



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Desalación de salmuera por método evaporativo

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniera Mecánica

P R E S E N T A

Maritza Guadarrama de León

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Gabriel Ascanio Gasca



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022

Lo único que permanece constante, es el cambio.

Heráclito de Éfeso

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación fue llevado a cabo dentro de las instalaciones del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el departamento de Ingeniería de Procesos. Le agradezco a esta institución y a todos los miembros del departamento por sus enseñanzas, amabilidad y apoyo incondicional.

Quisiera expresar mi mayor agradecimiento al Dr. Gabriel Ascanio Gasca, por haberme dado una oportunidad en un momento complicado de mi vida académica; por ayudarme a desenvolver, a expresar mis opiniones y a dar mis primeros pasos como ingeniera. Mi camino a lo largo de ingeniería ha sido mejor gracias a su apoyo y guía y espero algún día llegar a ser una ingeniera excepcional como usted lo es.

De igual forma, continuando dentro del ámbito académico, quisiera agradecerle profundamente al M.I Eduardo Bernal Vargas por todo su apoyo, confianza, paciencia y total disponibilidad con mi proyecto. Su gran ingenio y amplios conocimientos fueron clave para perfeccionar el sistema experimental. Asimismo, mi amplio reconocimiento a la Dra. Isadora Martínez Arellano por su asesoramiento en el desarrollo del análisis estadístico experimental de este proyecto. A Gabriel Delgado, su agradecimiento por haber sido un excelente compañero y amigo en este proceso de tesis, así como por haberme brindado su ayuda y experiencia.

A mis papás, que, al regarme diariamente con todo su amor y apoyo, resulta apropiado que yo haya florecido para experimentar una de las situaciones más gratificantes en mi vida, porque represento el resultado de que el amor y apoyo sean procurados incondicionalmente en alguien. Son las personas que más admiro y agradezco poder tenerlos como compañeros de vida, porque hay muchas experiencias por vivir. Tengan confianza de que cualquiera que sea mi camino, su luz me ilumina y resguarda en mi trayecto. Los quiero muchísimo.

A mis abuelos Ernesto y Josefina, y a Roberto y Lourdes que siempre están cuidándome, por siempre tener sus brazos abiertos para mí después de un día difícil y que con sólo su presencia me hacen sentir que todo está bien. Gracias por su amor incondicional, por sus historias y enseñanzas de vida. A mi familia, tíos, primos, Mila y Esdrújula que me han procurado a lo largo de mi vida y que espero podamos continuar con la cercana relación que tenemos como hasta ahora. Y a mi familia elegida Sofía Acosta, por ser mi mejor amiga y hermana desde niña y por estar siempre para mí; a Oscar Maldonado, por su amor, respeto y apoyo incondicional en cada paso que doy y por demostrarme que a veces las cosas menos planeadas o previstas, pueden ser las mejores en mi vida. Los quiero muchísimo y espero estén siempre en mi vida porque es mucho más bonita a su lado.

Gracias a todos y sepan que dejan una gran huella en mí.

Nomenclatura	5
Lista de Figuras	7
Lista de tablas	8
Resumen	9
1 Introducción	10
1.1 Origen del agua	13
1.2 Agua dulce en el mundo	16
1.3 Técnicas existentes para la extracción del agua	21
Problemas derivados con los métodos actuales de extracción de agua	23
1.4 Disponibilidad en México y tratamiento del agua para hacerla utilizable	24
2 Objetivos	32
3 Metodología	33
3.1 Montaje experimental	33
3.2 Fluidos de trabajo	39
3.3 Condiciones de operación	39
Metodología estadística con software Statgraphics Centurion	39
Procedimiento de las pruebas de experimentación	42
4 Resultados	46
4.1 Resultados de Statgraphics Centurion	46
Análisis de Varianza para el volumen condensado	46
Diagrama de Pareto estandarizada para volumen condensado	47
Superficie de respuesta estimada	48
4.2 Resultados de Statgraphics Centurion con la optimización de variable respuesta	49
4.3 Análisis termodinámico	51
Conclusiones	65
Referencias	67
Anexo I Especificaciones técnicas de equipos y materiales	71
Anexo II Planos de fabricación del reactor	76
Anexo III Método de recolección de información y datos	78
Condiciones de operación del sistema	78
Anexo IV Desarrollo de cálculos	82
Cálculos previos de concentración de sal	82
Anexo V Bitácora de experimentos	85
Glosario	86

Nomenclatura

A_t	=	Área de sección transversal de la manguera	m^2
c	=	Calor específico	$\frac{J}{kgK}$
h	=	Entalpía	$\frac{kJ}{kg}$
h_f	=	Entalpía de líquido saturado	$\frac{kJ}{kg}$
h_{fg}	=	Entalpía de vaporización (calor latente de vaporización)	$\frac{kJ}{kg}$
h_g	=	Entalpía de vapor saturado	$\frac{kJ}{kg}$
k_f	=	Conductividad eléctrica final, medida en la extracción de vapor	$\frac{mS}{cm}$
k_i	=	Conductividad eléctrica inicial de la solución de salmuera	$\frac{mS}{cm}$
m	=	Masa	kg
m_f	=	Masa de líquido saturado	kg
m_g	=	Masa de vapor saturado	kg
m_T	=	Masa total de la solución de salmuera	kg
\dot{m}	=	Flujo másico	$\frac{kg}{s}$
P_{sat}	=	Presión de saturación	kPa
$q_{entrada}$	=	Calor de entrada necesario en el ciclo	$\frac{kJ}{kg}$
$Q_{latente}$	=	Calor latente de la solución	kJ
q_{salida}	=	Calor desechado en el ciclo	$\frac{kJ}{kg}$
$Q_{sensible}$	=	Calor sensible de la solución	kJ
Q	=	Flujo volumétrico	$\frac{m^3}{s}$
\dot{Q}	=	Pérdida de calor por unidad de tiempo	$\frac{kJ}{h}$
RPM	=	Revoluciones por minuto	rpm

$rpm_{optimización}$	=	Revoluciones por minuto del experimento óptimo	rpm
t	=	Tiempo de extracción de vapor	min
t_{total}	=	Tiempo total supuesto para evaporar toda la solución	h
T	=	Temperatura	°C
T_{camisa}	=	Temperatura en recipiente secundario externo del reactor	°C
T_{cond}	=	Temperatura del volumen de condensado extraído	°C
$T_{optimización}$	=	Temperatura de optimización del experimento	°C
T_{ri}	=	Temperatura inicial en el recipiente interior del reactor de vidrio	°C
u_f	=	Energía interna de líquido saturado	$\frac{kJ}{kg}$
u_g	=	Energía interna de vapor saturado	$\frac{kJ}{kg}$
v_f	=	Volumen específico de líquido saturado	$\frac{m^3}{kg}$
v_g	=	Volumen específico de vapor saturado	$\frac{m^3}{kg}$
V	=	Velocidad de salida del vapor	$\frac{m}{s}$
V_{cond}	=	Volumen condensado de vapor extraído por el proceso	ml
W_b	=	Trabajo de la bomba	$\frac{kJ}{kg}$
W_e	=	Potencia eléctrica	kJ
x	=	Calidad de la mezcla saturada	
ΔT	=	Diferencia de temperaturas	°C, K
λ	=	Calor latente de fusión o evaporización	$\frac{kJ}{kg}$
ρ	=	Densidad	$\frac{kg}{m^3}$
$\eta_{térmica}$	=	Eficiencia térmica	

Lista de Figuras

Figura 1. El ciclo del agua (US geological survey, 2019) _____	15
Figura 2. Reservas de agua dulce en el mundo por región (CONAGUA, 2011) _____	16
Figura 3. Niveles promedio de extracción de agua anuales per cápita (Ritchie et al. 2018) _____	20
Figura 4. Aguas subterráneas (Anderson, 2012) _____	22
Figura 5. Proceso de abastecimiento y tratamiento de agua (Obras Sanitarias del Estado, 2020)	
Figura 6. Montaje experimental (2021) _____	34
Figura 7. Vista explosionada del reactor de vidrio (Elaboración propia, 2022)_____	37
Figura 8. Esquema de funcionamiento de sistema de desalación de salmuera (Elaboración propia, 2022) _____	38
Figura 9. Elección de factores y niveles en el diseño experimental (Elaboración propia, 2021)___	40
Figura 10. Libro de datos experimentales en Statgraphics (Creación propia,2021)_____	41
Figura 11. Valores obtenidos en Statgraphics para la variable respuesta (Elaboración propia, 2021) _____	45
Figura 12. Tabla ANOVA obtenida (Statgraphics, 2021) _____	46
Figura 13. Diagrama de Pareto obtenido (Statgraphics, 2021) _____	48
Figura 14. Superficie de respuesta estimada (Statgraphics, 2021) _____	49
Figura 15. Tabla de optimización de la variable respuesta (Statgraphics, 2022) _____	50
Figura 16. Esquema del funcionamiento termodinámico del sistema (Creación propia, 2022)_____	59

Lista de tablas

Tabla 1 . Extracción de agua para agricultura vs. PIB per cápita (Ritchie et al., 2018)	18
Tabla 2. Propiedades fisicoquímicas del agua de pozo (Pérez et al. (2003) y Robles et al. (2013))	26
Tabla 3. Resultados obtenidos del experimento dos (Elaboración propia, 2021)	44
Tabla 4. Experimento óptimo sin ventilador (Elaboración propia, 2022)	50
Tabla 5. Experimento óptimo con ventilador (Elaboración propia, 2022)	51
Tabla 6. Datos iniciales para condiciones óptimas de experimentación (Elaboración propia, 2022)	51
Tabla 7. Propiedades del agua saturada a 75[°C] (Cengel, 2011)	52

Resumen

Se llevó a cabo un análisis estadístico que permite modelar el proceso de desalación de salmuera. Para ello, se empleó el *software* Statgraphics Centurion mediante un análisis factorial, en cual se consideraron como variables independientes (factores) la temperatura de la salmuera, la velocidad de agitación y la concentración salina, mientras que la variable respuesta a maximizar fue el volumen de condensado de vapor agua. Se llevaron a cabo quince experimentos representativos, los cuales arrojaron que el factor más relevante fue la temperatura, y que al utilizar los valores óptimos se podrían obtener 43 [ml] de condensado en 20 minutos de extracción de vapor. El valor óptimo teórico de la variable respuesta fue superado por 6.5 ml del valor experimental usando el ventilador. De igual forma, se obtuvo que el calor rechazado por el sistema fue de 9537.02 [kJ].

1 Introducción

No es desconocida la actual situación climática a la que sociedad se enfrenta debido a las actuales prácticas de explotación y el grado de presión que se ejerce sobre los recursos naturales. Incendios, inundaciones frecuentes, temperaturas extremas, derretimiento de los polos, extinción de especies, escasez de agua, etc., son sólo algunas de las muchas consecuencias que el desarrollo humano ha provocado en la simbiosis del planeta, donde el abasto de agua, comida, o la vivienda se convierten en desafíos cada vez más grandes por satisfacer. Por lo cual, es obvia e imperante la participación de todas las áreas de la sociedad, en especial la del área científica, para la mediación y búsqueda de soluciones a largo plazo de estos problemas.

La presente tesis está enfocada en atender uno de los mayores problemas a enfrentar en el país debido a las prácticas actuales del uso del agua: la disponibilidad de agua utilizable para todos, mediante la aplicación de un proceso físico de desalación de agua cruda para que, por medio de sedimentación, los minerales y demás elementos pesados presentes en el agua puedan separarse y, con la utilización de una bomba, obtener agua más limpia para usar. Si bien esta tesis no resuelve los graves problemas derivados de los métodos de extracción del agua, sí propone una alternativa de obtención de agua limpia para usar y reusar en actividades no ingeribles, así como evidencia científica experimental antecedente para eventuales investigaciones y acciones posteriores que se pudieran llevar a cabo del tema en cuestión.

Uno de los grandes retos encontrados durante el proceso de desalación del agua es cómo extraer la mayor cantidad de sal en la salmuera (solución de agua con minerales), así como la garantía de tener agua limpia la mayor cantidad de tiempo y de forma constante. Sin duda,

mediante diferentes técnicas físicas y químicas es posible, sin embargo, uno de los pasos más asequibles para la sociedad es la obtención de agua limpia mediante la evaporación.

Rania et al. (2021), en su misión de proporcionar sustentabilidad en las zonas urbanas en el Cairo, Egipto, desarrollaron la pirámide solar de vidrio (*Solar glass pyramid*) con el propósito de desalinizar agua de mar y poderla utilizar en áreas domésticas no ingeribles ni bebibles. Utilizando materiales no costosos construyeron una pirámide de vidrio con una base de 2 [m²] aislada térmicamente, así como aditamentos para recolectar el agua fresca. La radiación solar medida varió entre los 450 [W/ m²] y 500 [W/ m²] con temperaturas dentro del recipiente de máximo 79 [°C]. Los resultados obtenidos mostraron que el acumulado promedio varió entre los 6.5- 4.4 [l/ m²] con una eficiencia del 37.6%, recolectado durante un periodo continuo de una semana, por lo que el SGP pudo producir 10.8 [litros/semana]. Los autores declararon que el SGP no es factible para las zonas urbanas de El Cairo ya que ahí se tiene un consumo diario de 350 [litros/persona] o 2456 [litros semanales /persona]. Además, reiteraron el uso en paralelo de un sistema de calentamiento adicional para acelerar el proceso de desalación.

Alireza et al. (2022) propusieron un sistema híbrido compuesto por un sistema humidificador-deshumidificador, un sistema Rankine para la generación de potencia, así como un concentrador parabólico como medio de captación de energía solar, así como la utilización de nanotubos para poder optimizar la obtención de agua limpia. Los resultados mostraron que la aplicación de un nanotubo específico pudo producir 15.46 [kg/h] de agua limpia. Así mismo, la producción de trabajo neto tuvo un máximo de 5110 [W].

En lo que atañe al presente proyecto de tesis, se pretendió construir y analizar un prototipo de sistema para la extracción de sales en salmuera mediante la evaporación de la mezcla utilizando energía eléctrica como la aportación de calor, con el fin de conocer la cantidad de agua limpia producida, así como las posibles ventajas o desventajas de utilizar este sistema de adición de calor.

A continuación, se presenta la información que sustenta la realización de esta tesis, desde las problemáticas actuales en el mundo y en México respecto del agua, los diferentes usos del agua, así como técnicas para potabilizarla. Posteriormente, se describen algunos conceptos relevantes a entender del agua como sus propiedades físicas y químicas.

1.1 Origen del agua

La molécula del agua, así como todos los demás elementos y moléculas que son característicos para la existencia de la vida terrestre, fueron desarrollados durante la fusión de hidrógeno y helio de los miles de millones de estrellas que han nacido y muerto desde hace aproximadamente 14 mil millones de años, enriqueciendo y proveyendo al gas interestelar de más alternativas de compuestos.

Según Gómez et al. (2007) y Pardo (2013) los elementos para la formación de la molécula de agua se encontraron inmersos en la nebulosa planetaria primigenia a la creación del Sistema Solar. Una vez formada la Tierra, hace unos 4,600 millones de años, la **acreción** por parte de fragmentos que derivaron en el calentamiento y fusión de los materiales y en el acomodo de estos dependiendo de su densidad, originando el núcleo terrestre, el manto y la corteza (**diferenciación planetaria**), donde muchos gases quedaron atrapados en el interior. Pardo (2013) describe:

Uno de los resultados de la diferenciación planetaria fue la desgasificación del magma y la liberación de una enorme cantidad de elementos volátiles a las zonas más externas, originando la protoatmósfera terrestre que posteriormente evolucionaría hasta formar dos nuevas esferas: la **hidrosfera** y la **atmósfera**. [...] El único hidrógeno que permaneció ligado a la gravedad terrestre fue el que se encontraba químicamente ligado al oxígeno, formando moléculas de agua. [...] Cuando la temperatura terrestre disminuyó, el vapor de agua, que es un gas menos **volátil** que el

CO₂ o el N₂, comenzó a condensarse formando nubes, y posteriormente precipitando a la superficie en forma de lluvia ácida y caliente, entre 30[°C] y 60[°C]. El volumen del agua liberada a la atmósfera por este proceso y que precipitó a la superficie fue de 1.37×10^9 [km³].

Cousteau (1994) continúa explicando que, a través de la interacción del océano ácido primitivo con las rocas, así como de la aportación continua de agua por parte de los volcanes, es que los mares poco a poco fueron alcalinizándose (constitución de agua de mar del 96.5% y el 3.5% siendo las sales. Este porcentaje está compuesto por ocho iones: cloro (55.04%), sodio (30.62%), azufre (7.69%), magnesio (3.69%), calcio (1.16%) y potasio (0.10%)) y posteriormente fungieron como un depósito viable para el desarrollo de las especies (oxígeno disuelto para la respiración de animales sin branquias, el fósforo para el crecimiento del fitoplancton o el nitrógeno, el silicio y calcio para la formación de proteínas y caparazones o conchas).

Una vez desarrolladas las propiedades características del agua como se conocen hasta ahora, se pueden determinar cinco fases principales del ciclo del agua: evaporación del agua, condensación, precipitación, infiltración y escurrimiento. (Ver figura 1) Es de gran relevancia mencionar que aquellos flujos de agua que pasan a través del subsuelo y llegan al mar, aportan de grandes cantidades de sedimentos minerales y orgánicos.



FIGURA 1. EL CICLO DEL AGUA (US GEOLOGICAL SURVEY, 2019)

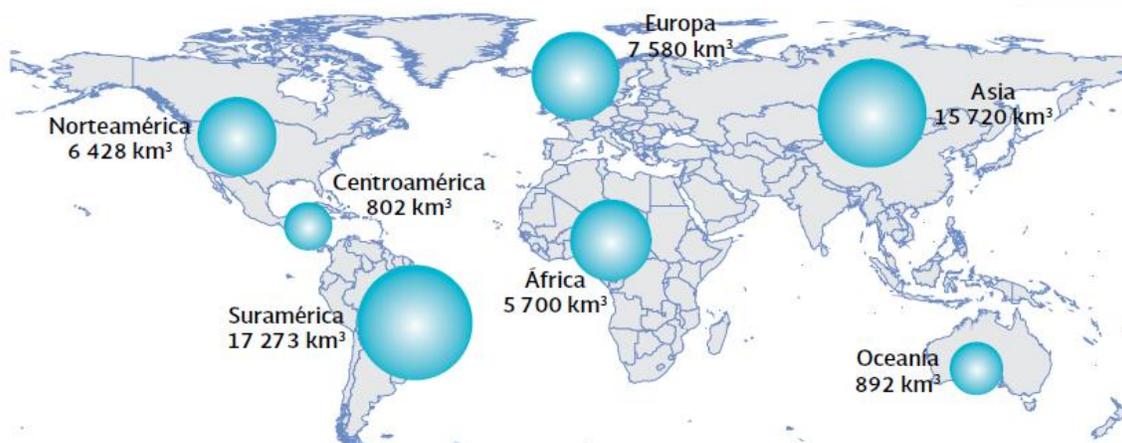
Como consecuencia del ciclo hidrológico está el ciclo geológico, que se refiere al depósito de minerales al océano a partir de la escorrentía y de la erosión de la tierra; de igual forma puede llevarse a cabo a partir del transporte de los mismos al derretirse los icebergs, o mediante los volcanes. Pueden estar conformados por el núcleo terrestre, elementos interestelares (como polvo interplanetario y meteoritos que se desintegran en la atmósfera) o elementos biológicos como organismos planctónicos en descomposición. (Cousteau, 1994)

1.2 Agua dulce en el mundo

Del volumen de agua total de la Tierra, sólo el 3.5% corresponde a agua dulce. La CONAGUA (2011) dice que “de este porcentaje el 68.7% corresponde al agua almacenada en glaciares, el 30% a agua subterránea, el 0.8% a **Permafrost** y el 0.4% a aguas superficiales y en la atmósfera.” Las aguas subterráneas se encargan de abastecer agua a los manantiales y arroyos, mientras que las aguas superficiales (escorrentía) a los ríos, lagos, embalses, etc. La figura 2 muestra las reservas de agua dulce en el mundo.

Reservas de agua dulce en el mundo por región¹

Mapa 6.1



Nota:

¹ Para algunas regiones los valores no comprenden al 100% de los países que las conforman: África (98% de los países); Centroamérica (81% de los países); Europa (85% de los países) y Oceanía (31% de los países).

Fuente:

FAO-Aquastat. Sistema de información sobre el uso del agua en la agricultura y el medio rural de la FAO. Disponible en: www.fao.org/nr/water/aquastat/data/. Fecha de consulta: octubre de 2012.

FIGURA 2. RESERVAS DE AGUA DULCE EN EL MUNDO POR REGIÓN (CONAGUA, 2011)

Cualquier forma de vida en el planeta utiliza el agua como forma de subsistencia, y en la catalogación humana esta utilización del agua destinada a una actividad se define como “usos

del agua”. Cuando existe consumo, entendido como la diferencia entre el volumen suministrado y el volumen descargado, se trata de un uso consuntivo.

Los usos mundiales se pueden catalogar generalmente en las siguientes actividades (Jiménez et al., 2010):

1. Consumo humano (bebida, cocina, procesamiento de alimentos).
2. Limpieza personal
3. Municipales (servicios de agua potable, drenaje, alcantarillado y tratamiento y disposición de aguas residuales.)
4. Recreativos
5. Agricultura
6. Cultivo de peces, mariscos o cualquier producto acuático
7. Transporte de desechos
8. Industria

En México (con una superficie territorial de 1,964 [miles de km²], 11,122 [km] de costas, 15,000 [km²] de lagunas costeras y 29,000 [km²] de cuerpos de agua interiores, así como con 112.3 millones de habitantes, el 78% radicando en localidades urbanas y una disponibilidad natural media de agua en el país de 4547 [m³/hab/año] (Ver último apartado de Figuras y tablas, “Principales fuentes de agua en México”) (CONAGUA, 2020), el porcentaje de agua destinado a los diferentes usos respecto al total extraído fueron: 76.8% para usos agrícolas, 14% para abastecimiento público, 4.1% para la industria autoabastecida y 5.1% para las termoeléctricas y el sector hidroeléctrico (Ver anexo de figuras y tablas, “Usos consuntivos según origen del tipo de fuente de extracción”)

Sin embargo, debido al rápido crecimiento demográfico mundial, el manejo de las políticas económicas en los países y al peso que se les otorga a ciertas actividades de producción, cada vez se vuelve más difícil satisfacer las necesidades básicas humanas, constituyendo grandes problemáticas del uso desproporcionado del agua. De acuerdo con Ritchie et al. (2018) existen dos causas importantes para determinar cuánta agua se utiliza y en qué se utiliza y son: el uso agrícola y la huella hídrica. Encontraron que, en una economía con menores ingresos, la agricultura representa un porcentaje mayor en el producto interno bruto, así como una fuente de empleo para un porcentaje mayor de una población de un país, y la destinación de una gran cantidad de sus recursos hídricos a esa actividad primaria. (Ver tabla 1)

TABLA 1 . EXTRACCIÓN DE AGUA PARA AGRICULTURA VS. PIB PER CÁPITA (RITCHIE ET AL., 2018)

País	Extracción anual de agua para agricultura (% del total de extracción de agua)	PIB per cápita [dólares]
Sudáfrica	58.77	12,701
Emiratos Árabes	82.84	67,184
Brasil	60.03	14,525
China	64.4	14,344
México	76.04	19,721
Estados Unidos	39.66	60,110

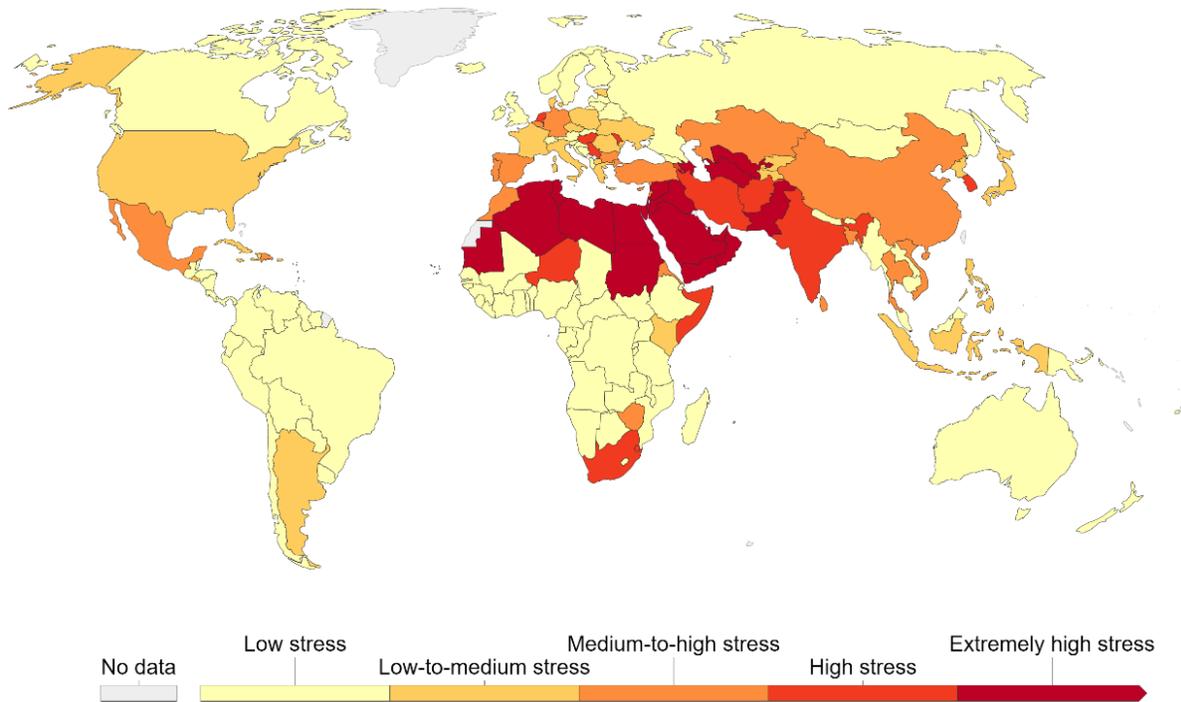
Asimismo, el factor de la huella hídrica producida es definido por la *Water Footprint Network* como la medida de la cantidad de agua utilizada para producir cada uno de los productos y servicios que utiliza la sociedad o como la medida de la apropiación por parte del humano

sobre el agua en volúmenes de agua consumidos y/o contaminados. Resulta relevante para entender a cuáles propósitos se está direccionando este recurso limitado. De acuerdo con la UNESCO (2011), la huella hídrica de México fue de 200,000 [millones de m³/año], donde el 57% fue de uso interno y el 43% externo (importación de productos e ingredientes); la huella hídrica de Estados Unidos fue de 820,000 [millones de m³/año] con un 80% de uso interno y 20% externo; China con 1,400,000 [millones de m³/año] con 90% interno; Sudáfrica con una huella de 57,000 [millones de m³/año].

A partir de la huella hídrica, resulta conveniente definir el indicador “grado de presión o estrés del agua” para cuantificar los niveles de extracción a los que son sometidos los cuerpos de agua (Ver figura 3). Ritchie et al. (2018) lo definen como “la cantidad de extracción del agua que se toma de los recursos hídricos renovables para los diferentes usos. Si la extracción de agua excede los recursos disponibles (>100%), entonces se está extrayendo más allá de la tasa en la que se puede reabastecer un acuífero”.

Freshwater withdrawals as a share of internal resources, 2017

Annual freshwater withdrawals refer to total water withdrawals from agriculture, industry and municipal/domestic uses. Withdrawals can exceed 100% of total renewable resources where extraction from nonrenewable aquifers or desalination plants is considerable.



Source: UN Food and Agriculture Organization (FAO)

OurWorldInData.org/water-access-resources-sanitation/ • CC BY

FIGURA 3. NIVELES PROMEDIO DE EXTRACCIÓN DE AGUA ANUALES PER CÁPITA (RITCHIE ET AL. 2018)

Por mencionar los indicadores de algunos países se encuentran Mauritania con el 337.05%, Argelia con el 87.13%, Libia con el 817.14%, Egipto con el 6420%, Turkmenistán con el 1983.27%, entre otros relevantes. México cuenta con el 27.48%.

1.3 Técnicas existentes para la extracción del agua

Ahora bien, existen diferentes métodos para extraer el agua del subsuelo, sin embargo, todos parten del mismo principio. En primera instancia, resulta importante describir el proceso de almacenamiento natural y flujo del mismo para posteriormente entender el proceso de su extracción: una vez que el agua cae en la tierra, puede ser retenida por las raíces de las plantas (y de vuelta a la atmósfera por la evapotranspiración) y otra se infiltra hacia el subsuelo (Ver figura 4). Ordoñez (2011) define al agua subterránea como “aquella existente bajo la superficie terrestre que puede ser colectada mediante perforaciones, túneles o galerías de drenaje o la que fluye naturalmente hacia la superficie a través de manantiales” (Como los acuíferos, donde Fuentes (1993) los define como “formaciones geológicas que contienen agua subterránea [...] capaz de almacenar y transmitir agua).

Fuentes (1993) explica que la capa freática o zona de saturación es aquella donde se extrae el agua, la cual se debe a la porosidad y grietas del suelo, que permiten la infiltración del agua hasta cierta profundidad, llenando esos espacios con agua. El límite superior es llamado superficie de saturación o freática y el límite inferior puede llegar hasta profundidades de 10,000 metros, donde la mayoría permanece estancada y llega a ser en extremo salada. Otra capa importante es la zona de aireación, aquella entre la zona de saturación y la superficie del suelo, ya que en esta se infiltra el agua o se evapora hacia la atmósfera.

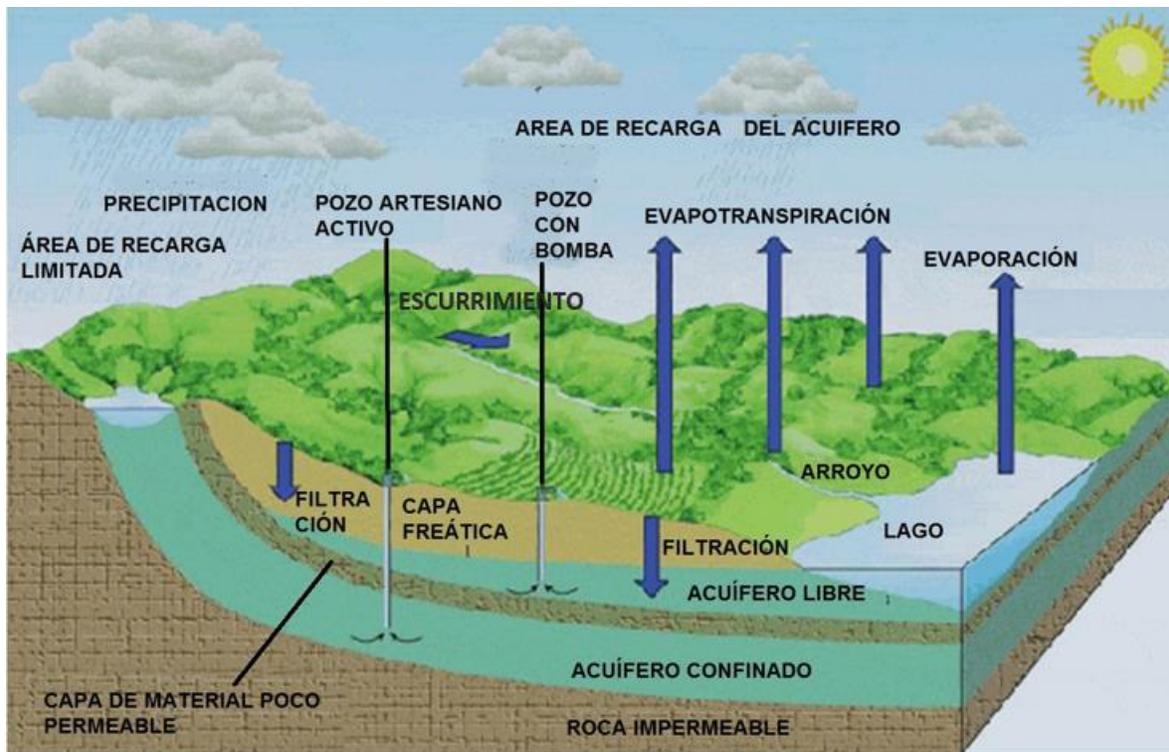


FIGURA 4. AGUAS SUBTERRÁNEAS (ANDERSON, 2012)

El agua subterránea puede extraerse mediante diversas formas. De forma natural puede captarse en los manantiales o descargas a lagos o al mar. Otra forma para extraerla es mediante un procedimiento que consta del diagnóstico del área y la factibilidad de obra. Para llevar a cabo esto, se realizan estudios geológicos y geofísicos, utilizando alta tecnología para conocer el espacio.

Una vez estudiada la zona a perforar, la extracción de agua inducida consta de la excavación de aljibes, de forma manual, y mediante procesos de pozos y sondeos. Los pozos captan agua y tienen un diámetro mínimo de un metro (normalmente 2-3 metros) así como una profundidad máxima de 15-20 metros; los sondeos tienen un diámetro menor a 0.60 metros

y una profundidad mayor a los 20 metros. La construcción de este tipo de pozos está dotada de sistemas de extracción como electrobombas o compresores. (Fuentes, 1993)

Problemas derivados con los métodos actuales de extracción de agua

La actividad de extracción de agua continuamente puede ser beneficioso a corto plazo debido a las necesidades que existen, pero las consecuencias a mediano y largo plazo parecen ser mayores que los beneficios obtenidos. Los principales efectos causados por el manejo no sustentable de las aguas subterráneas y el impacto ecológico provocado son mencionados por Arreguín (2011):

- Disminución de los niveles del agua subterránea.
- Minado de la reserva.
- Deterioro de la calidad del agua subterránea.
- Incremento del costo de extracción.
- Asentamiento, agrietamiento y derrumbe del terreno.
 - En la Ciudad de México en 2011, el nivel de la ciudad estaba 10 [m] abajo del lago de Texcoco, cuando el 1910 se encontraba a 1.90 [m] sobre él. El ritmo de hundimiento de la ciudad es de 0.30 [cm/año] aproximadamente.
- Impacto ecológico negativo: desaparición de manantiales, vegetación nativa, humedales, lagos y ecosistemas locales.
 - La pérdida de servicios ecosistémicos se percibe, por ejemplo, en la región del Valle de México, en donde la acelerada transformación de los bosques de las partes altas ha afectado el microclima y la provisión de agua para la zona metropolitana. Otro caso de las consecuencias ecológicas por el manejo no

sustentable del agua es la situación del valle de Cuatro ciénegas, Coahuila, en donde la extracción no sostenible de agua para riego ha alterado los flujos de agua y ocasionado la desecación del sistema, con grandes impactos socioambientales. Ha disminuido el nivel del agua en los manantiales y se ha reducido hasta en 10% la superficie de humedales, lo que daña a especies endémicas como la tortuga bisagra. (CONAGUA, 2020)

- Disminución del gasto y rendimiento de los pozos.

1.4 Disponibilidad en México y tratamiento del agua para hacerla utilizable

Cabe resaltar que, de acuerdo con la **hidrografía** de las cuencas en México, la disponibilidad natural de agua es heterogénea a lo largo del territorio (Ver anexo de figuras y tablas, “Distribución heterogénea de la precipitación en México”). Si se aúna este fenómeno al desarrollo económico principalmente en las zonas norte y centro del país (con tan sólo la tercera parte de disponibilidad natural de agua), es evidente el **grado de presión** ejercido en ciertos sectores poblacionales (Ver anexo de figuras y tablas, “Grado de presión sobre los recursos hídricos”). La CONAGUA (2011) explica que:

Uno de los aspectos más relevantes del manejo adecuado del agua subterránea radica en el control del volumen aprovechado por los diferentes **usos consuntivos**. En ocasiones la demanda puede ser muy intensa, y puesto que algunos acuíferos tienen periodos de renovación muy largos, la demanda puede superar **la recarga del acuífero** y producir su sobreexplotación.

Para 2011, los acuíferos de los 654 totales, 102 fueron sobreexplotados, representando el 15% de los totales en el país. Estos se concentran en las regiones hidrológicas Lerma-Santiago-Pacífico, Río Bravo, Cuencas del Norte, Noroeste y Península de Baja California, extrayéndose el 58% del agua subterránea para todos los usos. [...]

Además, algunos acuíferos se encuentran bajo condiciones de salinización. En amplias zonas de riego (principalmente en las zonas costeras), la sobreexplotación de los acuíferos ha provocado que los niveles de agua subterránea hayan descendido varios metros y que favorezca la intrusión del agua de mar y la disminución de la calidad de su agua.

CONAGUA (2020) explica que, a nivel nacional, sólo el 58% de la población del país tiene agua diariamente en su domicilio y cuenta con saneamiento básico mejorado; el estado con la situación más crítica es Guerrero con 10%, en contraste con Nuevo León con un 95%. En el medio urbano se alcanza un valor de 64% mientras que en el rural un 39%. Son 14 los estados con mayor rezago en el acceso a los servicios”. Estos estados cuentan con disponibilidad entre el 10 y 50% y son Baja California Sur, Nayarit, San Luis Potosí, Zacatecas, Michoacán, Guerrero, Oaxaca, Chiapas, Veracruz, el Estado de México, Puebla, Hidalgo y Tlaxcala.

Como una medida de atenuar este grado de presión, se cuentan con el desarrollo de presas y bordos para asegurar su suministro, así como la mayor explotación de acuíferos y diversos cuerpos de agua; sin embargo, esto representa un reto para lograr el manejo sustentable del agua debido a la sobreexplotación del agua, así como las descargas de aguas residuales que los contaminan, la intrusión salina de suelos y aguas salobres, así como una pérdida importante de la recarga de acuíferos debido a la deforestación, al cambio de uso de suelo, a

la expansión desordenada de los asentamientos humanos y a la sustitución de áreas verdes por zonas pavimentadas que impiden la infiltración. (CONAGUA, 2011)

Para medir los niveles de contaminantes disueltos en el agua, la cual pone en riesgo la salud de la población y la preserva de los ecosistemas, la CONAGUA (2011) menciona algunos factores delimitantes para definir la calidad del agua:

- Si existen descargas directas de agua o residuos sólidos provenientes de actividades domésticas, agropecuarias o industriales.
- La disposición inadecuada en el suelo de residuos sólidos urbanos o peligrosos que puede ocasionar que escurrimientos superficiales y lixiviados contaminen los cuerpos de agua y acuíferos.
- Si se promueve la capacidad natural de los ecosistemas acuáticos para descomponer o inmovilizar los contaminantes.

En general, el agua de pozo cuenta con los valores promedio descritos por la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 en la tabla 2:

TABLA 2. PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DEL AGUA DE POZO (PÉREZ ET AL. (2003) Y ROBLES ET AL. (2013))

Parámetros fisicoquímicos del agua de pozo	Límite permisible	Descripción
Alcalinidad [mg/L]	100-300	Determina la capacidad del agua para neutralizar ácidos.
Conductividad eléctrica [S/cm]	Aumento 1°C – 2% S/cm	Consecuencia del contenido iónico en el agua. La variación

		de temperatura modifica notablemente la conductividad.
Dureza total [mg/L de CaCO ₃]	10- 500	Mide la capacidad del agua para consumir jabón o producir incrustaciones.
pH [pH]	6.5-8.5	Parámetro dependiente de la temperatura.
Sólidos disueltos [mg/L]	1000	
Turbidez en unidades de turbiedad nefelométricas [UTN]	5	Causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua. Puede ser causada por materiales en suspensión.

Para monitorear la calidad del agua a lo largo del país, la CONAGUA, a través de su Red Nacional de Monitoreo (RNM), cuenta con instalaciones en los principales cuerpos de agua del país. Dentro de sus actividades está la indicación de la calidad del agua, la demanda química de oxígeno (DQO), la demanda bioquímica de oxígeno a cinco días (DBO₅), la concentración de sólidos suspendidos totales (SST), la concentración de nitratos y fosfatos, así como su dureza, pH y el oxígeno disuelto.

La demanda química de oxígeno (DQO) se refiere a aquellas sustancias provenientes de usos no municipales (CONAGUA,2011). Como medida, si los valores rebasan los 40 miligramos

por litro, sugieren la existencia de aguas residuales crudas. De las entidades monitoreadas, el 26.5% rebasó este valor.

La demanda bioquímica de oxígeno (DBO_5) (CONAGUA,2011) es un indicador de cuánta materia orgánica está presente en el agua. Si este valor aumenta, disminuye el oxígeno disuelto en el agua y provoca condiciones de “**anoxia**”, perjudicando a los ecosistemas acuáticos. El valor de referencia máximo para una excelente calidad de agua son 3 miligramos por litro. Los fosfatos, provenientes de las actividades agrícolas (fertilizantes o detergentes), si bien no representan un perjuicio para la salud animal, puede causar la **eutrofización** de los cuerpos de agua superficiales, promoviendo el crecimiento en exceso de algas y como consecuencia, la disminución del oxígeno disuelto. El límite máximo es 0.1 miligramos por litro. Por otro lado, los nitratos provenientes de los fertilizantes sí tienen efectos adversos en la salud como cianosis, asfixia, enfermedades gastrointestinales o la muerte. Los sólidos suspendidos provienen de las aguas residuales y de la erosión del suelo, lo que impide el desarrollo acuático de la vegetación debido a la turbiedad en el agua, que impide la penetración de la luz solar.

Todos estos indicadores de la calidad de agua son empleados durante el proceso de tratamiento de agua para eliminar los contaminantes, así como para eliminar el exceso de sales minerales contenidas en la misma y hacerla utilizable. Debido a la naturaleza del agua proveniente del subsuelo, es indudable que la cantidad de sales minerales contenidas en esta pueden ser perjudiciales para la salud, sin embargo, es importante aclarar que la existencia (en equilibrada proporción) de sales minerales es beneficiosa para la salud, por tanto, Grijalva et al. (2020) recomiendan “un nivel mínimo de sales disueltas (100 mg/L), ion bicarbonato (30mg/L), calcio (30 mg/L), cloruro- sulfato (250-500 mg/L), sodio (200 mg/L), boro (0.5

mg/L) y bromo (0.01 mg/L)”. De forma general, el tratamiento del agua se puede llevar a cabo mediante diferentes operaciones o procesos, en donde se eliminan las partículas indeseables del agua y se inactivan los microorganismos presentes en la misma, los cuales se generalizan mediante procesos físicos y químicos (ver figura 5):

- Procesos físicos

Son aquellos procesos en donde al evaporar al agua, se concentran los contaminantes, separándolos del agua. Grijalva et al. (2020) destacan cinco procesos principales. La filtración se refiere a que al pasar el agua por un elemento poroso, aquellos contaminantes queden atrapados y se pueda purificar el agua; la **aereación** es aquel proceso donde se produce un contacto entre el aire y el agua para oxigenar a esta última y excluir sustancias volátiles o gases; la **adsorción**, en la cual un sólido o líquido atrae y retiene en su superficie gases, vapores, líquidos o cuerpos disueltos y la **sedimentación** que es la separación por la acción de la gravedad de las partículas suspendidas que tienen mayor peso específico que el agua.

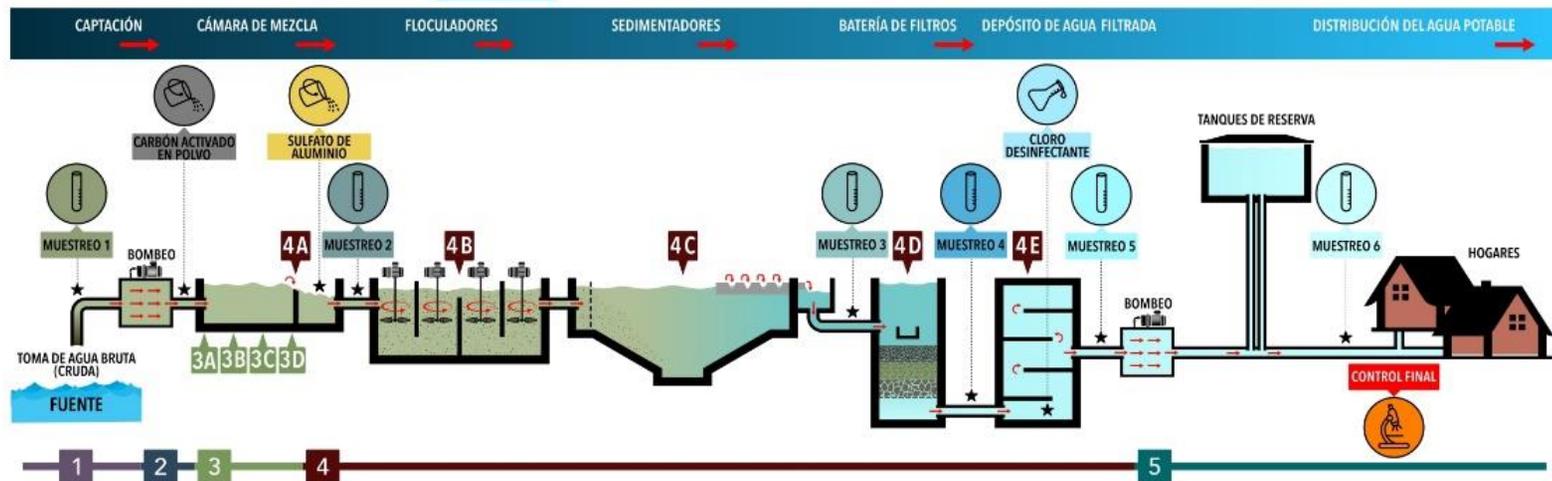
- Procesos químicos

Definidos como la adición de sustancias para dar como resultado nuevas. La **coagulación** es el proceso donde se añaden polímeros coagulantes y cloro; el **ablandamiento** (o intercambio iónico), según Moreira (2016) “es aquella técnica que sirve para eliminar los iones de calcio, magnesio y hierro” y la **oxidación** (o **desinfección**) la cual produce una reacción química que permite obtener compuestos inorgánicos en moléculas simples como el agua H₂O, dióxido de carbono (CO₂) y el nitrógeno (N₂).

Para tratar el agua eficientemente, se realizan muchas de las operaciones anteriormente mencionadas en conjunto y durante varios ciclos, para garantizar el uso de agua limpia o potable. Estas operaciones son llevadas a cabo en las plantas potabilizadoras, donde algunos procesos cotidianos para tratar el agua son la coagulación, sedimentación, filtración, desinfección, almacenaje y análisis.



Abastecimiento de agua potable



Etapas del proceso de potabilización del agua mediante el cual se transforma el agua bruta (cruda) en agua potable



FIGURA 5. PROCESO DE ABASTECIMIENTO Y TRATAMIENTO DE AGUA (OBRAS SANITARIAS DEL ESTADO, 2020)

2 Objetivos

Objetivo general

Llevar a cabo un análisis estadístico con el fin de determinar los factores de mayor impacto en un proceso de desalación de agua de pozo.

Objetivos particulares

- Determinar los valores óptimos en los factores que producen la cantidad máxima de agua desalada (variable respuesta).
- Conocer cuantitativamente el comportamiento termodinámico del sistema.
- Determinar la factibilidad del proyecto con respecto de los valores obtenidos.

3 Metodología

Este proyecto de investigación fue realizado en la Universidad Nacional Autónoma de México campus Ciudad Universitaria, en el Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT), dentro del Grupo de Ingeniería de Procesos a cargo del Dr. Gabriel Ascanio Gasca. La experimentación se realizó en un lapso de 7 sesiones a lo largo de finales de noviembre a mediados de diciembre del 2021. Los experimentos de optimización se realizaron durante las dos últimas semanas de enero del 2022.

El capítulo que se presenta a continuación describe en primera instancia la disposición física del equipo y sus indicaciones; como segunda parte se describe cómo se concibió y planteó el diseño experimental y la tercera parte se refiere a la experimentación.

3.1 Montaje experimental

La figura 6 muestra el montaje experimental empleado para las pruebas de desalación de salmuera, el cual constó de un reactor de vidrio, una bomba centrífuga marca Truper de ¼ HP, un transformador variable marca Staco Energy Products Co, un intercambiador de calor marca Danfoss Optyma modelo MCGB0033R60000B, una bomba de vacío marca BUCHI V 300, una balanza de medición OHAUS, un conductímetro marca Metrohm modelo 912, un controlador instrumental P100, un multímetro industrial marca FLUKE 87 V (con un rango de temperatura: -200.0 [°C] a 1090 [°C]). (Ver Anexo I para más información de los equipos)

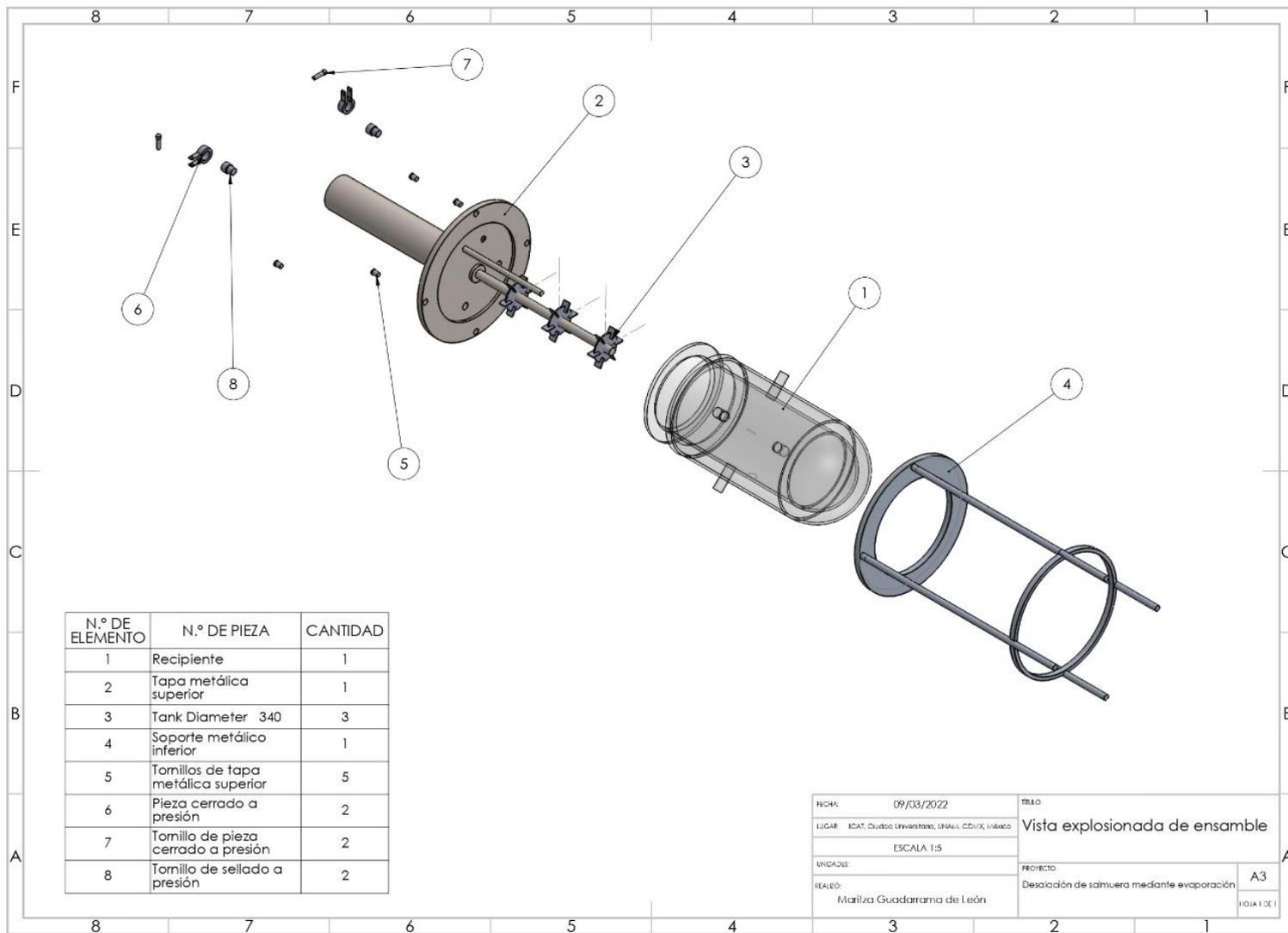


FIGURA 6. MONTAJE EXPERIMENTAL. (2021)

Para el calentamiento del agua de alimentación se utilizaron dos calentadores eléctricos para agua, ambos marca VOLTECK, uno de capacidad 23 litros y potencia de 1100 [W] y el otro de 18 litros y 900 [W]; así como dos cubetas con capacidad de 19 litros. Para la preparación de la solución se utilizaron 10 [kg] de sal de mesa y varios recipientes para medición y almacenaje de la solución; en el área de recolección de precipitado fueron requeridos dos vasos de precipitado marca PYREX con volúmenes de 250[ml] y 1000 [ml].

En el sistema de transporte de la solución de salmuera se utilizaron 2 [m] de manguera plástica de 9.525 [mm] (3/8 pulgada). Para el transporte del agua de alimentación se construyó con tubería de pvc hidráulico de 25.4 [mm] de diámetro (1 pulgada), 2 codos de pvc de 25.4 [mm] (1 pulgada), 2 tapones de inserción de 25.4 [mm] de diámetro (1 pulgada), 1 conector espiga de bronce ½” a 3/8”, válvulas de pie de bronce (pichancha o válvula *check*) y 1.5 [m] de manguera de hule de 9.525 [mm] de diámetro (3/8 pulgada).

El reactor de vidrio fue construido por el proveedor PROVIPLAB y dispone de tres partes generales: el recipiente de vidrio, la tapa metálica y la base. El recipiente de vidrio está compuesto por un cilindro de borosilicato con diámetro de 17 [cm] y 32 [cm] de altura; el recipiente interior consta de un diámetro de 13 [cm] y 35.5 [cm] de altura. Asimismo, se cuentan con cuatro puertos para conexión de mangueras, dos para el recipiente interior y los otros dos para la camisa de calentamiento. (Ver figura 7)



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Recipiente	1
2	Tapa metálica superior	1
3	Tank Diameter 340	3
4	Soporte metálico inferior	1
5	Tomillos de tapa metálica superior	5
6	Pieza cerrado a presión	2
7	Tomillo de pieza cerrado a presión	2
8	Tomillo de sellado a presión	2

FECHA:	09/03/2022	TÍTULO:	Vista explosionada de ensamble
LUGAR:	ICAT, Ciudad Universitaria, UNAM, CDMX, México	ESCALA:	1:5
UNIDADES:		PROYECTO:	Desalación de salmuera mediante evaporación
REALIZÓ:	Matiza Guadarrama de León		A3
			HOJA 1 DE 1

FIGURA 7. VISTA EXPLOSIONADA DEL REACTOR DE VIDRIO (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)

La tapa metálica fue fabricada con acero inoxidable, así como todos los aditamentos que la componen. Esta cuenta con el conjunto giratorio de motor, eje y tres turbinas Rushton de 5 [cm] de diámetro; el pozo metálico, dos puertos con sello hermético, un puerto con tornillo y cuatro tornillos de sujeción con la base. La base, también construida con acero inoxidable cuenta con la parte inferior de la tapa y el envoltente del recipiente. Entre la tapa y la base se fabricó un empaque más grueso de neopreno (3 [mm] grosor) para garantizar el sellado hermético.

La figura 8 muestra un esquema del funcionamiento general del sistema de desalación, el cual funciona de la siguiente manera: El agua a una temperatura más alta, la cual está almacenada en el tanque de almacenamiento es succionada por la bomba de agua hacia la camisa de calentamiento del reactor donde posteriormente, sale por una manguera de hule de descarga de regreso hacia el tanque. Las dos resistencias colocadas en el tanque elevan la temperatura del agua a un máximo de 90 [°C]. A continuación, la solución de salmuera contenida en el recipiente interior es agitada por un arreglo de tres turbinas Rushton de seis paletas de acero inoxidable de 5 [cm] de diámetro que garantizan el mezclado homogéneo de la salmuera. Una vez alcanzada la temperatura necesaria en el recipiente interior del reactor, se activará la bomba de vacío que succionará el vapor contenido en el recipiente interior del y se trasladará por el intercambiador de calor, la bomba de vacío y por último, el recipiente de condensado donde se medirá su conductividad eléctrica y su volumen en un determinado tiempo y temperatura.

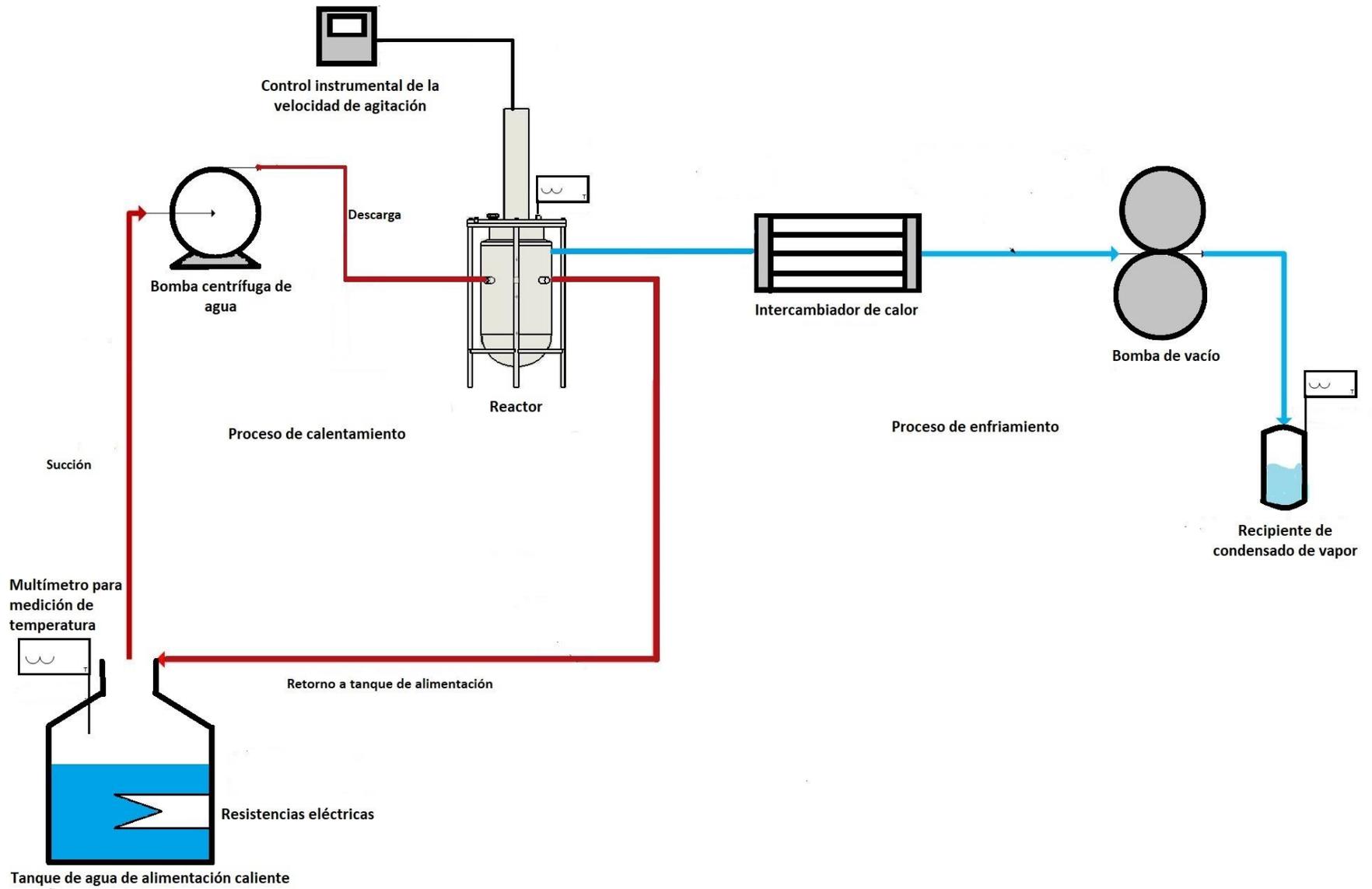


FIGURA 8. ESQUEMA DE FUNCIONAMIENTO DE SISTEMA DE DESALACIÓN DE SALMUERA (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)

3.2 Fluidos de trabajo

Como fluido de trabajo se empleó agua tomada de la llave de distribución, con sal de mesa a una concentración de 10%, 20% y 30% en un compendio de 15 mezclas de experimentación. (Ver anexo IV para el desarrollo del cálculo de la concentración de sal) Para la camisa de calentamiento se utilizó agua tomada de la llave.

3.3 Condiciones de operación

Metodología estadística con software Statgraphics Centurion

Para el diseño de experimentos, se empleó la metodología estadística al utilizar el software Statgraphics Centurion y así obtener el modelo de experimentación y posteriormente el despliegue de la información para su análisis. La elección de los factores y niveles derivaron de la observación y experiencia de fenómenos parecidos (ver figura 9), con el fin de conocer si existía predominancia de alguna, o relación entre ellas, y así saber si alguna fungió en el comportamiento termodinámico del sistema. (Para mayor detalle del diseño de experimentos y cómo se eligió el utilizado aquí, ver Anexo II Método de recolección de información y datos)

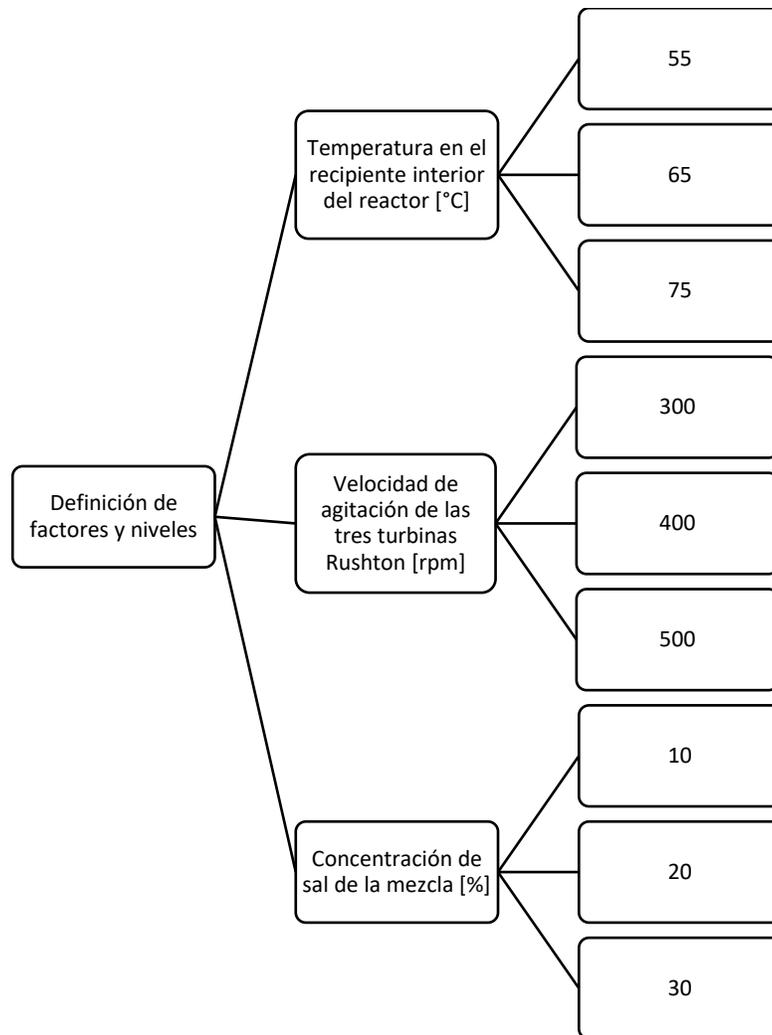


FIGURA 9. ELECCIÓN DE FACTORES Y NIVELES EN EL DISEÑO EXPERIMENTAL (ELABORACIÓN PROPIA, 2021)

Con la información ya planteada y con la elección del diseño experimental Box-Behnken se ingresaron los datos. El *software* arrojó el número y forma de los experimentos representativos mostrados abajo en la figura 10.

Experimento	Temperatura en el recipiente interior del reactor [°C]	Velocidad de agitación de las tres turbinas Rushton [rpm]	Concentración de sal de la mezcla [%]	Volumen condensado [l]
1	55	400	30	
2	65	300	30	
3	75	500	20	
4	75	400	10	
5	55	400	10	
6	65	500	10	
7	55	300	20	
8	65	300	10	
9	75	300	20	
10	75	400	30	
11	55	500	20	
12	65	500	30	
13	65	400	20	
14	65	400	20	
15	65	400	20	

FIGURA 10. LIBRO DE DATOS EXPERIMENTALES EN STATGRAPHICS (CREACIÓN PROPIA, 2021)

Procedimiento de las pruebas de experimentación

A título de ejemplo, se describe el procedimiento del experimento dos con el fin de mostrar cómo se realizaron todas las pruebas de la experimentación final. Para garantizar la continuidad en el proceso durante las pruebas finales, se corrigieron los errores y condiciones que surgieron durante las pruebas preliminares, mismas que quedaron registradas en el Anexo V. A continuación, se muestran algunas de las modificaciones más relevantes aprendidas gracias a las pruebas preliminares:

- Garantizar el sellado hermético del recipiente secundario interior.
- Evitar la apertura de la tapa del recipiente secundario interior en la medida de lo posible.
- Garantizar la calibración del conductímetro.
- Haber medido y registrado con antelación los valores de conductividad de la solución a experimentar.
- Tener listas al menos tres soluciones de salmuera consecutivas con anticipación.
- Verificar antes de cada experimento que los equipos funcionen adecuadamente (que estén conectados a la corriente, que no haya fuga en conexiones).
- Definir a todo momento en el vaso de condensado con el colador una masa de 130 [g] como referencia.
- Contar con la bomba Tupperware para la extracción y suministro de agua del recipiente secundario interior del reactor.
- Contar con dos recipientes de agua en el área de control de conductividad de condensado, uno para limpiar el sensor y otro para tomar como medición.

- Colocar el vaso de condensado (con la manguera de la salida de la bomba de vacío en el colador) en un lugar estable donde no pueda caerse ni moverse en demasía.
- Sustituir la válvula de pie (pichancha) por una nueva antes de cada inicio de jornada de experimentación.

El procedimiento del experimento dos se describe en breve, así como los resultados obtenidos de la medición.

Experimento	Temperatura en el recipiente interior del reactor [°C]	Velocidad de agitación de las tres turbinas Rushton [rpm]	Concentración de sal de la mezcla[%]	Volumen condensado [l]
2	65	300	30	

1. Abrir uno de los orificios de la tapa metálica superior.
2. Introducir la solución dos al 30% de sal utilizando la bomba Tupperware y diversos palitos de madera para poder disolver la sal.
3. Cerrar el orificio.
4. Conectar a la corriente eléctrica las dos resistencias.
5. Al llegar el recipiente de agua de alimentación a aproximadamente 40 [°C], prender la bomba de agua, así como activar la velocidad del agitador a 300 [rpm].
6. Tomar mediciones cada diez minutos de la temperatura en la cubeta y en el recipiente secundario interior del reactor (se introdujo el termopar en el pozo metálico de la tapa).
7. Purgar la bomba de agua cuando sea necesario.

8. Al llegar a los 65 [°C] dentro del recipiente interior, encender la bomba de vacío e iniciar un temporizador de 20 minutos para la extracción del volumen de condensado, depositada en el recipiente de volumen de condensado.
9. Una vez finalizado el tiempo, apagar la bomba de vacío y las resistencias eléctricas.
10. Pesar el volumen condensado.
11. Medir la temperatura del extraído condensado final ($T_{\text{condensado}}$).
12. Medir la conductividad eléctrica del extraído condensado.
13. Repetir del paso 10 al 12 y registrar valores.
14. Depositar el condensado en un recipiente separado, lavar los materiales y la bomba Tupperware.
15. Apagar el agitador metálico y la bomba de agua.
16. Abrir el orificio de la tapa metálica superior del reactor.
17. Extraer el agua remanente de la solución con ayuda de la bomba Tupperware.
18. Limpiar el recipiente secundario interior con agua limpia mediante la bomba Tupperware.
19. Introducir la solución tres en el recipiente secundario interior.

Del experimento dos se obtuvieron los siguientes resultados, dispuestos en la tabla 3:

TABLA 3. RESULTADOS OBTENIDOS DEL EXPERIMENTO DOS (ELABORACIÓN PROPIA, 2021)

Prueba	$T_{\text{camisa}} [^{\circ}\text{C}]$	K_{inicial} [mS/cm]	T_{ri} [°C]	$T_{\text{condensado}}$ [°C]	K_{final} [mS/cm]	V_{cond} [ml]	Tiempo [min]
2	87.7	48.48	65	34	0.3546	17.5	20

De la misma manera se llevaron a cabo así los quince experimentos requeridos y se llenó la columna de variable respuesta volumen de condensado como se observa en la figura 11.

Experimento	Temperatura en el recipiente interior del reactor [°C]	Velocidad de agitación de las tres turbinas Rushton [rpm]	Concentración de sal de la mezcla[%]	Volumen condensado [l]
1	55	400	30	28
2	65	300	30	17.5
3	75	500	20	40.5
4	75	400	10	33.5
5	55	400	10	9.5
6	65	500	10	24.5
7	55	300	20	6.5
8	65	300	10	6.5
9	75	300	20	39.5
10	75	400	30	38.5
11	55	500	20	17
12	65	500	30	22
13	65	400	20	11
14	65	400	20	15
15	65	400	20	12

FIGURA 11. VALORES OBTENIDOS EN STATGRAPHICS PARA LA VARIABLE RESPUESTA

4 Resultados

4.1 Resultados de Statgraphics Centurion

La información desglosada a continuación, muestra el análisis recabado por el *software* Statgraphics Centurion una vez ingresados los quince valores de la variable respuesta “volumen de condensado”.

Análisis de Varianza para el volumen condensado

La varianza estadística de una variable aleatoria es una medida de dispersión definida como la desviación al cuadrado de dicha variable respecto a su media. Gutiérrez et al. (2017) menciona que “el análisis de varianza es una técnica central en el análisis de datos experimentales puesto que calcula la contribución de cada fuente de variación o efecto (debida a tratamientos y al error) en el experimento. La prueba estadística del análisis de varianza permite concluir si los efectos afectan de manera significativa a la variable respuesta”. La figura 12 muestra los resultados de dicho análisis realizado por el *software*.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A:Temperatura	1035.13	1	1035.13	46.04	0.0011
B:RPM	144.5	1	144.5	6.43	0.0522
C:Concentración sal	128.0	1	128.0	5.69	0.0627
AA	486.54	1	486.54	21.64	0.0056
AB	22.5625	1	22.5625	1.00	0.3624
AC	45.5625	1	45.5625	2.03	0.2139
BB	11.0401	1	11.0401	0.49	0.5147
BC	45.5625	1	45.5625	2.03	0.2139
CC	38.5016	1	38.5016	1.71	0.2476
Error total	112.417	5	22.4833		
Total (corr.)	2042.43	14			

FIGURA 12. TABLA ANOVA OBTENIDA (STATGRAPHICS, 2021)

La interpretación del *software* Statgraphics Centurion mostró que “la tabla ANOVA particiona la variabilidad de Volumen condensado en piezas separadas para cada uno de los efectos. Entonces prueba la significancia estadística de cada efecto comparando su cuadrado medio contra un estimado del error experimental. En este caso, dos efectos tienen un valor-P menor que 0.05 (el valor prefijado), indicando que son significativamente diferentes de cero con un nivel de confianza del 95%”.

Diagrama de Pareto estandarizada para volumen condensado

En la figura 13 se visualiza el diagrama de Pareto del presente experimento, el cual se rige por el principio de Pareto que describe que en cualquier proceso pocos elementos son vitales, mientras que la gran mayoría no lo son: el 20% de la población provoca el 80% de las causas en el proceso. (Bonet, 2005) De igual manera, Gutiérrez et al. (2017) lo define como el principio en el que la mayoría de la variabilidad observada en un proceso se debe a unos pocos de los efectos posibles, siendo los más comunes los efectos principales o las interacciones dobles. De forma gráfica, el diagrama de Pareto representa una manera práctica de ver cuáles efectos predominan en cuanto a su magnitud, de mayor a menor importancia, sin considerar supuestos distribucionales, a comparación del diagrama de Pareto estandarizado, en el cual se presentan los valores de los efectos estimados entre el error estándar (valor del cuadrado medio del error en la tabla 12). (Gutiérrez et al., 2017) Lo que caracteriza al diagrama de Pareto estandarizado es la adición de una línea a la altura del valor crítico de las tablas de distribución estadística T de Student (ese valor se obtuvo mediante el nivel de significancia prefijado por el *software* Statgraphics de $\alpha= 0.05$ y cinco grados de

libertad del error, donde $t_{0.5,5} = 2.571$); por tanto, cualquier efecto que supere la línea serán significativos en el proceso.

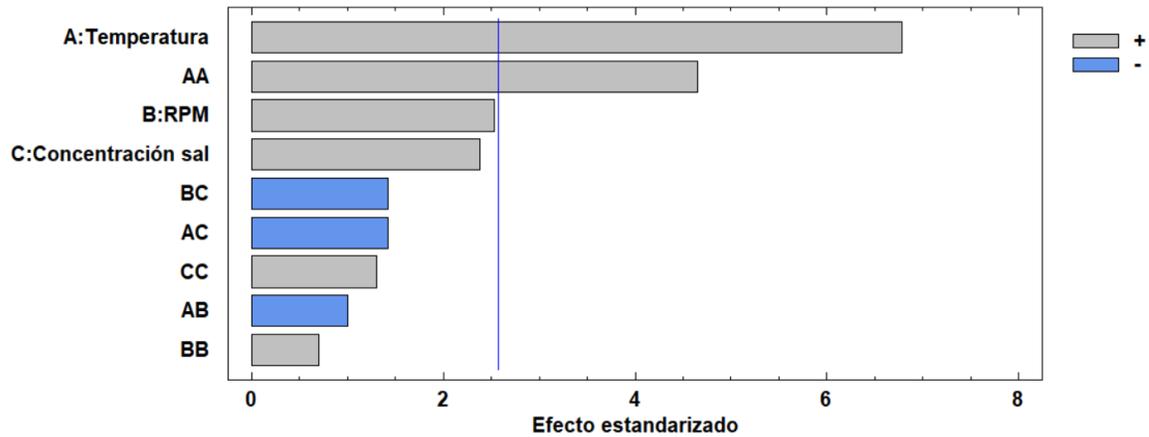


FIGURA 13. DIAGRAMA DE PARETO OBTENIDO (STATGRAPHICS, 2021)

Como se observa, dos efectos son lo suficientemente grandes como para sobrepasar el valor crítico, siendo el efecto principal de la Temperatura y su interacción cuadrática.

Superficie de respuesta estimada

Gutiérrez et al. (2017) la define como la superficie que resulta de representar gráficamente el modelo ajustado (con las condiciones óptimas), y describe el comportamiento de la respuesta promedio en cada punto de la región experimental. (Ver figura 14)

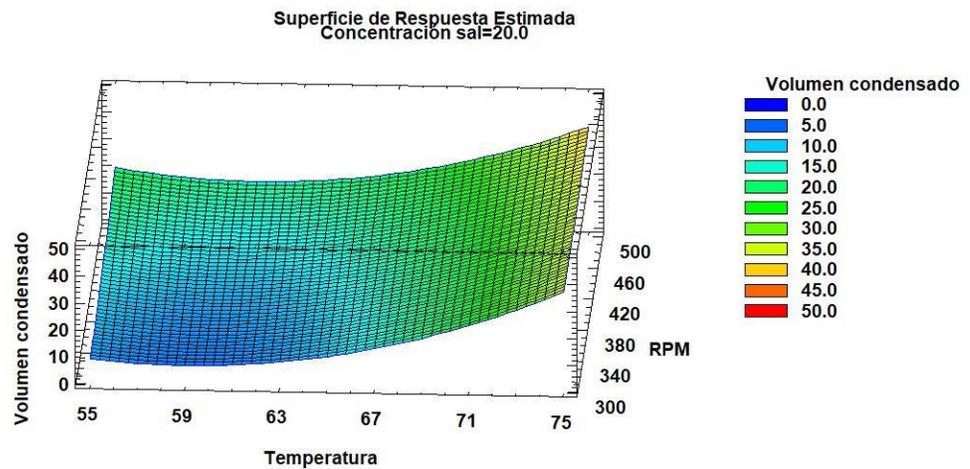


FIGURA 14. SUPERFICIE DE RESPUESTA ESTIMADA (STATGRAPHICS, 2021)

La superficie representa la variación del volumen de condensado con las combinaciones de temperatura y revoluciones por minuto, con el efecto de concentración de sal fijado en su valor medio. Se puede observar la variación de la variable respuesta en el eje de la temperatura, lo cual la tabla 12 y el diagrama de Pareto evidencia como un efecto dominante. Por tanto, se interpretaría que los valores para obtener mayor volumen de condensado serían a una temperatura alta (75 [°C]) y a cualquier nivel de revoluciones (no se observa cambios en el eje de las revoluciones por minuto)

4.2 Resultados de Statgraphics Centurion con la optimización de variable respuesta

A partir de los resultados obtenidos del volumen de condensado en los 15 experimentos, se ingresaron los resultados en el *software* y se utilizó una herramienta estadística en el mismo

programa para analizar los datos y poder predecir un experimento óptimo, como se observa en la figura 15:

Meta		Maximizar volumen condensado	
Valor óptimo		42.4928 [ml]	
Factor	Bajo	Alto	Óptimo
Temperatura [°C]	55.0	65.0	75.0
RPM [rpm]	300.0	400.0	500.0
Concentración sal [%]	10.0	30.0	29.9997

FIGURA 15. TABLA DE OPTIMIZACIÓN DE LA VARIABLE RESPUESTA (STATGRAPHICS, 2022)

Es decir, el *software* estadístico predijo, a partir de los experimentos que analizó, que las combinaciones de niveles de los factores donde se obtendría la mayor cantidad de volumen de condensado sería a una temperatura de 75 [°C], a una velocidad de agitación de 500 [rpm] y a una concentración de sal de la mezcla del 30%. Por tanto, al llevar a cabo el experimento de optimización, se obtuvieron los siguientes resultados mostrados en la tabla 4:

TABLA 4. EXPERIMENTO ÓPTIMO SIN VENTILADOR (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)

T_{camisa} [°C]	k_i [$\frac{mS}{cm}$]	T_{ri} [°C]	T_{cond} [°C]	k_f [$\frac{mS}{cm}$]	V_{cond} [ml]	t [min]
90.1	43.45	75	32.8	0.01433	31	20

Se decidió agregar un nuevo parámetro “**utilización del ventilador**” en el intercambiador de calor, debido al conocimiento previo de que añadiendo un flujo forzado de aire al intercambiador, podría aumentar la cantidad de volumen de condensado extraído. Por tanto,

al realizar el experimento óptimo dado por *Statgraphics* y añadiendo el nuevo parámetro, se obtuvieron los resultados de la tabla 5.

TABLA 5. EXPERIMENTO ÓPTIMO CON VENTILADOR (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)

$T_{camisa} [^{\circ}C]$	$k_i [\frac{mS}{cm}]$	$T_{ri} [^{\circ}C]$	$T_{cond} [^{\circ}C]$	$k_f [\frac{mS}{cm}]$	$V_{cond} [ml]$	$t [min]$
86.4	42.74	75	28.9	0.0229	49.5	20

Como se puede observar, los volúmenes condensados obtenidos con y sin ventilador se acercaron más al valor óptimo dado por el *software*, por lo cual, es importante resaltar el trabajo del ventilador el cuál propició que se rebasara el valor óptimo propuesto por 6 [ml], lo que reitera la importancia de un flujo de aire forzado en el intercambiador de calor para poder condensar más vapor de agua proveniente del reactor.

4.3 Análisis termodinámico

De acuerdo con el volumen de condensado, los resultados del experimento óptimo con ventilador fueron los utilizados para el análisis termodinámico del equipo.

Así, con los valores de optimización:

$$T_{optimización} = 75 [^{\circ}C]$$

$$rpm_{optimización} = 300 [rpm]$$

$$concentración\ de\ sal_{optimización} = 30 [\%]$$

TABLA 6. DATOS INICIALES PARA CONDICIONES ÓPTIMAS DE EXPERIMENTACIÓN (ELABORACIÓN PROPIA, 2022)

Temperatura de agua de alimentación	90 [°C]
Volumen de condensado	0.0495 [l]

Diámetro de salida del vapor	8 [mm]
Área sección transversal de salida de vapor	50.2656[cm ²]
Densidad de la salmuera al 20%	1207 $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$
Tiempo de extracción de vapor	20 [min]

Y al realizar las siguientes suposiciones:

1. El flujo es estacionario
2. Ec y Ep insignificantes y no se consideran

Se inició con la obtención de las propiedades de la solución saturada de vapor y agua a 75 [°C] de acuerdo con la tabla 7.

TABLA 7. PROPIEDADES DEL AGUA SATURADA A 75[°C] (CENGEL, 2011)

T [°C]	P_{sat} [kPa]	v_f $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$	v_g $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$	u_f $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	u_g $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	h_f $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	h_g $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2475.3	314.03	2634.6

Posteriormente, se obtuvo información relevante como:

- Líquido que se evaporó (cantidad de vapor extraído)

Del modelo para obtener la densidad:

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{kg}{m^3}\right]$$

Se despejó la masa y se utilizó el volumen específico obtenido anteriormente (v_f) como el inverso de la densidad.

$$m = \frac{\Delta V_{condensado}}{v_f} = \frac{0.0495 [l]}{0.001026 \left[\frac{m^3}{kg} \right]} \left(\frac{1 [m^3]}{1000 [l]} \right) = 0.0482 [kg]$$

- Flujo másico del vapor de salida

De acuerdo con la ecuación de la tasa flujo másico:

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Se calculó para el vapor extraído

$$\dot{m} = \frac{m}{\Delta t} = \frac{0.0482 [kg]}{20 [min]} = 0.00241 \left[\frac{kg}{min} \right] = 40.167 \times 10^{-6} \left[\frac{kg}{s} \right]$$

- Flujo volumétrico del vapor de salida

De la ecuación del flujo másico:

$$\dot{m} = \rho Q \left[\frac{kg}{s} \right]$$

Se despejó el flujo volumétrico para la obtención de su cálculo:

$$Q = \dot{m} v_g = \left(40.167 \times 10^{-6} \left[\frac{kg}{s} \right] \right) \left(4.1291 \left[\frac{m^3}{kg} \right] \right) = 1.6585 \times 10^{-4} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

- Velocidad de salida del vapor

Definida al despejar una de las ecuaciones del flujo másico:

$$V = \frac{\dot{m}}{\rho_g A_t} \left[\frac{m}{s} \right]$$

Se obtuvo la velocidad de salida como:

$$V = \frac{\dot{m}v_g}{A_t} = \frac{(40.167 \times 10^{-6} [\frac{kg}{s}])(4.1291 [\frac{m^3}{kg}])}{5.02656 \times 10^{-5} [m^2]} = 8.055 \times 10^{-4} [\frac{m}{s}]$$

Asimismo, se decidió proseguir con el análisis del calor en el sistema calculando los siguientes valores:

- Cálculo de calor sensible y calor latente para evaporar la solución de salmuera

En una sustancia, el calor sensible es aquel en el que se observa una variación en la temperatura, sin existir un cambio de fase. Por el contrario, el calor latente se define como aquel necesario para producir un cambio de fase a otra, en donde se absorbe o cede calor sin que se produzca un cambio de la temperatura del sistema.

Sean

$$Q_{sensible} = mc\Delta T [kJ]$$

$$Q_{latente} = m\lambda [kJ]$$

las ecuaciones que describen el calor sensible y latente, respectivamente, donde:

$$m = \text{masa del elemento [kg]}$$

$$c = \text{capacidad térmica específica} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$\Delta T = \text{diferencia de temperaturas [K]}$$

$$\lambda = \text{Calor latente de vaporización} \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

El calor específico de una sustancia es la cantidad de energía en forma de calor que se debe suministrar a una unidad de masa para que la misma aumente en una unidad su temperatura.

$$c = \frac{Q}{m\Delta T} \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

donde

$$Q = \text{calor [J, kJ]}$$

$$m = \text{masa [kg]}$$

$$\Delta T = \text{Diferencia de temperatura, } T_2 - T_1 \text{ [K]}$$

Así, se obtuvieron los calores sensible y latente de la solución con los datos de la experimentación óptima.

$$c_{\text{salmuera20\%}} = 3.11 \left[\frac{kJ}{kgK} \right]$$

$$\lambda_{\text{ebullición}} = 2260.440 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\Delta T_{\text{ebullición}} = 75 - 20 = 55 [^{\circ}\text{C}]$$

$$Q_{\text{sensible}_{\text{liquido}}} = (2 \text{ [kg]}) \left(3.11 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] \right) (348.15 - 293.15 \text{ [K]}) = 342.1 \text{ [kJ]}$$

$$Q_{\text{latente}_{\text{ebullición}}} = \lambda m$$

$$Q_{\text{latente}} = \left(2260.440 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \right) (2 \text{ [kg]}) = 4520.88 \text{ [kJ]}$$

Para posteriormente obtener el calor total:

$$Q_{total} = Q_{sensible_{liquido}} + Q_{latente_{ebullición}} = 342.1 [kJ] + 4520.88 [kJ] = 4862.98 [kJ]$$

- Cálculo del tiempo necesario para evaporar toda la solución de salmuera

De la ecuación de calor por unidad de tiempo se obtuvo:

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{mc\Delta T}{t} = \frac{(2 [kg]) \left(3.11 \left[\frac{kJ}{kgK} \right] \right) (348.15 - 293.15 [K])}{(2 [h]) \left(\frac{3600 [s]}{1 [h]} \right)} = 171.05 \left[\frac{kJ}{h} \right]$$

Posteriormente se obtuvo el calor total siendo la suma del calor sensible y latente:

Se despejó el tiempo de la ecuación de la potencia calorífica:

$$t_{total} = \frac{Q_{total}}{\dot{Q}} = \frac{4862.98 [kJ]}{171.05 \left[\frac{kJ}{h} \right]} = 28.43 [h]$$

- Trabajo eléctrico realizado sobre la solución de salmuera

Definiendo la potencia eléctrica como:

$$W_e = VI [W]$$

O si V como I permanecen constantes durante un intervalo de tiempo definida como trabajo eléctrico:

$$W_e = VI\Delta t [kJ]$$

Donde:

$V = \text{Diferencia de potencial}$

$I = \text{Corriente}$

$\Delta t = \text{Intervalo de tiempo}$

Y considerando la potencia de las dos resistencias eléctricas como $W_e = 2000 [W]$ y el tiempo de operación de las resistencias eléctricas de 2 [h]:

$$W_e = \left(2000 \left[\frac{J}{s}\right]\right) (7200[s]) = 14400 [kJ]$$

- Cálculo del calor perdido

De acuerdo con la primera ley de la Termodinámica para un sistema abierto:

$$E_{entrada} - E_{salida} = \Delta E_{sistema}$$

$$W_e - Q_{salida} = \Delta H$$

$$W_e - Q_{salida} = m(h_2 - h_1) = mc(T_2 - T_1)$$

Además, se agrega al cálculo el calor latente ya que sólo se estaba considerando el cambio en temperatura:

$$14400 [kJ] - Q_{salida} = (2 [kg]) \left(\left(3.11 \left[\frac{kJ}{kgK}\right] \right) (348.15 - 293.15 [K]) \left(2260.440 \left[\frac{kJ}{kg}\right] \right) \right)$$

$$Q_{salida} = 9537.02 [kJ]$$

- Estimación de calor con entalpías

De forma análoga, se intentó estimar el comportamiento del sistema a un ciclo de vapor para obtener información más aproximada y detallada en cada punto del sistema y sacar el Q_{salida} por medio del uso de entalpías. (Ver figura 16)

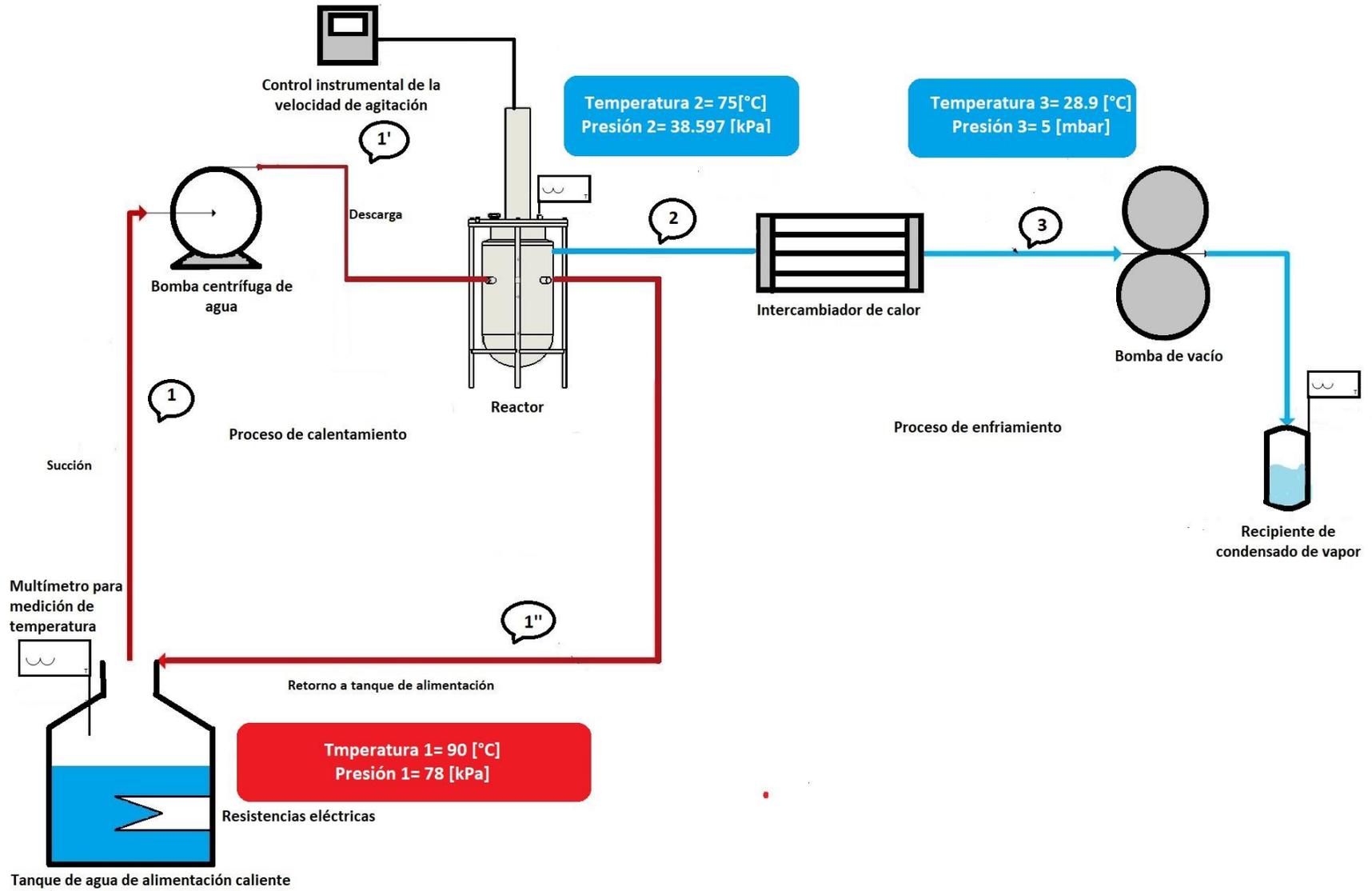


FIGURA 16. ESQUEMA DEL FUNCIONAMIENTO TERMODINÁMICO DEL SISTEMA (CREACIÓN PROPIA, 2022)

Sin embargo, debido a diversas dificultades con la instrumentación, las presiones en el sistema no pudieron ser medidas, por lo que se tuvo que dar la suposición de ciertos estados y propiedades. A continuación, se mencionan los supuestos realizados:

- El intercambiador de calor se supone como ideal (adiabático).
 - Se ignoran las pérdidas de calor en tuberías y mangueras.
 - Se toman las presiones de saturación a 75[°C] y 90[°C] como válidas debido a falta de medición en esos puntos.
 - Se considera la densidad de la salmuera al 20[%] de concentración como la usada debido a la falta de información.
- Cálculo de entalpías del proceso

Tanque de agua de alimentación

1.

$$T_1 = 90[^\circ\text{C}] = 363.15 \text{ [K]}$$

$$P_1 = 78 \text{ [kPa]}$$

Siendo la P_1 la presión atmosférica en la Ciudad de México. Calculando directamente de la tabla A-4, considerando h_1 como una aproximación a líquido saturado

$$h_1 = 377.04 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

$$v_{1f} = 0.001036 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

Entrada de camisa de calentamiento

- 1.1 Se consideró una $T=90[^\circ\text{C}]$ para el agua de alimentación y así como su existencia en líquido saturado. Se debieron considerar los cálculos como aproximados:

De acuerdo con el modelo para obtener el trabajo de la bomba:

$$W_b = h'_1 - h_1$$

$$W_b = v_1(\Delta P)$$

Suponiendo que $P_{sat \text{ a } 90^\circ\text{C}} = 70.183 \text{ [kPa]}$ entonces,

$$P_{camisa_{abs}} = 70.183 + 78 = 148.183 \text{ [kPa]}$$

$$h'_1 = h_1 + v_1(\Delta P)$$

$$h'_1 = 377.04 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] + \left(0.001036 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right] \right) (148.183 \text{ [kPa]} - 78 \text{ [kPa]}) = 377.11 \left[\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right]$$

Salida del vapor de agua

2. Considerando este punto siendo la salida de vapor de agua del recipiente interior con la mezcla de salmuera, se toma la temperatura de optimización de $75[^\circ\text{C}]$ y su correspondiente en tablas de vapor saturado a $P_{saturación} = 38.597 \text{ [kPa]}$. Donde:

$$T_2 = 75 \text{ [}^\circ\text{C]}]$$

$$P_{salida \text{ vapor }_{abs}} = 38.597 + 78 = 116.597 \text{ [kPa]}$$

De la tabla de presiones de agua saturada A-5, se interpolaron los siguientes valores a la presión $P_{salida\ vapor\ abs} = 116.597 [kPa]$

$$h_f = 435.165 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$h_{fg} = 2246.37 \left[\frac{kJ}{kg} \right] \text{ (esta es la entalpia de vaporización)}$$

$$h_g = 2681.52 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Obteniendo la calidad X

$$T_2 = 75 [^{\circ}C]$$

$$V_T = 2 [l]$$

Para obtener la masa total de la solución de salmuera m_T , se consideró:

$$\rho = 1207 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \text{ (salmuera a 20\%)}$$

$$m = \rho V$$

$$m_T = \left(1207 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) \left(\frac{1 [m^3]}{1000 [l]} \right) (2 [l]) = 2.414 [kg]$$

Ahora bien, con un volumen obtenido de condensado:

$$v_{condensado} = 0.49 [ml]$$

Se consideró que el vapor extraído no tiene sales, por lo que se usa la densidad del agua natural.

$$m_g = (0.049 [l]) \left(\frac{1 [m^3]}{1000 [l]} \right) \left(1000 \left[\frac{kg}{m^3} \right] \right) = 0.049 [kg]$$

Se despejó la masa del líquido para obtener posteriormente la calidad:

$$m_T = m_f + m_g$$

$$m_f = 2.414 [kg] - 0.0489 [kg]$$

$$m_f = 2.3658 [kg]$$

$$x = \frac{m_{vapor}}{m_{total}} = \frac{0.0489}{2.414} = 0.0199$$

Una vez obtenida la calidad se usó para obtener h_2

$$h_2 = h_f + xh_{fg}$$

$$h_2 = 435.165 + (0.0199)(2246.37) = 479.867 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

3. En el intercambiador de calor se supusieron las propiedades $T=35[^\circ C]$ y $P=78.5[kPa]$

Interpolando de la tabla A – 5 de agua saturada

$$h_{f_3} = 389.0698 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Determinación de eficiencia térmica del proceso

$$q_{entrada} = h_2 - h'_1 = 479.867 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 377.04 \left[\frac{kJ}{kg} \right] = 102.827 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$q_{salida} = h_3 - h_2 = 389.0698 \left[\frac{kJ}{kg} \right] - 479.867 \left[\frac{kJ}{kg} \right] = -90.79 \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

$$\eta_{térmica} = 1 - \frac{q_{salida}}{q_{entrada}} = 1 - \frac{90.79}{102.827} = 0.117 \text{ o } 11.7[\%]$$

Cálculo del calor sensible de salida:

$$W_e - Q_{salida} = m(h_2 - h_1)$$

$$14400 [kJ] - Q_{salida} = (2 [kg])(479.867 - 376.74 [kJ])$$

$$Q_{salida} = 14193.746 [kJ]$$

Conclusiones

En este trabajo se presentó la situación actual mundial con respecto al agua utilizable, encontrando que cada vez la cantidad y frecuencia de la misma va en disminución, por ello, es menester encontrar alternativas viables para no continuar impactando de forma directa la transformación de los ecosistemas por la sobreexplotación del agua. Por ende, se analizó la cantidad de condensado de agua utilizable posible obtener en un sistema experimental de desalación de salmuera, al manipular las variables de temperatura, la velocidad de agitación de las tres turbinas Rushton y la concentración de sal.

Se utilizó el análisis estadístico como herramienta principal del modelado experimental, la cual proporcionó la secuencia a seguir de forma organizada, y así permitió conocer que el factor que más influyó en la cantidad de condensado posible de obtener fue la temperatura, así como el desglose de las condiciones óptimas para obtener el mayor volumen de condensado, las cuales estimaban un óptimo de condensado de casi 43 [ml] en 20 minutos.

Respecto al análisis termodinámico efectuado, se encontró que para producir 49 [ml] de condensado en 20 minutos, usando el ventilador, se requirieron de 14400 [kJ] , de los cuales 9537.02 [kJ] fueron calor de salida, resultando en una eficiencia del 11.7%. Asimismo, se observó la importancia de la utilización del ventilador para condensar más vapor de agua al haber una diferencia de 18.5 [ml] entre el uso del ventilador y su no utilización.

Del análisis estadístico y termodinámico se puede concluir que sería conveniente disminuir el uso de energía del motor del eje con las turbinas Rushton, ya que su efecto no es imprescindible para obtener más cantidad de agua desalada. Además, si bien el sistema es

factible y se obtiene agua limpia, se podrían considerar otras alternativas de uso energético como la solar o en paralelo, tal como lo propusieron Rania y sus compañeros (2021).

Como recomendaciones para la reproducción de este experimento, se sugiere la compra de suficientes válvulas de pie, ya que en las condiciones en las que se encuentra el sistema, se debe cambiar la misma en cada jornada de experimentación debido a que el empaque de la válvula pierde rigidez por las altas temperaturas dentro del tanque de alimentación lo que impide realizar óptimamente su función. Como trabajo a futuro se recomienda que se mejore el sistema de aislamiento térmico del reactor de vidrio, colocándole algún material aislante alrededor para evitar que el desperdicio de calor no sea tan grande; asimismo, se podría implementar un sistema electroneumático sustituyendo la válvula de pie por una válvula normalmente cerrada; de igual forma se sugiere la utilización de una bomba hidráulica que funcione a altas temperaturas; por último, se propone innovar el sistema de control para poder obtener mediciones de presión en diversos puntos del sistema. Por último, se hace hincapié a la necesidad de innovar la forma de energía aplicada al experimento a alternativas sustentables, como la energía solar.

Para finalizar, se debe recordar que este proyecto se realizó a nivel laboratorio para comprobar el método propuesto y con todas las recomendaciones previamente mencionadas, al escalarlo, se pueda mejorar significativamente la obtención de agua utilizable y eventualmente garantizar el uso de este sistema en más áreas de la sociedad.

Referencias

Aguamarket (n.d). *Aereación de líquidos*. Consultado el 19 de abril, 2021 en <https://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=39>

Ainia (2016, 22 de junio). *Oxidación en agua supercrítica, aplicaciones para tratamiento de depuración de aguas residuales*. <https://www.ainia.es/tecnoolimentalia/tecnologia/oxidacion-en-agua-supercritica-aplicaciones-para-tratamientos-de-depuracion-de-aguas-residuales/#:~:text=Cuando%20a%20una%20corriente%20de,compuestos%20org%C3%A1nicos%20son%20completamente%20oxidados.>

Alireza, R., Reyhaneh, L., Shuhaimi, B.M., Gholamhassan, N., Milad, S., Mohamed, M., Mohammad, H.A. (2022) Hybrid solar desalination system for generation electricity and freshwater with nanofluid application: Energy, exergy and environmental aspects. *Elsevier*. [\(PDF\) Assessment of a solar-driven cogeneration system for electricity and desalination \(researchgate.net\)](#)

Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción (n.d) *Capítulo 3: Sistemas de adsorción*. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4986/fichero/Cap%C3%ADtulo3+Sistema+de+adsorci%C3%B3n.pdf> [Consultado 22-04-2021]

Anderson, E. (2012) *Introduction to Geographic Information Systems and Remote Sensing for Water Quality and other environmental analyses*. [Imagen] [PPT – Introduction to Geographic Information Systems and Remote Sensing for Water Quality and other environmental analyses PowerPoint Presentation – ID:1635560 \(slideserve.com\)](#)

Arreguín, F. (2011- Junio) *Disponibilidad de agua subterránea en México*. [Presentación]. Jornadas técnicas, Instituto de Ingeniería, UNAM, Ciudad de México, México.

Bruni, M., Shrestha, R., Spuhler, D. (2020). *Sedimentación*. Gestión de agua y saneamiento sostenible <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y-saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/sedimentaci%C3%B3n->

BÛCHI Labortechnik AG (2021) *Vacuum pump V-300 Operation manual*. Recuperado de [OM_11593756_V-300 en \(buchi.com\)](https://www.buchi.com/OM_11593756_V-300_en)

Cengel, Y. y Boles, M. (2012). *Termodinámica*. McGraw Hill.

Comisión Nacional del Agua. (2006) *El agua en México*. México: Subdirección General de Programación. <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EL-AGUA-EN-MEXICO.pdf>

Comisión Nacional del Agua. (2011) *Estadísticas del agua en México*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. [SGP-1-11-EAM2011.pdf \(conagua.gob.mx\)](https://www.conagua.gob.mx/SGP-1-11-EAM2011.pdf)

Comisión Nacional del Agua (2020) *Programa Nacional Hídrico 2020-2024*. México. Diario Oficial de la Federación. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5609188&fecha=30/12/2020

Comisión Nacional del Agua (2021, 13 de abril). Fortalecemos nuestras prácticas hídricas con la cooperación internacional. *Somos Conagua revista digital*, año 2, número 61.: <https://www.gob.mx/conagua/documentos/boletin-somos-conagua>

Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (2021) *Ríos y lagos*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/ecosismex/rios-y-lagos>

Cousteau, J. (1994) *Enciclopedia del mar*. (Vols. A-c) Ediciones Folio S.A

Fuentes, J. (1993) *Aguas subterráneas*. Instituto Nacional de Reforma y Desarrollo Agrario. [Aguas subterráneas – Dialnet \(unirioja.es\)](https://www.dialnet.unirioja.es)

García, A. A. (2018, 17 de septiembre) *Qué es la sedimentación del agua potable*. Ecología verde. <https://www.ecologiaverde.com/que-es-la-sedimentacion-del-agua-potable-1507.html>

Gómez, Y. y Rodríguez L., (2007, julio) El origen cósmico del agua. *Revista Ciencia*, 7-16. http://www.revistaciencia.amc.edu.mx/images/revista/58_3/PDF/03-554.pdf

Grijalva, A., Jiménez, M. y Ponce, H. (2020) *Desmineralización del agua como respuesta ante el cambio climático*. Editorial Saberes del Conocimiento 4(4), 25-34. [Desmineralización del agua como r... preview & related info | Mendeley](https://www.mendeley.com/publications/preview/related-info/Desmineralizacion-del-agua-como-r...-preview-&-related-info-Mendeley)

Gutiérrez, P. H., De la Vara, S. R. (2017) *Análisis y diseño de experimentos* (2da ed.). McGraw Hill.

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2020, 8 de junio) *La eutrofización de cuerpos de agua: un síntoma antropogénico que requiere atención*. Gobierno de México. <https://www.gob.mx/imta/articulos/la-eutrofizacion-de-cuerpos-de-agua-un-sintoma-antropogenico-que-requiere-atencion>

Instituto Nacional de Geografía y Estadística (n.d) *Hidrografía*. Consultado el 2 de mayo, 2021 en <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia/>

Jiménez, C. B., Torregrosa, A. M., Aboites, A., L. (Eds.) (2010) *Estadísticas del agua en México: Capítulo 3*. Academia Mexicana de Ciencias. <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2011/03/elaguaenmexico-caucesyencauces.pdf>

Kalff, J., (2002) *Limnology, Inland Water Ecosystems*. Prentice Hall.

Khan Academy (n.d) *Los puentes de hidrógeno en el agua*. Consultado el 15 de abril, 2021 en <https://es.khanacademy.org/science/ap-biology/chemistry-of-life/structure-of-water-and-hydrogen-bonding/a/hydrogen-bonding-in-water#:~:text=Mol%C3%A9culas%20de%20agua%20formando%20un,mol%C3%A9culas%20polares%20y%20por%20iones.>

López, M., Romano, E. y Triana, J. (2005) *El agua*. Universidad de las Palmas de Gran Canaria.

Mazille, F. y Spuhler, D. (2020) *Coagulación, floculación y separación*. Gestión de agua y saneamiento sostenible. <https://sswm.info/es/gass-perspective-es/tecnologias-de-agua-y->

[saneamiento/tecnologias-de-abastecimiento-de-agua/coagulaci%C3%B3n-y-floculaci%C3%B3n-y-separaci%C3%B3n#:~:text=La%20coagulaci%C3%B3n%2Dfloculaci%C3%B3n%20es%20una,ca pacidad%20de%20eliminaci%C3%B3n%20de%20part%C3%ADculas](#)

Metrohm AG. (2020). *912/913/914 Meter*. [Imágenes] Recuperado de [Manual de pH-metro/conductímetro 912/913/914 \(metrohm.com\)](#)

Moreira, A. (2016) *Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua*. Revista científica dominio de las ciencias, 2(3), 338-341. [Consideraciones actuales sobre ablandamiento del agua | Moreira-Romero | Dominio de las Ciencias](#)

Obras Sanitarias del Estado (2020) *Etapas del proceso de potabilización*. <http://www.ose.com.uy/agua/etapas-del-proceso-de-potabilizacion>

Ordoñez, J.(2011) *Cartilla técnica: aguas subterráneas-acuíferos*. (1ra ed.) Sociedad Geográfica de Lima.

Pardo, A., (2013) *El origen del agua terrestre: la ciencia actual desde la visión de Odón de Buen*. Researchgate, 32-34. [\(PDF\) El origen del agua terrestre: la ciencia actual desde la visión de Odón de Buen \(researchgate.net\)](#)

RAE (2021) *Volátil*. Disponible en: <https://dle.rae.es/vol%C3%A1til?m=form> [Consultado 1-05-2021]

RAE, (2021) *Definición de atmósfera*. Disponible en: <https://dle.rae.es/atm%C3%B3sfera?m=form> [Consultado 18-04-2021]

Rania, R.M. y Tarek, M.H. (2021) Estimating the potential of desalinate seawater using solar glass pyramid (SGP) in hot arid zones. *Elsevier*. [\(PDF\) Estimating the potential of desalinate seawater using solar glass pyramid \(SGP\) in hot arid zones \(researchgate.net\)](#)

Ritchie, H. y Roser, M. (2018) *Water use and stress*. Our world in data. [Water Use and Stress – Our World in Data](#)

Robles, C. M. (2018) *Material didáctico*. [Disertación de licenciatura, UNAM] [Material didáctico.pdf \(unam.mx\)](#)

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013) *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. (1ra ed.). Cuadernos de divulgación ambiental

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (n.d) *Regiones hidrológicas*. Consultado el 20 de abril, 2021 en <http://gisviewer.semarnat.gob.mx/aplicaciones/Atlas2015/agua.html>

Sociedad Española de Astronomía (n.d) *Acresión (o acrecimiento)*. Consultado el 21 de abril, 2021 en <https://www.sea-astronomia.es/glosario/acresion-o-acrecimiento>

Staco Energy Products Co. (n.d) *Transformadores variables*. Consultado el 17 de enero,2022 de [StacoVT – Staco Energy Products Co.](#)

[Imagen sin título ni descripción]. *Transformador variable*. [Imagen] Recuperado el 19 de enero,2022 de [Staco Energy Products – Seekweb](#)

Truper (2022) *Ficha técnica bomba centrífuga para agua modelo europeo ¼ HP*. Recuperado de [Ficha técnica Bomba centrífuga para agua modelo europeo, ¼ HP, Expert \(truper.com\)](#)

Truper (2022) *Bomba centrífuga de agua ¼ HP, marca Truper*. [Imagen] Recuperado de [ficha-print.php \(truper.com\)](#)

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (2003) *Water for people, water for life. Executive summary of the UN world water development report*. UNESCO/Mundi-Prensa Libros

US Geological Survey. (2019) *El ciclo del agua*. [Imagen] Recuperado de [El Ciclo del Agua, The Water Cycle, Spanish | U.S. Geological Survey \(usgs.gov\)](#)

Vargas,R. y Piñeyro, N. (2005) *El Hidroscopio*. PNUMA.

Anexo I Especificaciones técnicas de equipos y materiales

○ Bomba de agua ¼ HP marca Truper

FICHA TÉCNICA DE BOMBA CENTRÍFUGA PARA AGUA MODELO EUROPEO ¼ HP(TRUPER, 2022)

Potencia	¼ HP
Altura máxima	16 [m]
Flujo máximo	70 [L/min]
Máxima profundidad de succión	8 [m]
Diámetro de entrada/salida	1” NPT
Velocidad	3,450 [rpm]
Ciclo de trabajo	50 min de trabajo por 20 min de descanso. Máximo diario 6 h
Tensión/Frecuencia	127 [V] / 60 [Hz]
Consumo	3.5 [A]
Materiales	Impulsor de latón Cubierta de aluminio



BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

BOMBA CENTRÍFUGA DE AGUA 1/4 HP, MARCA TRUPER. (TRUPER, 2022)

○ **Transformador variable marca Staco Energy Products Co modelo 3PN1010B**

FICHA TÉCNICA DEL TRANSFORMADOR (STACO VT, ND)

Tipo de fase	Monofásica
Voltaje de entrada	120 [V]
Máximo voltaje de salida	0 a 117% del voltaje de entrada de la unidad
Frecuencia	60 [Hz]
Rango de amperaje	0-25 [A]



TRANSFORMADOR VARIABLE. (STACO VT, ND.)

TRANSFORMADOR VARIABLE. (STACO VT, ND.)

○ **Bomba de vacío Buchi v-300**

FICHA TÉCNICA DE BOMBA DE VACÍO BUCHI V-300 (BUCHI LABORTECHNIK AG, 2021)

Dimensiones	200x321x291 [mm]
Peso	7.6 [kg]
Capacidad de succión	1.8 [m ³ /h]
Vacío final (absoluto)	5 [mbar] (+-2 mbar)
Consumo	180 [W]
Frecuencia	50/60 [Hz]
Velocidad máxima	1500 [rpm]
Niveles de sonido	32 (10% carga)- 57 (100% carga) [dBA]
Temperatura ambiente	5-40 [°C]
Humedad relativa máxima	80%

TRANSFORMADOR VARIABLE. (STACO VT, ND.)

BOMBA DE VACÍO V-300 (BUCHI, 2019)
VT, ND.)

TRANSFORMADOR VARIABLE. (STACO VT, ND.)

- **Multímetro industrial Fluke 87 V**

TABLA DE ESPECIFICACIONES DE MULTÍMETRO FLUKE 87 V.(FLUKE, 2021)

Voltaje de CC máximo	1000 [V] +- (0.05%)
Voltaje de CA máximo	1000 [V] +- (0.7%)
Corriente CC máxima	10 [A] +- (0.2%)
Corriente CA máxima	10 [A] +- (1.0%)
Medición de la temperatura	-200[°C] – 1090[°C]
Temperatura de funcionamiento	-20 ° - 100[°C]



MULTÍMETRO FLUKE 87 V
(AMAZON, 2022)

- **Intercambiador de calor marca Danfoss Optyma modelo MCGB0033R60000B**

ESPECIFICACIONES INTERCAMBIADOR DE CALOR OPTYMA. (DANFOSS,2020)

Flujo de aire a 60 Hz	420 [m3/h]
Capacidad de enfriamiento nominal a 60 hZ	0.8 [kW]
Diámetro de conexión de succión	3/8 [in]
Voltaje máximo	127 [V]



CONDENSADOR DANFOSS
OPTYMA (FOTO PROPIA, 2021)

○ **Conductímetro** Metrohm modelo 912

Tabla 20 Especificación de las entradas de medida

	Gama de medida	Resolución	Exactitud de la medida ²⁾
Valor de pH	-13,000...+20,000	0,001 pH	±0,003 pH
Temperatura:			
Pt1000	-150 °C...+250 °C	0,1 °C	±0,2 °C (-20 °C...+150 °C)
con iConnect	-150 °C...+250 °C	0,1 °C	±0,4 °C (-20 °C...+150 °C)
NTC 30 kΩ	-5 °C...+250 °C	0,1 °C	±0,6 °C (+10 °C...+40 °C)
Tensión	-1200,0 mV...+1200,0 mV	0,1 mV	±0,2 mV

	Gama de medida	Resolución	Exactitud de la medida ²⁾
Conductancia ³⁾	0,1 μS...500 mS	4 dígitos significantes	±0,5% con 0,1 μS...16 μS ±0,5% con 16 μS...1 mS ±1,0% con 1 mS...500 mS
Oxígeno	0,0... +500%	0,1%	en el rango de 0...8 mg/L: +/-0,1 mg/L
	0,00... +50,00 mg/L	0,01 mg/L	en el rango de 8...20 mg/L: 0,15 mg/L en el rango de 20...50 mg/L: 10%

²⁾ ±1 dígito; sin error del sensor, bajo condiciones de referencia

³⁾ Para la conductividad debe multiplicarse el valor correspondiente por la constante de célula. Los valores indicados son válidos para c = 1/cm.

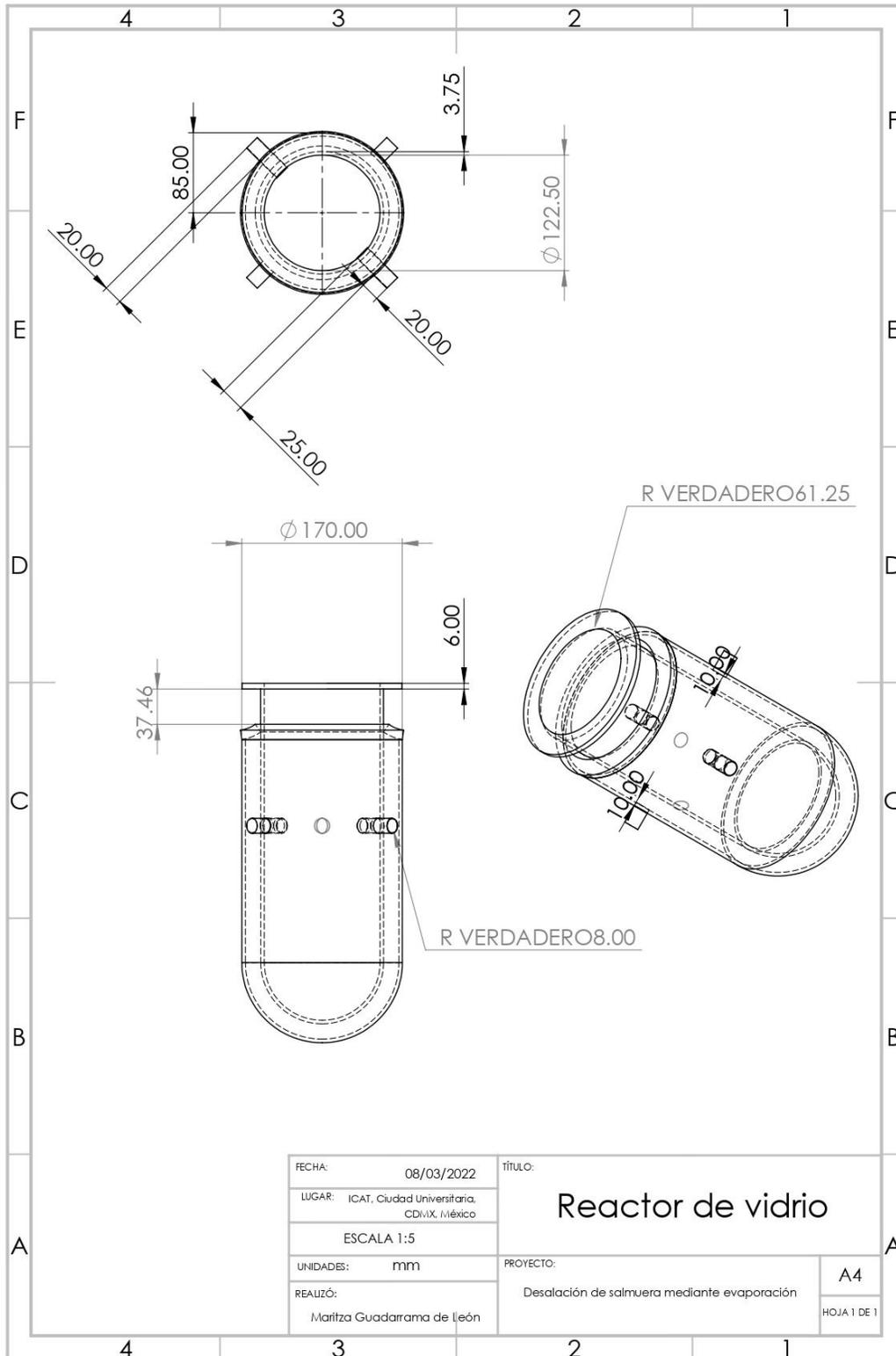
Intervalo de indicación de la medida = 1 s

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL CONDUCTÍMETRO (METROHM AG, 2020)

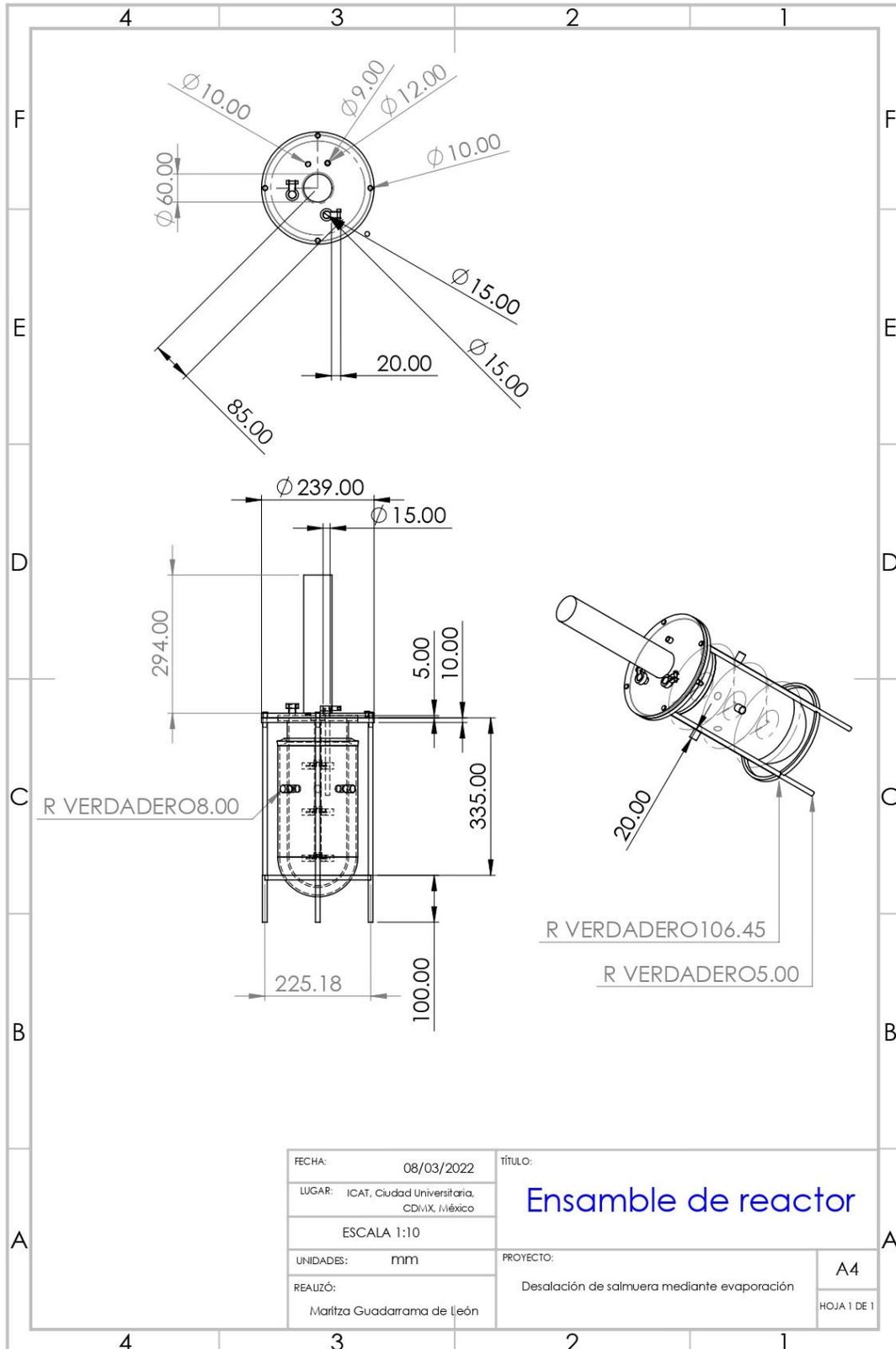


CONDUCTÍMETRO (METROHM AG, 2020)

Anexo II Planos de fabricación del reactor



Plano de reactor de vidrio (Solidworks, Elaboración propia, 2022)



PLANO DE ENSAMBLE DEL REACTOR (SOLIDWORKS, ELABORACIÓN PROPIA, 2022)

Anexo III Método de recolección de información y datos

Para el diseño de experimentos, se empleó la metodología estadística al utilizar el software Statgraphics Centurion y así obtener el modelo de experimentación y posteriormente el despliegue de la información para su análisis. Fue necesario comprender la teoría con el fin de definir las variables y factores involucrados en el experimento, los cuales se muestran a continuación; posteriormente, se hace mención de la recolección de información.

Condiciones de operación del sistema

Gutiérrez et al. (2017) menciona que “un diseño de experimentos es la aplicación del método científico para generar conocimiento acerca de un sistema o proceso, por medio de pruebas planteadas adecuadamente [...] consolidándose como un conjunto de técnicas estadísticas y de ingeniería que permiten entender mejor las situaciones complejas de relación causa-efecto”.

Para entender mejor la situación compleja del problema de esta tesis y cómo realizar una buena experimentación, se propuso descomponer el problema en términos y partes para su mejor comprensión y así determinar cuáles factores influyen en el proceso de desalación de salmuera, por ejemplo: la variable respuesta (aquella de la cual se quiere conocer su comportamiento y es de interés para el estudio) el volumen de vapor de agua condensado adquirido; los factores (aquellas variables que se pretenden manipular para obtener una variable respuesta) temperatura en el interior del recipiente con la solución, la velocidad de agitación de las tres turbinas Rushton y el porcentaje de sal en la solución de salmuera. De igual forma, fue pertinente dar un rango o intervalo a los factores, donde se definieron tres niveles por factor, siendo para la temperatura un rango de: 55[°C], 65 [°C] y 75[°C]; para la

velocidad de agitación de las turbinas Rushton 300 [rpm], 400 [rpm] y 500 [rpm]; y por último una concentración de sal de la mezcla 10[%] , 20[%] y 30[%].

La elección de los factores y niveles derivaron de la observación y experiencia de fenómenos parecidos, con el fin de conocer si existía predominancia de alguna, o relación entre ellas, y así saber alguna fungió en el comportamiento termodinámico del sistema.

Para plantear adecuadamente las pruebas por realizar, fue necesario el uso del software estadístico Statgraphics Centurion, ya que, como principal característica, ofrece la reducción en el número de experimentos por realizar mediante la aplicación de diferentes diseños experimentales y herramientas estadísticas, asimismo, permite obtener una representación geométrica y analítica de los efectos principales y su interacción dentro de un proceso experimental. En este caso, al realizar las tres combinaciones de los tres factores propuestos con sus tres niveles se tendrían que haber realizado 27 experimentos, reducidos a 15 experimentos representativos utilizando este *software* con el diseño de superficie de respuesta, resultando ventajoso ante experimentaciones con recursos limitados o con limitante de tiempo. Se continúa explicando que se debe elegir el diseño experimental con los parámetros y niveles con antelación y con el conocimiento de lo que cada uno implica; por ejemplo, en los diseños de primer orden como los diseños factoriales (los cuales estudian el efecto de varios factores sobre una o varias respuestas, cuando se tiene el mismo interés en todos los factores para así determinar una combinación de niveles de los factores en la que el desempeño del proceso sea mejor (Gutiérrez, 2015)) se permite estudiar el efecto individual y de interacción de los distintos factores principales, tienen la posibilidad de escalarse para formar diseños compuestos si se requiriera una exploración más completa o para experimentar fracciones del diseño en etapas iniciales de una investigación. Se

componen del diseño factorial 2^k (k factores con dos niveles de prueba cada uno, por ejemplo dos factores con dos niveles $2 \times 2 = 4$ experimentos) el cual se aconseja para un número de factores de dos a cinco, y el diseño factorial 3^k (k factores con tres niveles cada uno, por ejemplo dos factores con cuatro niveles y uno con tres niveles siendo $4 \times 4 \times 3 = 48$ tratamientos). Sin embargo, una de sus desventajas es la necesidad de experimentar de manera secuencial hasta encontrar el nivel de mejoras deseado, algunas veces teniendo que realizar varios diseños o aproximaciones, algo que se puede prevenir utilizando un diseño de segundo orden como el diseño de superficie de respuesta, el cual permite ajustar un modelo de segundo orden para estudiar no solo los efectos lineales y su interacción, sino los efectos cuadráticos y de curvatura. En particular, el diseño de Box-Behnken utiliza tres o más factores, suelen ser más eficientes en cuanto al número de experimentos por realizar y no incluyen los experimentos más altos o bajos por la posibilidad de ser extremos y que no puedan realizarse.

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
A: Temperatura	1035.13	1	1035.13	46.04	0.0011
B: RPM	144.5	1	144.5	6.43	0.0522
C: Concentración sal	128.0	1	128.0	5.69	0.0627
AA	486.54	1	486.54	21.64	0.0056
AB	22.5625	1	22.5625	1.00	0.3624
AC	45.5625	1	45.5625	2.03	0.2139
BB	11.0401	1	11.0401	0.49	0.5147
BC	45.5625	1	45.5625	2.03	0.2139
CC	38.5016	1	38.5016	1.71	0.2476
Error total	112.417	5	22.4833		
Total (corr.)	2042.43	14			

En la tabla 12 se observa que como se optó por un diseño de superficie de respuesta, los datos se están ajustando a un modelo cuadrático, por ello se observan las interacciones no sólo

lineales (A, B, C, AB, AC, BC) sino las cuadráticas (AA, BB y CC) para conocer si alguna combinación de las mismas es relevante.

Anexo IV Desarrollo de cálculos

Cálculos previos de concentración de sal

Se llevaron a cabo los cálculos para la obtención de masa de cloruro de sodio (NaCl) necesaria en la disolución de salmuera del experimento.

Como lo señala Robles (2018) el término mol se define como determinada cantidad de materia o de partículas microscópicas que existen en doce gramos de carbono-12, concepto conocido como número de Avogadro, el cual tiene un valor de 6.0221415×10^{23} [unidades]. Este número es de suma importancia para la concepción y entendimiento de la materia microscópica. Otro concepto por conocer es la masa molar, la cual hace referencia a la masa de un mol de unidades (átomos, iones, moléculas, etc) en determinada sustancia, y se expresa en [g]. Para conocer la concentración de alguna disolución se utilizan muchos conceptos relevantes, sin embargo, aquí se destacaron: la concentración, la molaridad o concentración molar y el porcentaje masa/volumen. El primero se utiliza para definir la cantidad de soluto existente en una disolución; el segundo representa el número de moles de soluto contenidos en un litro de disolución y el tercer término indica la relación porcentual que existe entre la masa del soluto en gramos y el volumen de la disolución.

Se tuvo una disolución de 1[l] compuesta de cloruro de sodio [NaCl] y agua [H₂O], en la que el porcentaje masa/volumen fue del 10%, 20% y 30%. Por medio del término porcentaje masa/volumen (%m/v) de una solución, se pudo obtener la cantidad en gramos necesarias de soluto.

$$\% \frac{\text{masa}}{\text{volumen}} = \frac{\text{masa de soluto}}{\text{volumen de la disolución}} \times 100\%$$

Se despejó la masa del soluto

$$\text{masa de soluto} = \frac{\left(\% \frac{m}{v}\right) (\text{volumen de la disolución})}{100\%}$$

$$\text{masa de soluto}_{NaCl} = \frac{(10\%)(1 [l])}{100\%} = 0.1 [kg]_{NaCl}$$

De forma semejante para el 20% y 30% se tendrán 200 [g] y 300 [g] respectivamente.

Posteriormente se obtuvo la relación de cloruro de sodio para 2 [l] de disolución con un porcentaje masa/volumen del 10%. Realizando el cálculo anterior sustituyendo ahora el volumen de la disolución de 2[l] se obtuvieron 200[g] para el 10% de concentración. Sin embargo, se puede rectificar este resultado utilizando más herramientas de unidades de concentración.

En la tabla periódica se obtuvieron las masas molares del sodio (22.990 g/mol) y del cloro (35.453 g/mol) dando como resultado 58.5 g/mol.

Se utilizó la expresión de molaridad:

$$\text{Molaridad} = \frac{\text{moles de soluto}}{\text{volumen de la disolución en litros}}$$

Para obtener los moles en 100 [g]NaCl:

$$\text{moles}_{NaCl} = (100g_{NaCl}) \left(\frac{1 \text{ mol}}{58.5 \text{ g}}\right) = 1.709 \text{ mol}_{NaCl}$$

Y así conocer cuántos moles hay en 1[l] de disolución:

$$M = \frac{1.709 \text{ mol}_{NaCl}}{1 \text{ l de disolución}} = 1.709 [M]$$

Una vez obtenida la molaridad para un litro de disolución, se realizó con un volumen de 2 [l] para así obtener los gramos de NaCl necesarios a un porcentaje m/v del 10%:

De la expresión de la molaridad, se despejaron los moles de soluto

$$\text{moles}_{\text{NaCl}} = (\text{litros de disolución})(\text{molaridad})$$

$$\text{moles}_{\text{NaCl}} = (2 \text{ l}) \left(\frac{1.709 \text{ mol}_{\text{NaCl}}}{1 \text{ l de disolución}} \right) = 3.418 \text{ mol}_{\text{NaCl}}$$

Como cada mol de NaCl pesa 58.5 g, la cantidad de gramos para la solución de 2 [l] fue:

$$g_{\text{NaCl}} = (3.418 \text{ mol}_{\text{NaCl}}) \left(\frac{58.5 \text{ g}}{1 \text{ mol}} \right) = 200 \text{ g}_{\text{NaCl}}$$

Finalmente, para un porcentaje m/v del 20% y 30% en 2 [l] de disolución, se utilizaron 400[g] y 600 [g], respectivamente.

Anexo V Bitácora de experimentos

BITÁCORA DEL EXPERIMENTO DOS

Hora	T_{camisa} [°C]	T_{ri} [°C]	ΔT [°C]	Observaciones/ Notas
09:00	14	14		Encendido de resistencias eléctricas
09:10	34.6			Encendido bomba de agua de alimentación
09:21	53.2			Bomba no succiona / Apagado y revisión
11:37	35			Inicio / Encendido resistencias y bomba de agua
11:50	48.6	25	23.6	
12:01	59.5	37.4	22.1	Encendido agitador
12:21	72.5	47	25.5	
12:37	80.5	53.7	26.8	
12:46	86.2	58.8	27.4	
12:51				Purgado de bomba
12:59	85.5	63.3	22.2	
13:08	87.7	65	22.7	Encendido bomba de vacío / temporizador de 20 minutos para extracción de condensado
13:19	88	59.8	28.2	
13:29	90	60.7		Apagado de bomba de vacío/ Medición de volumen de condensado y anotaciones finales
13:35	90	61		Apagado de resistencias eléctricas
13:45				Término de experimento 2

Glosario

- **Ablandamiento:** Moreira (2016) la describe como “una unidad utilizada para ablandar el agua, eliminando los minerales que hacen a dicha agua ser dura. [...] Cuando es dura, puede atascar las tuberías, la eficiencia de las calderas y tanques disminuye, o en general en la vida media de las máquinas. “.
- **Acreción:** La Sociedad Española Astronómica (n.d) la describe como un fenómeno por el cual la materia, normalmente gas, es atraída por un cuerpo debido a la interacción gravitatoria y pasa a incorporarse al mismo, a veces tras un proceso que implica que el material gire alrededor del objeto central y que puede conllevar la formación de una disco.
- **Adsorción:** Es un (Análisis de los sistemas de refrigeración solar por adsorción, n.d) “proceso reversible mediante el cual un gas es fijado en un sólido, habitualmente un material poroso. El sólido que adsorbe es el adsorbente y el material gaseoso adsorbido en la superficie es el adsorbato. Además, es un proceso exotérmico, debido a la condensación del adsorbato más la energía generada en la unión adsorbente-adsorbato”.
- **Aereación:** Aguamarket (n.d.) lo define como un proceso de transferencia de masa, referido a la transferencia de oxígeno al agua por medios naturales (cascadas, flujo natural, etc.) o artificial (agitación mecánica o difusión de aire comprimido). La finalidad de esta técnica es eliminar gas disuelto (ácido carbónico o sulfuro de hidrógeno) del agua.
- **Agua salobre:** Aquella que tiene más sal disuelta que el agua de ríos y lagos, pero menos que el agua de los océanos. Se considera salobre si posee entre 0.5 y 30 gramos de sal por litro.
- **Anoxia:** La RAE la define como la falta casi total de oxígeno en la sangre o en tejidos corporales.
- **Atmósfera:** La RAE la define como la capa gaseosa que rodea a la Tierra, la describe compuesta por nitrógeno (78%), oxígeno (20.95%), argón (0.93%), así como otros gases. La

estructura de la atmósfera de más cercana a lejana: tropósfera, estratósfera, mesósfera, ionósfera y exósfera.

- **Capilaridad:** Es una propiedad de los fluidos que depende de su tensión superficial. Cuando un líquido sube por un tubo capilar, es debido a que la fuerza intermolecular o cohesión es menor que la adhesión del líquido con el material del tubo (es decir, es un líquido que moja). El líquido sigue subiendo hasta que la tensión superficial es equilibrada por el peso del líquido que llena el tubo.
- **Coagulación:** Mazille et al. (2020) la describe como una “técnica química de tratamiento del agua que se aplica típicamente antes de un proceso físico, con el fin de mejorar su capacidad de eliminación de partículas. Neutraliza las cargas y forma una masa gelatinosa que une partículas, aumentando su tamaño de modo que pueda quedar atrapada en un filtro o sedimentarse”.
- **Corteza continental:** El instituto de Geofísica la describe como una capa composicional más gruesa y de espesor variable (35-65 km); es menos densa y está compuesta por rocas graníticas (silicatos de Al, K, Na).
- **Corteza oceánica:** Capa composicional más delgada (entre 5 km), más densa y compuesta por rocas basálticas (silicatos de Mg, Fe, Ca).
- **Cuenca hidrográfica:** SEMARNAT (2013) “Es un espacio territorial delimitado por un parteaguas (partes más altas de las montañas), donde se concentran todos los escurrimientos (arroyos y ríos) que confluyen y desembocan en un punto común llamado punto de salida de la cuenca, que puede ser un lago (formado por una cuenca denominada endorreica) o el mar (llamada cuenca exorreica). En estos territorios existe una interrelación entre el medio biofísico (suelo, ecosistemas acuáticos y terrestres, cultivos, agua, biodiversidad, estructura geomorfológica y geológica), los modos de apropiación (tecnología y mercado), las instituciones (organización social, cultura, leyes) y de las actividades humanas que causan un impacto en ellas”.

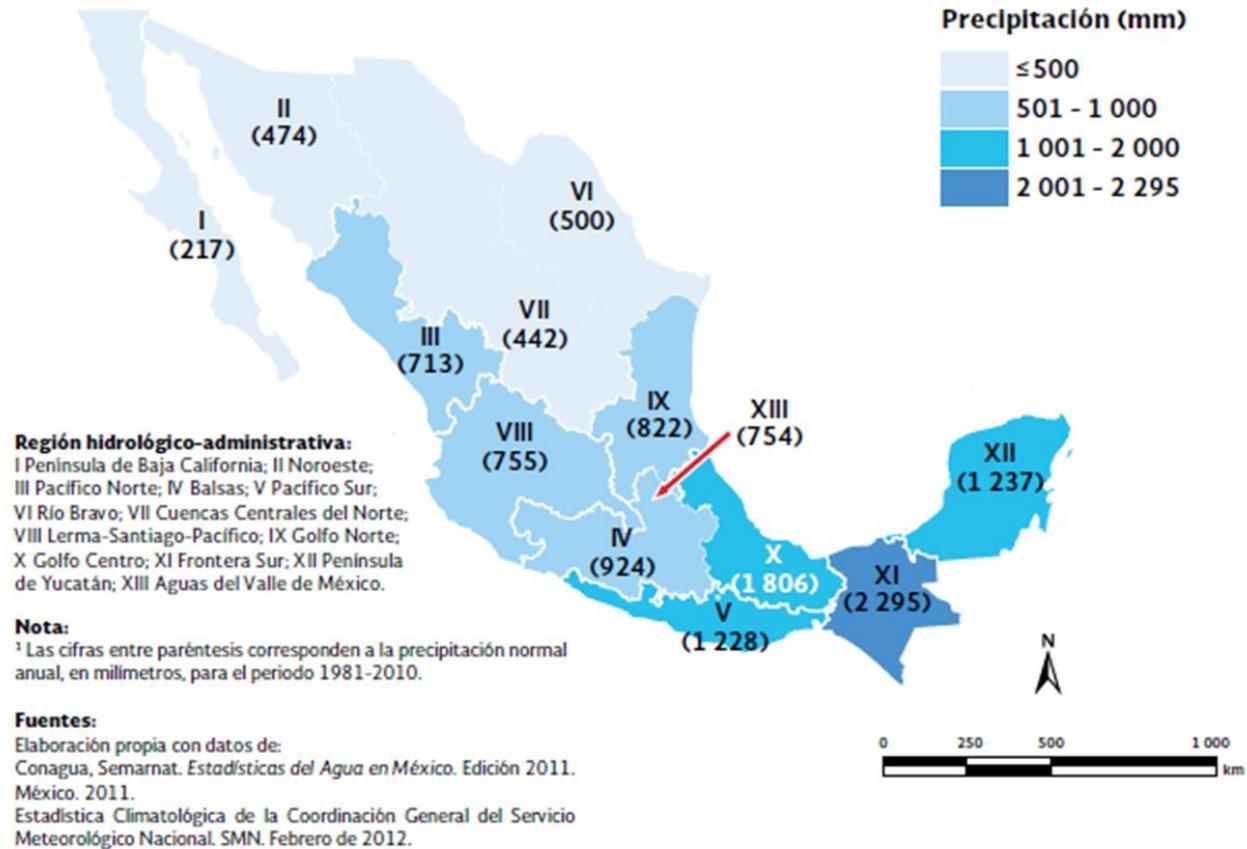
- **Diferenciación planetaria:** Proceso de separación y diferenciación de los componentes de un cuerpo planetario como resultado de su evolución física y química. Los materiales más densos se hunden hacia el centro, mientras que los menos densos suben a la superficie, lo cual tiende a crear el núcleo y manto de un planeta.
- **Enlace por puente de hidrógeno:** (Khan Academy), gracias a la polaridad, las moléculas de agua se atraen entre sí con gran facilidad. El lado positivo de una (un átomo de hidrógeno) se asocia con el lado negativo de otra (un átomo de oxígeno). Estas atracciones forman los puentes de hidrógeno, aquellas interacciones débiles que se forman entre el hidrógeno con una carga parcial positiva y un átomo más electronegativo, como el oxígeno. Los átomos de hidrógeno involucrados en este tipo de enlaces deben estar unidos a átomos electronegativos, tales como O, N o F.
- **Eutrofización:** El Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (2020) dice “término empleado por primera vez por los limnólogos Thienemann y Naumann para describir lagos que registraban una alta concentración de fitoplancton en el agua, en contraste con los sistemas pobremente alimentados o oligotróficos. En la actualidad, el término se emplea para identificar los incrementos de nutrientes que resultan de actividades humanas en comparación con los que se dan por causas naturales”.
- **Golfo:** Abertura geográfica costera desde un océano o un mar hacia la masa terrestre, encerrada por cabos de tierra.
- **Hidrografía:** El INEGI la describe como “información estructurada como un sistema lineal que modela el drenaje a través de arroyos y ríos en cada cuenca hidrográfica. Útil para el análisis de caudales y de cuencas. Rama de la geografía que describe y estudia los cuerpos de agua planetarios, principalmente los recursos hídricos continentales. “
- **Hidrosfera:** Parte de la Tierra ocupada por los océanos, mares, ríos, lagos y demás masas y corrientes de agua.

- **Oxidación/ Desinfección:** AINIA (2016), tratamiento químico el cual produce una reacción química similar a la combustión, donde los compuestos orgánicos son oxidados. Como resultado, se pueden obtener compuestos inorgánicos en forma de moléculas simples como el agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) y el nitrógeno (N₂). Sirve para destruir los contaminantes contenidos en el agua.
- **Permafrost:** Capa de suelo permanentemente congelado, de las regiones muy frías o preglaciares. Durante miles de años, el permafrost del Ártico ha acumulado grandes reservas de carbono orgánico.
- **Recarga de un acuífero:** Definida como el volumen de agua anual que pueda producirse naturalmente mediante el ciclo hidrológico.
- **Río:** La CONABIO (2021) lo define como un “sistema de agua con movimiento constante unidireccional sobre la superficie terrestre. Se reabastecen de agua con la precipitación y los escurrimientos superficiales, los mantos freáticos y el deshielo de las altas montañas. México alberga 320 cuencas hidrográficas y 50 ríos principales.”
- **Sedimentación:** Mazille et al. (2020), pretratamiento físico del agua que se realiza antes de la aplicación de otros tratamientos de purificación (como la filtración o desinfección). Elimina tanto pequeñas partículas suspendidas no deseadas (arena, arcilla) así como contaminantes biológicos del agua bajo la influencia de la gravedad.
- **Volátil:** RAE (2021) dice “sustancia que se transforma espontáneamente en vapor en contacto con el aire. Sustancia que cambia o varía con facilidad y es poco previsible”.
- **Densidad:** Cengel (2012) la define como la masa por unidad de volumen. Su recíproco es el volumen específico.
- **Entalpía:** Cengel (2012) Grupo $u + Pv$; contenido de calor

Figuras y tablas

Precipitación normal anual por región hidrológico-administrativa 1981 - 2010¹

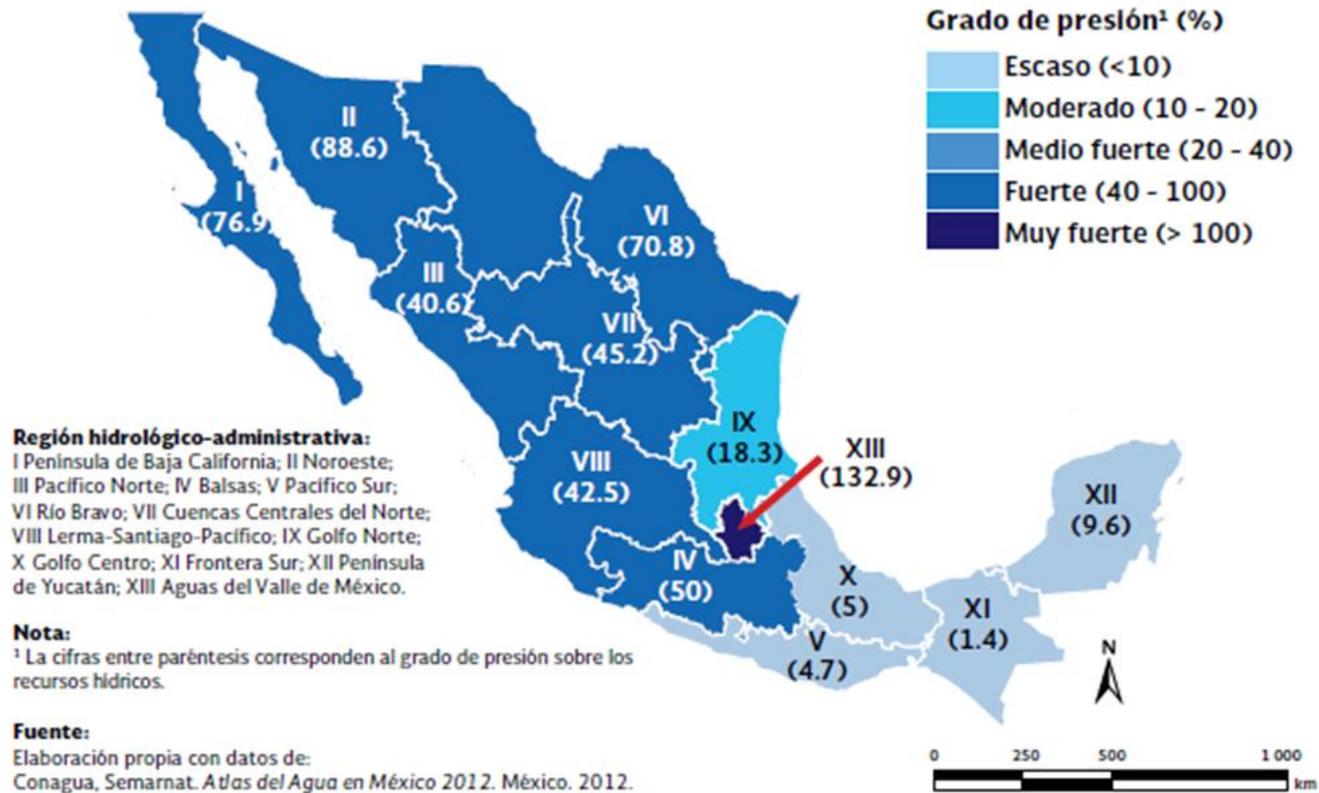
Mapa 6.2



DISTRIBUCIÓN HETEROGÉNEA DE LA PRECIPITACIÓN EN MÉXICO. (CONAGUA, 2011,p. 262)

Grado de presión sobre los recursos hídricos por región hidrológico-administrativa, 2010

Mapa 6.5



GRADO DE PRESIÓN SOBRE LOS RECURSOS HÍDRICOS. (CONAGUA,2011 P. 272)

CONAGUA (2010) menciona que “en México, el 70% del agua que precipita se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el resto escurre por los ríos o arroyos o se infiltra al subsuelo y recarga los acuíferos.” El 68% del escurrimiento superficial pertenece a los ríos Grijalva, Usumacinta, Papaloapan, Coatzacoalcos, Balsas, Pánuco, Santiago y Tonalá. Los acuíferos, como se mencionó más arriba, son aquellos que se utilizan para el abastecimiento de las actividades humanas y cabe resaltar que la recarga de estos es de aproximadamente 77 km³/año, los cuales 27.5 km³/ año son los aprovechados.

Usos consuntivos, según origen del tipo de fuente de extracción, 2008 (miles de millones de metros cúbicos, km³)

Uso	Origen [%]		Volumen	Porcentaje de extracción
	Superficial	Subterráneo	total [km ³]	[%]
Agrícola (a)	40.7	20.5	61.2	76.8
Abastecimiento público (b)	4.2	7	11.2	14
Industria autoabastecida (c)	1.6	1.6	3.3	4.1
Termoeléctricas	3.6	0.4	4.1	5.1
TOTAL	50.1	29.5	79.8	100

Los datos corresponden a volúmenes concesionados al 31 de diciembre de 2008.

(a) Incluye los rubros agrícolas, pecuario, acuacultura, múltiples y otros de la clasificación del REPDA.

(b) Incluye los rubros público urbano y doméstico de la clasificación del REPDA

(c) Incluye los rubros industriales, agroindustrial, servicios y comercios de la clasificación del REPDA.

USOS CONSUNTIVOS, SEGÚN ORIGEN DEL TIPO DE FUENTE DE EXTRACCIÓN (CONAGUA, 2010, P.61)

TABLA A-4

Agua saturada. Tabla de temperaturas

Temp., T °C	Pres. sat., P _{sat} kPa	Volumen específico, m ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Líquido, sat., v _f	Vapor, sat., v _g	Líquido, sat., u _f	Evaporación, u _g	Vapor, sat., u _g	Líquido, sat., h _f	Evaporación, h _{fg}	Vapor, sat., h _g	Líquido, sat., s _f	Evaporación, s _{fg}	Vapor, sat., s _g
0.01	0.6117	0.001000	206.00	0.000	2374.9	2374.9	0.001	2500.9	2500.9	0.0000	9.1556	9.1556
5	0.8725	0.001000	147.03	21.019	2360.8	2381.8	21.020	2489.1	2510.1	0.0763	8.9487	9.0249
10	1.2281	0.001000	106.32	42.020	2346.6	2388.7	42.022	2477.2	2519.2	0.1511	8.7488	8.8999
15	1.7057	0.001001	77.885	62.980	2332.5	2395.5	62.982	2465.4	2528.3	0.2245	8.5559	8.7803
20	2.3392	0.001002	57.762	83.913	2318.4	2402.3	83.915	2453.5	2537.4	0.2965	8.3696	8.6661
25	3.1698	0.001003	43.340	104.83	2304.3	2409.1	104.83	2441.7	2546.5	0.3672	8.1895	8.5567
30	4.2469	0.001004	32.879	125.73	2290.2	2415.9	125.74	2429.8	2555.6	0.4368	8.0152	8.4520
35	5.6291	0.001006	25.205	146.63	2276.0	2422.7	146.64	2417.9	2564.6	0.5051	7.8466	8.3517
40	7.3851	0.001008	19.515	167.53	2261.9	2429.4	167.53	2406.0	2573.5	0.5724	7.6832	8.2556
45	9.5953	0.001010	15.251	188.43	2247.7	2436.1	188.44	2394.0	2582.4	0.6386	7.5247	8.1633
50	12.352	0.001012	12.026	209.33	2233.4	2442.7	209.34	2382.0	2591.3	0.7038	7.3710	8.0748
55	15.763	0.001015	9.5639	230.24	2219.1	2449.3	230.26	2369.8	2600.1	0.7680	7.2218	7.9898
60	19.947	0.001017	7.6670	251.16	2204.7	2455.9	251.18	2357.7	2608.8	0.8313	7.0769	7.9082
65	25.043	0.001020	6.1935	272.09	2190.3	2462.4	272.12	2345.4	2617.5	0.8937	6.9360	7.8296
70	31.202	0.001023	5.0396	293.04	2175.8	2468.9	293.07	2333.0	2626.1	0.9551	6.7989	7.7540
75	38.597	0.001026	4.1291	313.99	2161.3	2475.3	314.03	2320.6	2634.6	1.0158	6.6655	7.6812
80	47.416	0.001029	3.4053	334.97	2146.6	2481.6	335.02	2308.0	2643.0	1.0756	6.5355	7.6111
85	57.868	0.001032	2.8261	355.96	2131.9	2487.8	356.02	2295.3	2651.4	1.1346	6.4089	7.5435
90	70.183	0.001036	2.3593	376.97	2117.0	2494.0	377.04	2282.5	2659.6	1.1929	6.2853	7.4782
95	84.609	0.001040	1.9808	398.00	2102.0	2500.1	398.09	2269.6	2667.6	1.2504	6.1647	7.4151
100	101.42	0.001043	1.6720	419.06	2087.0	2506.0	419.17	2256.4	2675.6	1.3072	6.0470	7.3542
105	120.90	0.001047	1.4186	440.15	2071.8	2511.9	440.28	2243.1	2683.4	1.3634	5.9319	7.2952
110	143.38	0.001052	1.2094	461.27	2056.4	2517.7	461.42	2229.7	2691.1	1.4188	5.8193	7.2382
115	169.18	0.001056	1.0360	482.42	2040.9	2523.3	482.59	2216.0	2698.6	1.4737	5.7092	7.1829
120	198.67	0.001060	0.89133	503.60	2025.3	2528.9	503.81	2202.1	2706.0	1.5279	5.6013	7.1292
125	232.23	0.001065	0.77012	524.83	2009.5	2534.3	525.07	2188.1	2713.1	1.5816	5.4956	7.0771
130	270.28	0.001070	0.66808	546.10	1993.4	2539.5	546.38	2173.7	2720.1	1.6346	5.3919	7.0265
135	313.22	0.001075	0.58179	567.41	1977.3	2544.7	567.75	2159.1	2726.9	1.6872	5.2901	6.9773
140	361.53	0.001080	0.50850	588.77	1960.9	2549.6	589.16	2144.3	2733.5	1.7392	5.1901	6.9294
145	415.68	0.001085	0.44600	610.19	1944.2	2554.4	610.64	2129.2	2739.8	1.7908	5.0919	6.8827
150	476.16	0.001091	0.39248	631.66	1927.4	2559.1	632.18	2113.8	2745.9	1.8418	4.9953	6.8371
155	543.49	0.001096	0.34648	653.19	1910.3	2563.5	653.79	2098.0	2751.8	1.8924	4.9002	6.7927
160	618.23	0.001102	0.30680	674.79	1893.0	2567.8	675.47	2082.0	2757.5	1.9426	4.8066	6.7492
165	700.93	0.001108	0.27244	696.46	1875.4	2571.9	697.24	2065.6	2762.8	1.9923	4.7143	6.7067
170	792.18	0.001114	0.24260	718.20	1857.5	2575.7	719.08	2048.8	2767.9	2.0417	4.6233	6.6650
175	892.60	0.001121	0.21659	740.02	1839.4	2579.4	741.02	2031.7	2772.7	2.0906	4.5335	6.6242
180	1002.8	0.001127	0.19384	761.92	1820.9	2582.8	763.05	2014.2	2777.2	2.1392	4.4448	6.5841
185	1123.5	0.001134	0.17390	783.91	1802.1	2586.0	785.19	1996.2	2781.4	2.1875	4.3572	6.5447
190	1255.2	0.001141	0.15636	806.00	1783.0	2589.0	807.43	1977.9	2785.3	2.2355	4.2705	6.5059
195	1398.8	0.001149	0.14089	828.18	1763.6	2591.7	829.78	1959.0	2788.8	2.2831	4.1847	6.4678
200	1554.9	0.001157	0.12721	850.46	1743.7	2594.2	852.26	1939.8	2792.0	2.3305	4.0997	6.4302

TABLA DE TEMPERATURAS PARA AGUA SATURADA A-4 (CENGEL, 2012, P.913)

TABLA A-5

Agua saturada. Tabla de presiones

Pres., <i>P</i> kPa	Temp. sat., <i>T</i> _{sat} °C	Volumen específico, <i>m</i> ³ /kg		Energía interna, kJ/kg			Entalpía, kJ/kg			Entropía, kJ/kg · K		
		Liq. sat., <i>v</i> _f	Vapor sat., <i>v</i> _g	Liq. sat., <i>u</i> _f	Evap., <i>u</i> _{fg}	Vapor sat., <i>u</i> _g	Liq. sat., <i>h</i> _f	Evap., <i>h</i> _{fg}	Vapor sat., <i>h</i> _g	Liq. sat., <i>s</i> _f	Evap., <i>s</i> _{fg}	Vapor sat., <i>s</i> _g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

TABLA DE PRESIONES PARA AGUA SATURADA A-5 (CENGEL, 2012, P.915)