hc*(Ts-Ta(i)); % Calor por convección [J/hm2]

% Calor por radiación
Tsky=Ta(i)+(0.55+0.704*(Pa^0.5))^0.25; % Temperatura cielo [°C]

qrad=[ew*tau*((Ts+273.15)^4-(Tsky+273.15)^4)]/(1/3600); % Calor por radiación [J/hm2]

% Calor por conducción
qcondU=[Ug*(Ts-Tg)]/(1/3600); % Calor por conducción [J/hm2]

% Calor desde la NCZ
qcondncz=[ki*(T1-Ts)]/(1/3600); % calor desde la ncz por conducción [J/hm2]

qtotalU=qabsU*ap*lp*eucz+(-qev-qconv-qrad)*ap*lp-
qcondU*(2*ap*eucz+2*lp*eucz)+qcondncz*(ap*lp)+qinfU*ap*lp; % Calor total [J/h]

Ts1=(dt/(Cp*volucz*rhoU))*(qtotalU)+Ts; % Temperatura en instante después [°C]

%-----
% NCZ
%-----

for j=2:(capncz+1)

SN=(SU+1.14)/100; % Salinidad ncz
rhoN=1088.6*[1-5.24*10^(-4)*(Tncz(j)-60)+6.82*10^(-3)*(SN-0.15)]; % Densidad ncz en función de z [kg/m3]
volnczj=di*ap*lp; % Volumen de cada capa de ncz [m3]

qabsN=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*0.032/cos(tetar)*exp(-0.032*(eucz+(j-
1)*di)/cos(tetar))+0.193*0.45/cos(tetar)*exp(-0.45*(eucz+(j-1)*di)/cos(tetar))+0.167*3/cos(tetar)*exp(-3*(eucz+(j-
1)*di)/cos(tetar))+0.179*35/cos(tetar)*exp(-35*(eucz+(j-1)*di)/cos(tetar))]/(1/3600); % Calor absorbido [J/hm3]

qcondN=[Ug*(Tncz(j)-Tg)]/(1/3600); % Calor por conducción [J/hm2]

qsup=[ki*(Tncz(j)-Tncz(j-1))/di]/(1/3600); % Calor por conducción a la ucz [J/hm2]

```

```

qinf=[ki*(Tncz(j+1)-Tncz(j))/di]/(1/3600); %Calor por conducción desde la lcz [J/hm2]

qtotalN=qabsN*(di*ap*lp)-qcondN*(2*di*ap+2*di*lp)-qsup*(ap*lp)+qinf*(ap*lp); %Calor total [J/h]

Ti1=(dt/(Cp*volnczj*rhoN))*(qtotalN)+Tncz(j); %temperatura instante después

Tn=Tncz(j); %Se usa para tener Tn que es el que se usa en la conducción para la NCZ

if j==2
    T1=Tncz(j); %Condición para el T1 que se usa para la UCZ
end

Tncz1(j)=Ti1; %vector para guardar temp instante después (Tncz(i+1))
qabstotncz(j-1)=qabsN; %vector para guardar calor abs en cada capa
end

%-----
%LCZ
%-----

SL=0.25; %Salinidad lcz
rhoL=1088.6*[1-5.24*10^(-4)*(Tl-60)+6.82*10^(-3)*(SL-0.15)]; %densidad lcz [kg/m3]

qabsL=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*0.032/cos(tetar)*exp(-0.032*zlcz/cos(tetar))+0.193*0.45/cos(tetar)*exp(-
0.45*zlcz/cos(tetar))+0.167*3/cos(tetar)*exp(-3*zlcz/cos(tetar))+0.179*35/cos(tetar)*exp(-
35*zlcz/cos(tetar))]/(1/3600); %Calor absorbido [J/hm3]

Qrem=[(1-r)*Rad(i)*(0.237*exp(-0.032*zlcz/cos(tetar))+0.193*exp(-0.45*zlcz/cos(tetar))+0.167*exp(-
3*zlcz/cos(tetar))+0.179*exp(-35*zlcz/cos(tetar))]/(1/3600); %Calor absorbido en el fondo [J/hm2]

qabsrem=Qrem; % [W/m2]

qcondL=[Ug*(Tl-Tg)]/(1/3600); %Calor por conducción [J/hm2]

qcondsuelo=[Ug*(Tl-Tg)]/(1/3600); %Calor por conducción al suelo [J/hm2]

qncz=[ki*(Tl-Tn)/di]*3600; %Calor por conducción a la ncz [J/hm2]

%-----Extracción de calor-----%
B=exp(U*Aic*(1/(flujo*Cp)-1/(flujoelec*Cpe)));
Q=(Tl-Telentrada)*(1-B)/(1/(flujoelec*Cpe)-B/(flujo*Cp)); %Calor en función del tiempo según Tlcz,
Tentradaelec, área del IC y U del IC [W]
Tretorno=Tl-Q/(Cp*flujo); %Temperatura de retorno a la poza [°C]

if i<tiextraccion
    qextraido=0; %condición para extraer calor desde un tiempo determinado
    Q=0;
    Telectrolito(i)=Telentrada;
    Tretorno=Tl;
else
    qextraido=Q*3600; %Calor extraído en [J/h]
end

```



```

Calorext(i)=Q;
Telsalida=Q/(Cpe*flujoelec)+Telentrada; %Temperatura de salida del electrolito [°C]
Telectrolito(i)=Telsalida;
Tretornolcz(i)=Tretorno;
Qsumministrado(i)=Q*3600; % [J]
%-----%

qtotalL=qabsL*(elcz*ap*lp)-qcondL*(2*elcz*ap+2*elcz*lp)-qcondsuelo*(ap*lp)-
qncz*(ap*lp)+qabsrem*(ap*lp)-qextraido; %calor total lcz [J/h]

Tl1=(dt/(Cp*vollcz*rhoL))*(qtotalL)+Tl; %temperatura instante después

%Temperatura instante después 3 zonas
Tncz1(1)=Ts1;
Tncz(capncz+2)=Tl1;
Ts=Ts1;
Tncz=Tncz1;
Tl=Tl1;

%-----%
% Vectores aux
%-----%
tvec(i)=i;
Tucz(i)=Ts;
Tlcz(i)=Tl;
Tamb(i)=Ta(i);
qevap(i)=qev; % [J/hm2]

end

%UCZ

Uabs=qabsU/3600;
Utot=qtotalU/3600;
Tsfinal=Ts;
%Qevaporacion=qevap*ap*lp; % [J/h]
%Qevtotal=sum(Qevaporacion*1) % [J] Es *1 por que es para 1 hora
%masaev=Qevtotal/Lv
Qevaporacion=qevap*ap*lp/3600; % [W]
Qevprom=median(Qevaporacion)
flujoev=Lv/Qevprom
masaevano=flujoev*365*24*3600 % [kg]

%NCZ

qancz=qabstotncz*di/3600;
Nabs=[sum(qabstotncz)]/3600; %Suma calor absorbido de todas las capas de la NCZ
Ntot=qtotalN/3600;
Tnfinal=Tncz;
qabsnczsuperf=sum(qancz);

%LCZ

```

```

Labs=qabsL/3600;
Ltot=qttotalL/3600;
Tlfinal=Tl;
PTlcz=median(Tlcz);

Tucz;
tvec;

Porcqrem=100*Qrem/((1-r)*Rad(t)*3600);
Porqcucz=100*(Uabs*eucz+qinfU/3600)/((1-r)*Rad(t));
Porcqncz=100*qabsnczsuperf/((1-r)*Rad(t));
Porcqlcz=100*Labs*elcz/((1-r)*Rad(t));
Qabsfinal=[Uabs*eucz+qabsnczsuperf+Labs*elcz+Qrem/3600+qinfU/3600];
Porcabs=100*Qabsfinal/((1-r)*Rad(t));

%% % % % % % Eficiencia % % % % %

Redeficiencia=sum(Radef); % [J/m2]
Radef tot=Radeficiencia*ap*lp; % [J]
Calorextraido=(qextraido)*(21900-tiextraccion); % [J]
Eficiencia=max(Calorextraido/Radef tot)
Tmax=max(Tlcz)
Tmin=min(Tlcz)
Qmax=max(Calorex t)

% Venta energía

for i=1:t
    if Qsumministrado(i)>(141200*3600)
        Qven(i)=141200*3600;
    else
        Qven(i)=Qsumministrado(i);
    end
end

for i=1:t
    if Qsumministrado(i)<(141200*3600)
        Qfaltante(i)=141200*3600-Qsumministrado(i);
    else
        Qfaltante(i)=0;
    end
end

if t>8721

    for i=1:8721
        Qven(i)=0;
        Qfaltante(i)=0;
    end
end

Qvendido=sum(Qven)
Qfalto=sum(Qfaltante)

```

```

%%%%

%Para graficar Tncz v/s Z
Tncz(1)=Ts;
Tncz(capncz+2)=Tl;

figure(1)
plot(Tncz,zvecncz)
ylabel('Profundidad NCZ [m]')
xlabel('Temperatura [°C]')

figure (2)
plot(tvec,Tamb,'g')
hold on
plot(tvec,Tucz,'b')
title('Temperatura UCZ y ambiente')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('Tiempo [hrs]')
legend('Temperatura ambiente','Temperatura UCZ')

figure(3)
plot(tvec,Tucz,'b')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('Tiempo [hrs]')
hold on
plot(tvec,Tlcz,'r')
hold on
plot(tvec,Telectrolito,'g')
hold on
plot(tvec,Tretornolcz,'m')
legend('Temperatura UCZ','Temperatura LCZ','Temperatura electrolito','Temperatura de retorno')

figure(4)
plot(tvec,Calorext,'m')
ylabel('Calor extraído [W]')
xlabel('Tiempo [hrs]')

figure(5)
plot(tvec,Telectrolito,'g')
ylabel('Temperatura [°C]')
xlabel('Tiempo [hrs]')

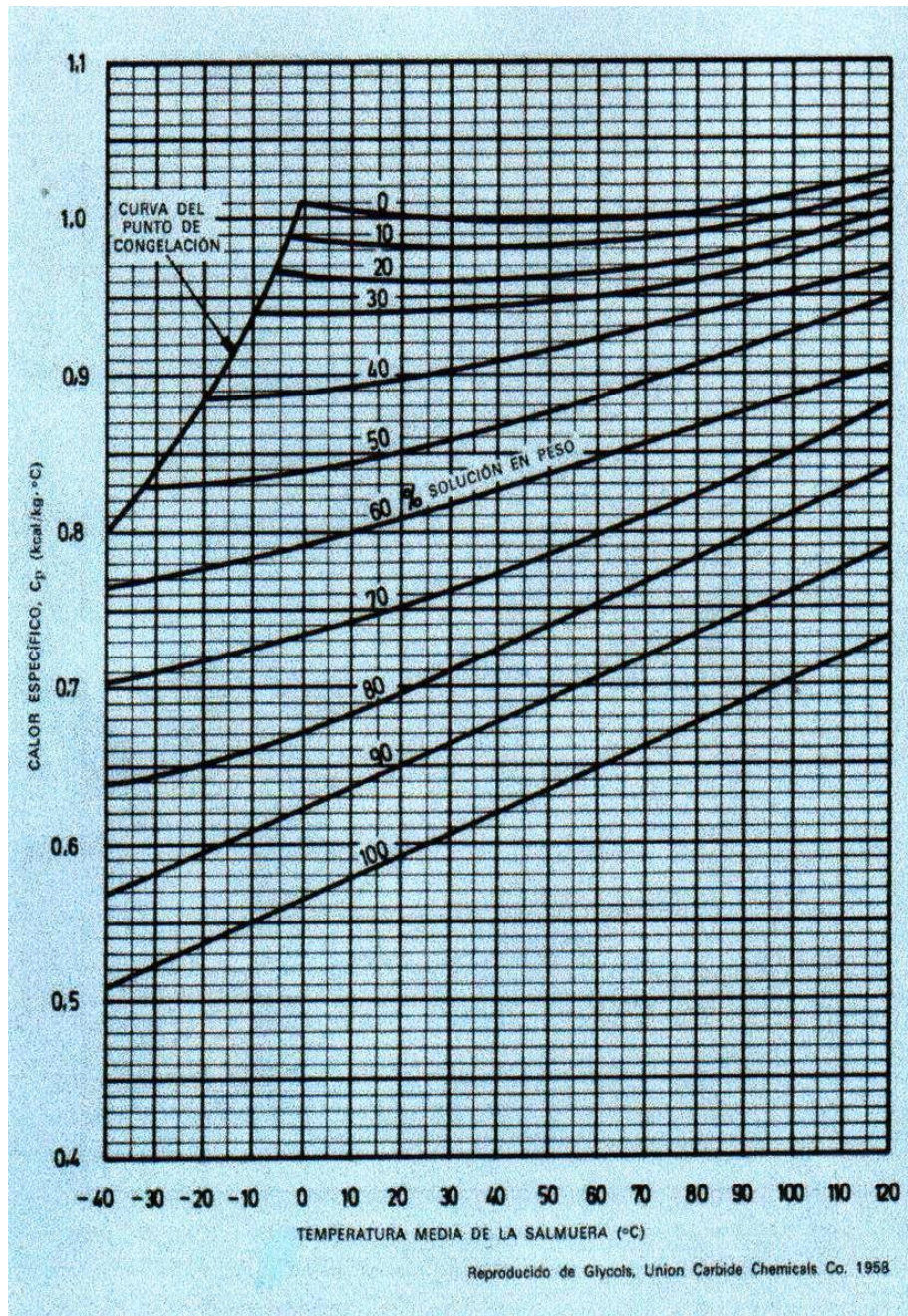
end

```

**Anexo B: Radiación, velocidad del viento y temperatura ambiente cada una hora en Lat 22,81°S; Long 69,52°O**

Fecha [A,M,D,H]	Radiación [W/m2]	Viento [m/s]	Temperatura [°C]
2010,01,01,00,00,00,	0,00	3,60	13,40
2010,01,01,01,00,00,	0,00	2,30	13,70
2010,01,01,02,00,00,	0,00	3,80	13,10
2010,01,01,03,00,00,	0,00	4,10	12,60
2010,01,01,04,00,00,	0,00	3,70	12,20
2010,01,01,05,00,00,	0,00	3,20	12,10
2010,01,01,06,00,00,	17,90	1,60	11,30
2010,01,01,07,00,00,	197,70	0,80	12,60
2010,01,01,08,00,00,	437,50	2,20	15,30
2010,01,01,09,00,00,	674,30	4,00	18,70
2010,01,01,10,00,00,	875,80	2,90	20,00
2010,01,01,11,00,00,	1018,20	2,80	21,70
2010,01,01,12,00,00,	1107,30	2,30	23,90
2010,01,01,13,00,00,	1118,30	1,50	25,60
2010,01,01,14,00,00,	1044,70	2,40	26,40
2010,01,01,15,00,00,	921,00	3,30	27,50
2010,01,01,16,00,00,	737,60	8,00	27,10
2010,01,01,17,00,00,	506,30	7,70	25,30
2010,01,01,18,00,00,	261,00	7,50	24,10
2010,01,01,19,00,00,	48,00	6,80	21,60
2010,01,01,20,00,00,	0,00	3,70	18,80
2010,01,01,21,00,00,	0,00	3,50	16,50
2010,01,01,22,00,00,	0,00	1,90	15,00
2010,01,01,23,00,00,	0,00	1,80	13,90
2010,01,02,00,00,00,	0,00	3,60	13,30

Anexo C: Gráfico de calor específico en función de la temperatura y concentración salina para el agua salina [14]



## Anexo D: Planilla Excel para corroborar cálculos de área del IC

Datos ingresados		Temperaturas calculadas	
TICZ=	80 °C	Tretorno=	58,10 °C
telentrada=	45 °C	telsalida=	64,47 °C
U=	1300 W/m <sup>2</sup> K		
A=	90 m <sup>2</sup>		
<b>Cálculos</b>			
Factor	-7,85965E-07	B=	0,91214359
Factor 1	2,09961E-06	Q=	1464,54753 kW
		De la expresión obtenida	
		dt1=	15,53 °C
		dt2=	13,10 °C
		Dtlog=	14,2839028 °C
NUTpoza=	1,749401914	Q=	1671216,63 W
NUTElec=	1,841359773	(como UA Delta T)	
Numero de unidades de transferencia, limitado a 4			



## Anexo E: Flujo de caja para poza de 150×150 m<sup>2</sup>

Año	-1	0	1	2	3	4
Ingresos	\$ -	\$ -	\$ 289.000.000	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333
Costos Fijos	\$ -	\$ -	\$ 169.280.293	\$ 169.851.751	\$ 170.423.210	\$ 170.994.668
Costo variable	\$ -	\$ -	\$ 85.541.609	\$ 38.493.724	\$ 38.493.724	\$ 38.493.724
Ganancias/Pérdidas de capital	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Depreciaciones legales	\$ -	\$ -	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184
Pérdidas del ejercicio anterior	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 56.721.084	\$ -	\$ -
Utilidad antes de impuestos	\$ -	\$ -	\$ 32.774.915	\$ 74.663.590	\$ 130.813.216	\$ 130.241.757
Impuesto de primera categoría	\$ 0	\$ 0	\$ 7865980	\$ 19039215	\$ 35319568	\$ 35165274
Utilidad después de impuestos	\$ -	\$ -	\$ 24.908.935	\$ 55.624.375	\$ 95.493.647	\$ 95.076.483
Depreciaciones legales	\$ -	\$ -	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184
Pérdidas del ejercicio anterior	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 56.721.084	\$ -	\$ -
Ganancias/Pérdidas de capital	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Flujo de caja operacional	\$ -	\$ -	\$ 26.312.119	\$ 113.748.643	\$ 96.896.831	\$ 96.479.667
Inversión	-\$ 543.904.953	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Valor residual de los activos	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Capital de trabajo	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Recuperación de capital de trabajo	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Préstamos	\$ 543.904.953	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
Cuotas	\$ -	\$ -	\$ 83.033.203	\$ 83.033.203	\$ 83.033.203	\$ 83.033.203
Flujo de capitales	\$ -	\$ -	\$ 83.033.203	\$ 83.033.203	\$ 83.033.203	\$ 83.033.203
Flujo de caja	\$ -	\$ -	\$ 56.721.084	\$ 30.715.439	\$ 13.863.628	\$ 13.446.463

	5	6	7	8	9	10	11	12
\$	341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333
-\$	171.566.127	-\$ 172.137.586	-\$ 172.709.044	-\$ 173.280.503	-\$ 173.851.961	-\$ 174.423.420	-\$ 174.994.879	-\$ 175.566.337
-\$	38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-\$	1.403.184	-\$ 1.403.184	-\$ 1.403.184	-\$ 1.403.184	-\$ 1.403.184	-\$ 1.403.184	-\$ 1.403.184	-\$ 1.403.184
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	129.670.298	\$ 129.098.840	\$ 128.527.381	\$ 127.955.923	\$ 127.384.464	\$ 126.813.005	\$ 126.241.547	\$ 125.670.088
	35010981	34856687	34702393	34548099	34393805	34239511	34085218	33930924
\$	94.659.318	\$ 94.242.153	\$ 93.824.988	\$ 93.407.824	\$ 92.990.659	\$ 92.573.494	\$ 92.156.329	\$ 91.739.164
\$	1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	96.062.502	\$ 95.645.337	\$ 95.228.172	\$ 94.811.008	\$ 94.393.843	\$ 93.976.678	\$ 93.559.513	\$ 93.142.348
-\$	83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203
-\$	83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203	-\$ 83.033.203
\$	13.029.298	\$ 12.612.134	\$ 12.194.969	\$ 11.777.804	\$ 11.360.639	\$ 10.943.475	\$ 93.559.513	\$ 93.142.348



	13	14	15	16	17	18	19	20
\$	341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333	\$ 341.133.333
-\$	176.137.796	-\$ 176.709.254	-\$ 177.280.713	-\$ 177.852.172	-\$ 178.423.630	-\$ 178.995.089	-\$ 179.566.547	-\$ 180.138.006
-\$	38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724	-\$ 38.493.724
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
-\$	1.403.184	-\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	125.098.630	\$ 124.527.171	\$ 123.955.712	\$ 124.787.438	\$ 124.215.979	\$ 123.644.521	\$ 123.073.062	\$ 122.501.603
	33776630	33622336	33468042	33692608	33538314	33384021	33229727	33075433
\$	91.322.000	\$ 90.904.835	\$ 90.487.670	\$ 91.094.830	\$ 90.677.665	\$ 90.260.500	\$ 89.843.335	\$ 89.426.171
\$	1.403.184	\$ 1.403.184	\$ 1.403.184	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	92.725.184	\$ 92.308.019	\$ 91.890.854	\$ 91.094.830	\$ 90.677.665	\$ 90.260.500	\$ 89.843.335	\$ 89.426.171
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	-	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -
\$	92.725.184	\$ 92.308.019	\$ 91.890.854	\$ 91.094.830	\$ 90.677.665	\$ 90.260.500	\$ 89.843.335	\$ 89.426.171