



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

ANÁLISIS NUMÉRICO DE UN SISTEMA TERMOSOLAR OPERADO CON NANOFLUIDOS PARA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA

JAMMIN ABDI QUINTAL LÓPEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. ALEXIS ACUÑA RAMÍREZ

AGRADECIMIENTOS

- A Dios, por permitirme la vida, salud y la capacidad para cumplir mis metas y sueños en la vida.
- A mi familia, por su amor, comprensión y apoyo incondicional; por estar conmigo en momentos difíciles y también momentos de felicidad.
- Al CONACYT, por haberme apoyado con una beca de manutención durante mis estudios.
- A la UABC, por permitirme el acceso a los laboratorios, aulas, biblioteca, bases de datos y todos los medios necesarios para realizar mi investigación y obtener mi grado académico.
- Al Dr. Alexis Acuña, por estar siempre pendiente del avance en mi investigación, sus consejos y motivación a seguir adelante.
- A mis honorables sinodales, por su apoyo y constante retroalimentación a mi trabajo de investigación.
- A mi socio, el M.C. Jesús Rubalcaba, por acompañarme de principio a fin en esta etapa de mi vida, por su amistad y apoyo incondicional.
- A mis maestros, por transmitirme su experiencia, conocimiento, y pasión por la ciencia e ingeniería.

DEDICATORIAS

A mis padres, me llena de orgullo poder dedicarles el producto de mi trabajo de investigación de maestría. Es por ustedes que he llegado tan lejos. Ustedes le dan sentido a mi vida y estoy muy agradecido con Dios por haberme dado unos excelentes padres, un papá lleno de sabiduría y una madre llena de amor y ternura. Con este nuevo logro en mi vida quisiera honrar su nombre y poner en alto a la familia Quintal López, que con tanto amor, esfuerzo y paciencia, ustedes forjaron las bases para que nosotros creciéramos y lleguemos a lograr nuestros sueños y metas en la vida. Les agradezco por creer en mí y siempre estar a mi lado cuando más los necesito. ¡Los amo! Le pido a Dios que me permita tenerlos en mi vida muchos años más.

ABREVIATURAS

NOMENCLATURA

<i>Símbolos</i>		<i>Subíndices</i>	
α	Absorbancia	a	Ambiente
γ	Reflectancia	air	Aire
δ	Densidad	ap	Apertura
ε	Emitancia/eficacia	bf	Fluido base
θ	Ángulo	c	Cubierta
μ	Viscosidad dinámica	CHE	Intercambiador de Calor Coaxial
π	Número pi	cold	Frío
ρ	Densidad	cr	Crioscópico
σ	Constante de Stephan-Boltzmann	Cu	Cobre
η	Eficiencia	eb	Ebulloscópico
ν	Viscosidad cinemática	eg	Etilenglicol
Φ	Concentración volumétrica	elec	Electrolizador
Δ	Cambio	g	Cubierta de vidrio
		H₂	Hidrógeno
		H₂O	Agua
<i>Superíndices</i>		hot	Caliente
°	Grado / Estado Estándar	i	Entrada
*	Tasa	in	Interno
		it	Tubo interno
		K	Kelvin
		L	Pérdida
<i>Abreviaciones</i>		nf	Nanofluidos
CHP	Combinación de Calor y Potencia	np	Nanopartícula
CHE	Intercambiador de Calor Coaxial	m	Masa
EGTC	Tubo Colector de Vidrio Evacuado	max	Máximo
FC	Celda de Combustible	min	Mínimo
NTU	Número de Unidades de Transferencia	o	Externo
PEM	Membrana de Intercambio Protónico	O₂	Oxígeno
PTC	Colector de Canal Parabólico	ot	Tubo externo
SHS	Sistema Solar-Hidrógeno	out	Salida
		p	Presión constante
		r	Receptor
		R	Remoción
		total	Total
		wall	Pared

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	iii
DEDICATORIAS.....	iv
ABREVIATURAS.....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
RESUMEN.....	xii
INTRODUCCIÓN	xiii
CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
Planteamiento del problema.....	2
Antecedentes.....	4
Justificación.....	6
Objetivo General	7
Objetivos Específicos.....	7
Hipótesis.....	7
CAPITULO II MARCO TEÓRICO.....	8
Marco teórico.....	9
Nanofluidos.....	9
Sistemas Solar-Hidrógeno	21
CAPITULO III METODOLOGÍA.....	32
Definición del sistema	33
Clasificación del sistema.....	34

Modos de simulación.....	34
Materiales.....	35
Método de cálculo del sistema solar-hidrógeno.....	36
Formulación del modelo matemático	38
Propiedades coligativas de los fluidos.....	40
Propiedades de la mezcla etilenglicol-agua.....	42
Propiedades termodinámicas de los nanofluidos.....	44
Rendimiento del colector solar de canal parabólico.....	47
Rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales.....	52
Rendimiento del electrolizador tipo PEM.....	57
Implementación del modelo matemático en software de simulación.....	59
CAPITULO IV RESULTADOS.....	60
Verificación y validación.....	61
Experimentación	63
Recolección y procesado de datos de simulación	63
Interpretación de resultados.....	64
CAPITULO V Conclusiones y Recomendaciones.....	75
Conclusiones.....	76
Recomendaciones.....	80
Referencias bibliográficas.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- Propiedades termodinámicas de las nanopartículas.....	38
Tabla 2.- Constantes para el cálculo de propiedades coligativas del agua.....	39
Tabla 3.- Parámetros geométricos y ópticos del colector solar de canal parabólico.....	39
Tabla 4.- Constantes y parámetros del electrolizador tipo PEM.....	40
Tabla 5.- Ecuaciones de las propiedades coligativas del agua.....	41
Tabla 6.- Propiedades de la mezcla etilenglicol-agua (fluido base).....	43
Tabla 7.- Modelo matemático que define las propiedades termodinámicas de los nanofluidos.....	45
Tabla 8.- Modelo matemático del rendimiento del colector solar de canal parabólico.....	50
Tabla 9.- Modelo matemático que define el rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales.....	52
Tabla 10.- Modelo matemático del rendimiento del electrolizador tipo PEM.....	58
Tabla 11.- Datos experimentales de medición de la eficiencia de un colector solar con cubierta al vacío.....	61
Tabla 12.- Validación del simulador de colector solar de canal parabólico con tubo evacuado.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.- Proyección de la demanda energética y la producción de combustibles fósiles en el siglo XXI. ¹	2
Figura 2.- Ahorros reflejados en la potencia de bombeo de nanofluidos en comparación con fluidos convencionales. ⁸	4
Figura 3.- Colector solar de canal parabólico en las instalaciones de la UABC. Fuente: El autor.	5
Figura 4.- Ejemplo de electrolizador tipo PEM.	5
Figura 5.- Ejemplo de intercambiador de calor de tubos coaxiales.	5
Figura 6.- Número de artículos relacionados a nanofluidos en cada una de las revistas publicadas en Elsevier. ¹¹	10
Figura 7.- Proceso de síntesis de nanofluidos. ¹¹	11
Figura 8.-Esquematación de la preparación de nanofluidos con una sonda ultrasónica. ¹¹	12
Figura 9.- Porcentaje de mejora en la transferencia de calor de diferentes nanofluidos. ¹¹	12
Figura 10.-Comparativa de conductividad térmica de nanopartículas. ¹¹	13
Figura 11.- Morfología de los nanotubos de carbono de pared múltiple.....	13
Figura 12.- Ejemplos de nanoestructuras con base de carbono como CNT, MWCNT y G. Orden de izquierda a derecha.	14
Figura 13.- Ejemplos de nanoestructuras con base de carbono como GNP, GO y ND. Orden de izquierda a derecha	14
Figura 14.- Baño ultrasónico comúnmente utilizado en la síntesis de nanofluidos.....	15
Figura 15.- Coloraciones que presentan los coloides de plata.....	15
Figura 16.- Representación gráfica de una micela.....	16
Figura 17.- Clasificación de los surfactantes	17
Figura 18.- Ejemplos de surfactantes aniónicos con diferentes longitudes de cola: BDS, SDS y ODS.....	17
Figura 19.- Comportamiento del potencial en cada una de las capas de una micela de nanopartícula negativa.	18
Figura 20.- Tipos de estabilización de nanofluidos: estérica (izquierda) y electrostática (derecha).....	19
Figura 21.- Diferentes niveles de estabilidad en nanofluidos de óxido de zinc a distintos valores de pH.....	19
Figura 22.- Equipo de medición de potencial zeta Nanotracs Wave II.	20
Figura 23.- Ejemplos de nanofluidos con baja tensión superficial.	20
Figura 24.-Ejemplos de nanofluidos con alta tensión superficial.	21

Figura 25.- Integración de equipos de energía solar e hidrógeno en un SSH	22
Figura 26.- Perdidas en cada uno de los pasos en el proceso de almacenamiento de energía en los SSH. ¹³	23
Figura 27.- Esquematación del proyecto H2HOME. ¹⁴	24
Figura 28.- Configuración de equipos analizados por Omar, et al. ¹⁸	25
Figura 29.- Producción anual de hidrógeno esperada para distintas ciudades en Argelia. ¹⁹	26
Figura 30.- Representación gráfica del proceso llevado a cabo en un electrolizador tipo PEM.....	27
Figura 31.- Representación gráfica del proceso llevado a cabo en una celda de combustible tipo PEM.....	27
Figura 32.- Estructura química de la membrana PEM.....	28
Figura 33.- Representación gráfica de la membrana PEM en condiciones de operación.....	29
Figura 34.- Representación gráfica del proceso de difusión estructurada.....	29
Figura 35.- Diagrama del sistema solar-hidrógeno.....	33
Figura 36.- Método de cálculo del sistema solar-hidrógeno.....	36
Figura 37.- Geometría del colector solar de canal parabólico.	47
Figura 38.- Representación gráfica del colector solar de canal parabólico.....	48
Figura 39.- Ampliación a la sección del tubo receptor y la cubierta de borosilicato.....	48
Figura 40.- Ganancias y pérdidas de calor en la sección del tubo receptor y la cubierta de vidrio.....	49
Figura 41.- Circuito de resistencia térmica característico del colector solar de canal parabólico con cubierta al vacío.	49
Figura 42.- Balance térmico en la sección transversal del intercambiador de calor de tubos coaxiales.....	54
Figura 43.- Circuito de resistencia térmica característico del intercambiador de calor de tubos coaxiales.	54
Figura 44.- Sección transversal del intercambiador de calor de tubos coaxiales.....	55
Figura 45.- Configuración en contraflujo en el intercambiador de calor de tubos coaxiales.....	55
Figura 46.- Propiedades coligativas de la mezcla etilenglicol-agua	64
Figura 47.- Densidad y calor específico de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.....	64
Figura 48.- Viscosidad cinemática y dinámica de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.....	65
Figura 49.- Prandtl y conductividad térmica de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.....	65
Figura 50.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la potencia de bombeo y la turbulencia del nanofluido.....	66

Figura 51.- Eficiencia térmica y pérdidas de calor en el colector solar de canal parabólico operado con agua.....	67
Figura 52.- Temperatura de salida del colector solar en función de la concentración de nanopartículas.....	67
Figura 53.- Eficiencia del colector solar de canal parabólico en función de la concentración de nanopartículas.....	68
Figura 54.- Efectividad del intercambiador de calor de tubos coaxiales en función de la concentración de nanopartículas	68
Figura 55.- NTU del intercambiador de calor de tubos coaxiales en función de la concentración de nanopartículas.	69
Figura 56.- Longitud del intercambiador de calor en función de la concentración de nanopartículas.	70
Figura 57.- Temperatura de salida del agua destilada en el intercambiador de calor.....	70
Figura 58.- Efecto de la concentración de nanopartículas en el voltaje del electrolizador tipo PEM.....	71
Figura 59.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la corriente del electrolizador tipo PEM.....	72
Figura 60.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la generación de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM....	72
Figura 61.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la cantidad de energía almacenada en el hidrógeno.....	73
Figura 62.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la eficiencia del electrolizador tipo PEM.....	73
Figura 63.- Eficiencia global del sistema solar-hidrógeno en función de la concentración de nanopartículas.....	74
Figura 64.- Precio de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.....	74

RESUMEN

En el presente documento se realizó un análisis numérico de un sistema termosolar operado con nanofluidos para producción de hidrógeno. El sistema solar-hidrógeno opera con 5 tipos de nanofluidos, puestos a prueba para evaluar su efecto en la producción de hidrógeno en un electrolizador tipo PEM, el rendimiento de diferentes componentes del sistema y la posible reducción de las dimensiones de un intercambiador de calor. Los nanofluidos utilizados en este análisis numérico consisten de una mezcla de etilenglicol y agua como fluido base, y diferentes nanopartículas como nanoplacas de graféno, óxido de zinc, óxido de aluminio, dióxido de silicio y cobre. En este estudio se planteó una hipótesis que establece que los nanofluidos con base en nanopartículas de estructuras de carbono como el graféno, nanotubos de carbono o nano-placas de graféno pueden reducir en al menos un 50% las dimensiones del intercambiador de calor de tubos concéntricos del sistema solar-hidrógeno, incrementar la producción de hidrógeno del electrolizador tipo PEM y la eficiencia global del sistema solar-hidrógeno. Para validar o refutar dicha hipótesis se planteó y simuló un modelo matemático comprendido por 80 ecuaciones y distintos estudios paramétricos que evalúan el rendimiento del sistema solar-hidrógeno en función de la concentración de nanopartículas. La hipótesis planteada se validó completamente en sus 3 puntos principales. Los resultados obtenidos en el análisis numérico muestran que los nanofluidos a base de nanoestructuras de carbono pueden reducir hasta un 61% la longitud necesaria del intercambiador de calor de tubos concéntricos, incrementar hasta un 19% la producción de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM y hasta un 5.07% la eficiencia global del sistema. Adicionalmente, se realizó un estudio de mercado para evaluar la relación costo/beneficio de los diferentes nanofluidos y se concluyó que los nanofluidos más rentables en el estudio son los nanofluidos a base de nanoplacas de graféno con un precio que oscila entre 90 y 103 MXN por litro.

INTRODUCCIÓN

“A lo largo del espacio hay energía, y es una mera cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía” (Nikola Tesla). El desarrollo de tecnologías de explotación de los recursos energéticos se encuentra avanzando a pasos agigantados en la actualidad. De igual manera, a nivel global existe una tendencia hacia el cambio de los sistemas de producción de energía convencional por sistemas de aprovechamiento de las energías renovables. Una de las tecnologías más atractivas desde el enfoque ambiental y energético son las celdas de combustible tipo PEM debido a que son libres de emisiones de CO_2 y su eficiencia oscila entre 35 y 85%. Además, las celdas PEM son libres de mantenimiento mecánico porque no contienen piezas móviles.

En nuestros tiempos, las necesidades energéticas tanto de la industria como de la población en general incrementan constantemente. Es evidente entonces que los hábitos de consumo energético son cada vez más exigentes. Afortunadamente, las celdas PEM pueden ser escalables a cualquier demanda energética, basta con sólo agregar mono-celdas en paralelo. Éste conjunto de mono-celdas se conoce como “stack” en referencia a su nombre en inglés. Actualmente, en el mercado se pueden encontrar celdas de combustible tipo PEM desde algunos cuantos watts, comúnmente para fines didácticos, hasta varios múltiplos de kW, incluso MW. Las celdas de combustible no solo ofrecen seguridad en el suministro eléctrico, sino también de energía térmica, la reacción química llevada a cabo en su interior libera calor que puede ser utilizado en diferentes procesos industriales o incluso calefacción.

En particular, las celdas de combustible de baja temperatura, tales como las PEM, tienen algunas desventajas que tienen en jaque a la comunidad científica. Una de las desventajas más importantes es que las celdas de combustible de baja temperatura requieren hidrógeno de alta pureza. Desafortunadamente, el hidrógeno a pesar de que es el elemento químico más pequeño y altamente abundante en la naturaleza, no se encuentra de forma pura, siempre se encuentra formando compuestos como el agua, ácidos, bases, hidruros, etc. El proceso de síntesis o producción de

hidrógeno más utilizado a nivel mundial es el reformado de gas natural. En este proceso se mezcla gas natural y vapor de agua a altas temperaturas y se tiene como resultado hidrógeno y monóxido de carbono. En una segunda etapa de mezcla de monóxido de carbono y vapor de agua se produce dióxido de carbono e hidrógeno. Este proceso de producción de hidrógeno es altamente rentable y es por eso que es uno de más utilizados a nivel global. Sin embargo, no es amigable con el medio ambiente, y no solo eso, el gas de hidrógeno proveniente del reformado de gas natural contiene impurezas que contaminan los catalizadores de las celdas de combustible. Afortunadamente, existen otros métodos de obtener hidrógeno de alta pureza que si sea perfectamente compatible con los catalizadores de las celdas de combustible como la electrolisis del agua con electrolizadores tipo PEM. Sin embargo, la electrolisis requiere de una corriente eléctrica para que lleve a cabo la producción de hidrógeno y es por esa razón que la electrolisis no es tan rentable como el reformado de gas natural.

En años recientes, la comunidad científica ha enfocado su interés en un tipo de termofluidos modernos conocidos como nanofluidos. Este fluido consiste de nanopartículas suspendidas en termofluidos convencionales como el etilenglicol, aceites industriales, agua destilada, entre otros. Una de las ventajas del uso de nanofluidos como fluido de trabajo es la posible reducción del tamaño de los equipos de transferencia de calor como colectores solares, intercambiadores de calor, radiadores, entre otros, a causa del incremento en la inercia térmica del fluido. Además, los nanofluidos han demostrado disminuir el estrés térmico en los materiales utilizados para transferencia de calor e incrementar el rendimiento en los equipos donde son utilizados.

La finalidad de esta investigación radica en evaluar el efecto de incrementar la temperatura del agua, que se alimenta al electrolizador, sobre el consumo eléctrico. Ese incremento de temperatura será producido al acoplar el electrolizador tipo PEM a un colector solar de canal parabólico operado con nanofluidos. Además, se pretende demostrar que el uso de nanofluidos permite la reducción de las dimensiones de los intercambiadores de calor e incrementan el rendimiento de los colectores solares de concentración.

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Planteamiento del problema

Las predicciones de algunos investigadores e instituciones independientes sobre el declive de la producción mundial de petróleo convencional se han hecho realidad.^{1,2} Todos ellos respaldan que la producción de petróleo pronto disminuirá y es probable que la era de petróleo abundante y de bajo costo esté llegando a su fin.^{2,3} Según Nick, et al, las reservas que proporcionan combustibles líquidos solo tendrán la capacidad de atender la mitad de la demanda para 2023.² Por otro lado, los especialistas en macroeconomía y combustibles convencionales sugieren satisfacer las demandas de energía con hidrógeno, ya que se reducirían las emisiones de gases de efecto invernadero y se mejoraría la seguridad energética.^{1,2} En la Figura 1 se muestra una proyección entre la demanda energética y la producción de combustibles fósiles en el siglo XXI.

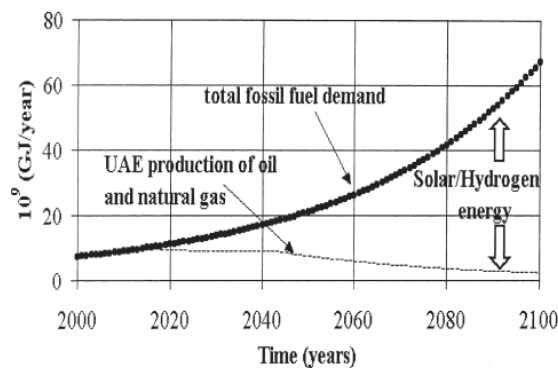


Figura 1.- Proyección de la demanda energética y la producción de combustibles fósiles en el siglo XXI.¹

En esta figura se puede apreciar como a partir de mediados de la segunda década de nuestro siglo se presenta una divergencia entre la demanda de energía y la producción de combustibles fósiles. Algunos autores como Nick, et al,¹ respaldan la idea de satisfacer ese déficit de energía combinando el recurso solar y la energía del hidrógeno.

¹ Kazim, A., & Veziroglu, T. (2001). Utilization of solar-hydrogen energy in the UAE to maintain its share in the world energy market for the 21st century. *Renewable Energy*, 24(2), 259-274.

² Owen, N., Inderwildi, O., & King, D. (2010). The status of conventional world oil reserves—Hype or cause for concern? *Energy Policy*, 38(8), 4743-4749.

³ Hirsch, R.L., 2005. The inevitable peaking of world oil production. The Atlantic Council of the United States.

Si bien el hidrógeno se considera un combustible convencional y se utiliza en muchos tipos de procesos en todo el mundo, la mayoría de los procesos de producción de hidrógeno, alrededor del 96%, no son ecológicos. Los métodos convencionales de producción de hidrógeno utilizan metano como reactivo y los contaminantes como CO, CO₂, aceites pesados y coque de petróleo se producen como subproductos. Por otro lado, la electrólisis del agua es el método más costoso para la producción de hidrógeno, ya que la reacción química necesita electricidad para que se lleve a cabo.⁴ Debido a este problema, la comunidad científica se ha dedicado a mejorar los diferentes componentes de los electrolizadores de membrana de intercambio de protones (PEM)⁵ para producción de hidrógeno o a modificar las condiciones del sistema, como la temperatura y la presión del fluido, para facilitar o acelerar la cinética de la reacción química.⁶

Afortunadamente, hay un método cuyo reactivo único es el agua y su subproducto único es el O₂. Los electrolizadores PEM pueden producir hidrógeno altamente puro en un proceso electroquímico de un solo paso. Con la finalidad de mejorar esas condiciones de operación de los electrolizadores tipo PEM, se propone acoplarlo a un colector solar de canal parabólico, operado con nanofluidos, para evaluar su efecto en la producción de hidrógeno. Por otro lado, el incremento de la temperatura en una celda de combustible o en un electrolizador favorece a la cinética de las reacciones químicas y a su vez a la generación de energía eléctrica o producción de hidrógeno, según sea el caso. Es precisamente esa la razón de realizar una investigación que muestre los efectos en la eficiencia de un electrolizador PEM al suministrarle agua caliente sin comprometer sus principios de funcionamiento electroquímico.

⁴ Shiva Kumar, S., & Himabindu, V. (2019). Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies*, 2(3), 442-454.

⁵ Xu, W., & Scott, K. (2010). The effects of ionomer content on PEM water electrolyzer membrane electrode assembly performance. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(21), 12029-12037.

⁶ Toghiani, S., Afshari, E., Baniasadi, E., & Shadloo, M. (2019). Energy and exergy analyses of a nanofluid based solar cooling and hydrogen production combined system. *Renewable Energy*, 141, 1013-1025.

Antecedentes

Existe una tendencia a nivel mundial por el estudio de los diferentes nanofluidos, tanto de sus propiedades termodinámicas como de sus aplicaciones en los diferentes sistemas térmicos de energías renovables. De acuerdo a una investigación realizada en el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Semnan, Iran, las nanopartículas pueden incrementar la eficiencia en la transferencia de calor del fluido caloportador entre 10 y 40%.⁷ Esta característica de los nanofluidos induce, en el ámbito de la investigación, el interés de exploración en la aplicación de estos fluidos en los sistemas termosolares con la finalidad de evaluar su efecto en el aprovechamiento de la energía solar. En la Figura 2 se muestran los primeros resultados publicados acerca de los nanofluidos donde se aprecian los ahorros en la potencia de bombeo del fluido caloportador en relación a los coeficientes de transferencia de calor con nanofluidos.⁸

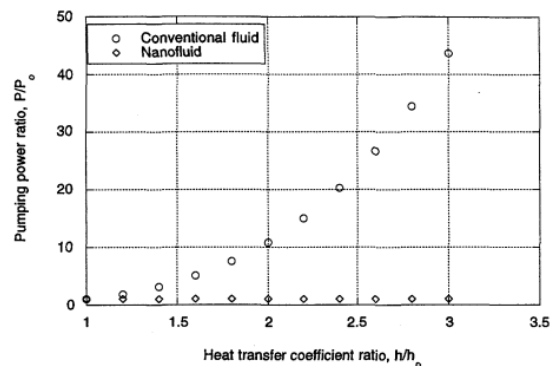


Figura 2.- Ahorros reflejados en la potencia de bombeo de nanofluidos en comparación con fluidos convencionales.⁸

En el año 2017, la Universidad Autónoma de Baja California (UABC) inició una línea de investigación en el área de nanofluidos para aplicaciones en el área de energía solar térmica. Actualmente, se han realizado estudios con nanopartículas de dióxido de silicio y nanotubos de carbono, y se desea continuar con la experimentación de nuevas nanopartículas. Así mismo, se desea

⁷ Alirezaie, A., Hajmohammad, M. H., Alipour, A., & salari, M. (2018). Do nanofluids affect the future of heat transfer? A benchmark study on the efficiency of nanofluids." *Energy*, 157, 979–989.

⁸ S.U.S. Choi and J.A. Eastman, "Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles," *ASME Int. Mech. Eng. Congr. Expo.*, pp. 99–105, 1995.

ampliar el conocimiento teórico-experimental de los sistemas de producción de hidrógeno, específicamente los electrolizadores tipo PEM. De esta manera surge la idea innovadora de incorporar diferentes nanofluidos en un sistema de concentración solar acoplado a un electrolizador para evaluar su efecto en la producción de hidrógeno. En la Figura 3 se muestra el colector solar de canal parabólico que se encuentra en las instalaciones del laboratorio de energías renovables de la UABC. De igual manera, en las Figuras 4 y 5 se muestran gráficamente el electrolizador tipo PEM y el intercambiador de calor de tubos coaxiales, los cuales serán considerados en este proyecto de investigación.



Figura 3.- Colector solar de canal parabólico en las instalaciones de la UABC. Fuente: El autor.



Figura 4.- Ejemplo de electrolizador tipo PEM.

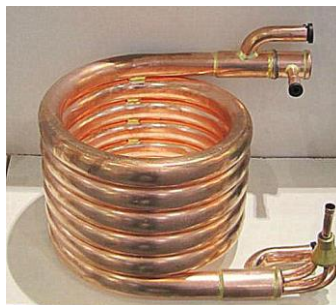


Figura 5.- Ejemplo de intercambiador de calor de tubos coaxiales.

Justificación

A principios del siglo XXI, algunos investigadores de la Universidad de los Emiratos Árabes Unidos y la Universidad de Miami, Kazim et al, estudiaron una proyección de la demanda total de combustibles fósiles de los Emiratos Árabes Unidos (EAU) y su producción de petróleo y gas natural. En un lapso de 100 años, a partir de principios de este siglo, predijeron que para el final de la segunda década, habría una falta de recursos energéticos convencionales y la demanda de energía crecería exponencialmente. Para resolver esta falta de energía, proponen que la energía del hidrógeno coexista con los combustibles fósiles al comienzo del período de divergencia de demanda / producción de combustibles fósiles. Del mismo modo, proponen una red de tuberías, entre los Emiratos Árabes Unidos y Europa, Japón y los Estados Unidos, para exportar hidrógeno y resolver la demanda de energía.⁹

El futuro desabasto de combustibles fósiles convencionales y el incremento en el precio de su extracción está orillando a la economía global a buscar alternativas en los combustibles de fuentes de energía renovable. Sin embargo, el alto costo de producción de hidrógeno de alta pureza no le permite competir en el mercado internacional. De igual manera, el costo, dimensiones y peso de los materiales utilizados en los intercambiadores de calor industriales o colectores solares, como el cobre, titanio, acero inoxidable, etc., frenan la inversión e implementación de estas tecnologías. Es evidente entonces que si se mejora la eficiencia de producción de hidrógeno de alta pureza y el rendimiento de los colectores solares, así como la reducción de los equipos de transferencia de calor, los sistemas termosolares de producción de hidrógeno serían más utilizados a nivel mundial, favoreciendo así a la reducción de contaminantes, la alta confiabilidad de la red eléctrica y la disponibilidad de combustibles de energía renovable.

⁹ Kazim, A., & Veziroglu, T. (2001). Utilization of solar-hydrogen energy in the UAE to maintain its share in the world energy market for the 21st century. *Renewable Energy*, 24(2), 259-274.

Objetivo General

Realizar un análisis numérico de un sistema termosolar operado con diferentes nanofluidos para evaluar su efecto en la producción de hidrógeno en un electrolizador tipo PEM y la posible reducción de las dimensiones de los intercambiadores de calor.

Objetivos Específicos

- Recopilación, revisión, análisis y procesamiento de fuentes bibliográficas.
- Estudio de metodologías de simulación de sistemas solar-hidrógeno y nanofluidos, y proponer un diseño del sistema para someterlo a simulación en EES.
- Realizar el modelo matemático de cada uno de los componentes del sistema y los fluidos de trabajo: Colector solar de canal parabólico, intercambiador de calor coaxial, electrolizador tipo PEM y nanofluidos.
- Estudio teórico: simulación y análisis termodinámico del sistema propuesto.

Hipótesis

Los nanofluidos con base en nanopartículas de estructuras de carbono como el graféno, nanotubos de carbono o nano-placas de graféno pueden reducir en al menos un 50% las dimensiones del intercambiador de calor de tubos concéntricos del sistema solar-hidrógeno e incrementar la producción de hidrógeno del electrolizador tipo PEM y la eficiencia global del sistema solar-hidrógeno.

CAPITULO II
MARCO TEÓRICO

Marco teórico

En este apartado se establecerá el soporte conceptual que será utilizado para desarrollar y lograr los objetivos establecidos en el planteamiento del proyecto de investigación. Estos conceptos permitirán interpretar correctamente los resultados obtenidos de la experimentación y así ratificar o refutar la hipótesis planteada. De igual manera, se delimitará el campo de estudio que abarca esta investigación. El contenido de esta sección será dividido en los siguientes puntos principales:

- Nanofluidos
- Sistemas Solar-Hidrógeno

Nanofluidos

Los nanofluidos surgieron de proyectos patrocinados por el departamento de energía de los Estados Unidos en el Laboratorio Nacional Argonne. Cabe destacar que este laboratorio es el primer y mayor laboratorio nacional de investigación en ciencia y tecnología de los Estados Unidos, tanto por su tamaño como por su alcance. Este laboratorio surgió a causa del proyecto Manhattan y fue en este lugar donde se logró por primera vez la reacción nuclear auto-sostenida; proyecto liderado por el famoso científico Enrico Fermi. Desde su fundación en el año 1946, en este laboratorio se han hecho descubrimientos de impacto trascendental siendo la síntesis de nanofluidos uno de ellos.¹⁰

La síntesis de nanofluidos fue descubierta y primera vez publicada por los investigadores Stephen Choi y Jeffrey Eastman en su artículo científico titulado “Mejorando la conductividad térmica de fluidos con nanopartículas” en el año 1995.⁸ De acuerdo a una investigación del estado del arte de los nanofluidos, publicada por el instituto de investigación del ambiente y energía de Qatar en el año 2018, desde el descubrimiento de los nanofluidos hasta que empezaron a tener popularidad en la comunidad científica, pasaron alrededor de 7 años; y a partir de ese momento, el número de

¹⁰ Laboratorio Nacional Argonne. Nuestra Historia, “Inspirando el futuro de nuestra nación”. (2018). Recuperado de: <https://www.anl.gov/our-history>

publicaciones científicas relacionadas ha ido incrementando hasta llegar cerca de las 2000 publicaciones por año a partir del año 2016, solamente en la plataforma Elsevier.¹¹ Esta investigación arroja como resultado que la revista de mayor auge en la plataforma Elsevier es la revista internacional de transferencia de calor y masa, con un total de 800 publicaciones. La Figura 6 muestra el número de artículos publicados en cada una de las revistas en Elsevier con referencia a los nanofluidos.

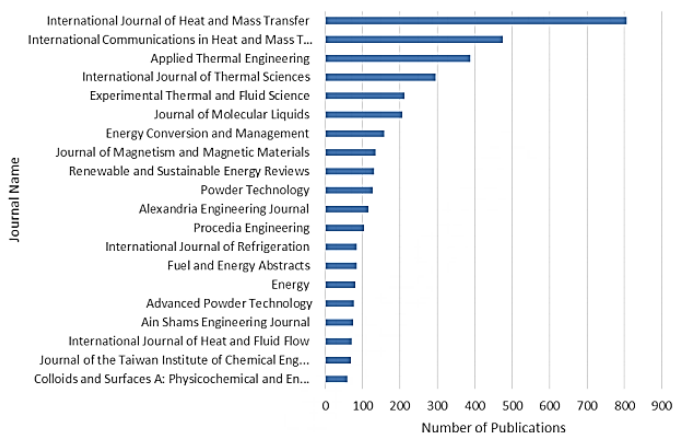


Figura 6.- Número de artículos relacionados a nanofluidos en cada una de las revistas publicadas en Elsevier.¹¹

La síntesis de nanofluidos por definición es la dispersión de nanopartículas menores a los 100 nanómetros en un fluido base, comúnmente agua destilada o termofluidos como el glicol o etilenglicol. Para poder lograr esta dispersión de las nanopartículas en el fluido base, conocido como suspensión coloidal, en el área de la fisicoquímica, se deben tomar en cuenta algunos cuidados especiales en su preparación para evitar aglomeraciones. Es altamente importante que la síntesis del nanofluido sea estable para que mejoren las propiedades térmicas del fluido. Sin los cuidados necesarios en la preparación de los nanofluidos, las nanopartículas se aglomeran y se sedimentan.¹¹ Esto puede causar estancamientos en los accesorios hidráulicos o tuberías. De manera general, el procedimiento de preparación de los nanofluidos es relativamente sencillo y actualmente se han realizado estudios de optimización en el proceso de preparación de cada tipo de nanofluido,

¹¹ Nurettin Sezer, Muataz A. Atieh and Muhammer Koc. A Comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. *Powder Technology* 2018.

dependiendo de la concentración de partículas, el tipo y cantidad de fluido base. La Figura 7 muestra gráficamente el proceso de preparación de los nanofluidos.

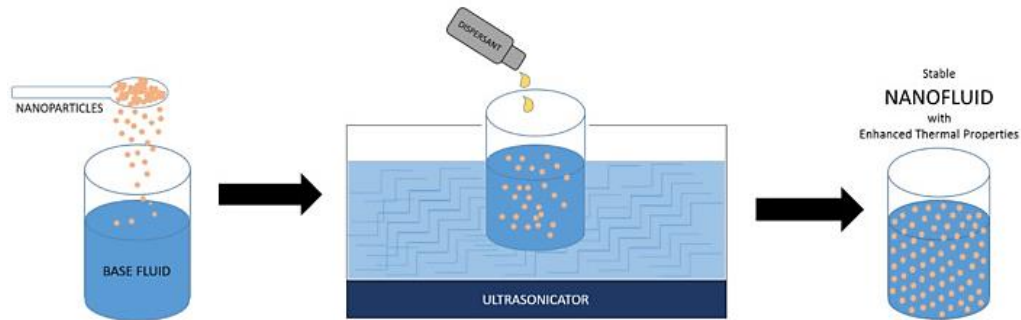


Figura 7.- Proceso de síntesis de nanofluidos.¹¹

Tal como se puede observar, el primer paso en la preparación de los nanofluidos es agregar una cantidad específica de nanopartículas, dependiendo de la concentración volumétrica que se desea preparar, en cierto volumen de fluido base. Esta mezcla se hace pasar por un proceso de ultrasonido en una placa o un baño ultrasónico, y a la vez se agrega un líquido dispersante, también llamado surfactante. Finalmente, se obtiene el nanofluido con nanopartículas en suspensión coloidal. Este proceso ha sido descrito a grandes rasgos. Sin embargo, existe un alto número de variables que describen la optimización de esta preparación y sus propiedades fisicoquímicas.

En cuanto a las nanopartículas, las variables consideradas en la preparación de los nanofluidos son: el tipo de nanopartícula, la concentración, el tamaño de la partícula y su morfología. En cuando al fluido base, las variables consideradas son el tipo de fluido y el volumen que se desea preparar. Las variables consideraras para el dispersante o surfactante es su tipo y concentración. Los equipos de ultrasonido son los que cuentan con el mayor número de variables y precisamente es esta etapa donde se deben cuidar todos estos parámetros con la finalidad de que las nanopartículas queden eficazmente en suspensión coloidal, sin aglomeraciones y sin sedimentación. Las variables consideradas son: tipo de equipo de ultrasonido, comúnmente baño ultrasónico o sonda ultrasónica, periodo de tiempo, frecuencia y potencia de ultrasonido, condiciones de temperatura y pH.¹¹ En la

Figura 8 se puede apreciar la esquematización de la preparación de nanofluidos con una sonda ultrasónica.

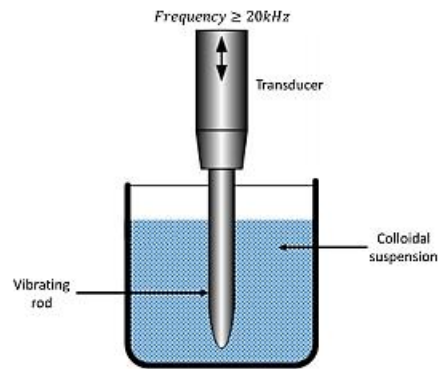


Figura 8.-Esquematación de la preparación de nanofluidos con una sonda ultrasónica.¹¹

Las pruebas en nanofluidos han demostrado que las nanopartículas mejoran la conductividad térmica del fluido base hasta un 300%.¹¹ En la Figura 9 se pueden observar diferentes nanofluidos y el porcentaje de mejora de las propiedades de transferencia de calor.

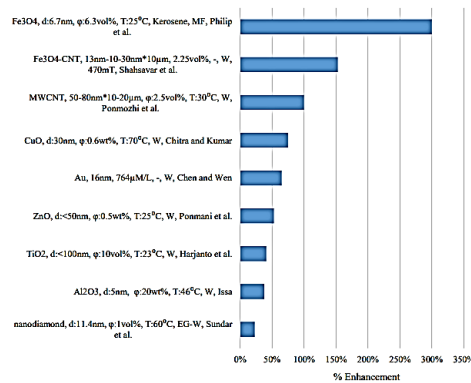


Figura 9.- Porcentaje de mejora en la transferencia de calor de diferentes nanofluidos.¹¹

En la actualidad, una de las nanopartículas que ha llamado más la atención de la comunidad científica son los nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT, por sus siglas en inglés). Este tipo de nanopartículas han demostrado ser hasta 7 veces mejor conductoras de calor que las nanopartículas de plata.¹¹ En la Figura 10 se muestra una gráfica de comparación de la conductividad

térmica de diferentes nanopartículas y la Figura 11 muestra la morfología de los nanotubos de carbono de pared múltiple.

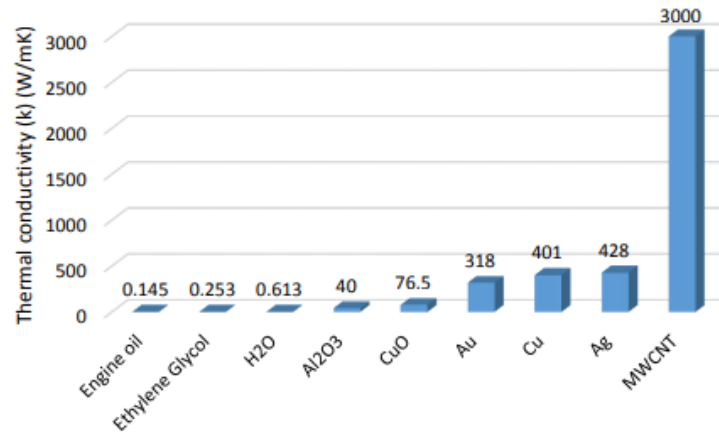


Figura 10.-Comparativa de conductividad térmica de nanopartículas.¹¹

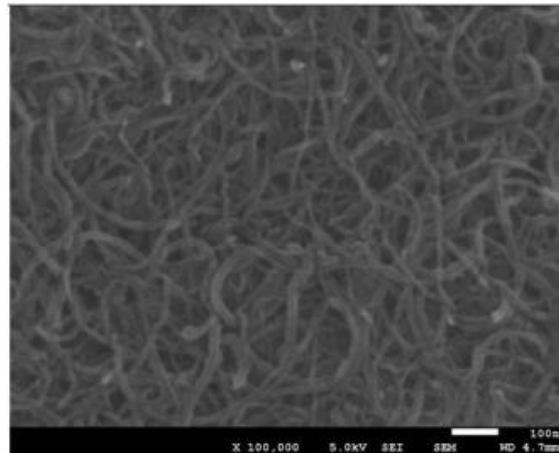


Figura 11.- Morfología de los nanotubos de carbono de pared múltiple.¹²

Es muy evidente el posible incremento en la conductividad térmica de los termofluidos cuando se le agregan este tipo de nanopartículas. Es por esa razón que la comunidad científica ha estado realizando experimentación enfocada en las nanoestructuras de carbono, tales como: nanotubos de carbono (CNT), nanotubos de carbono de pared múltiple (MWCNT), graféno (G),

¹² Yanan Zhao, Eusebio D.C., Dan Zhang, et al. Ultrasonic processing of MWCNT nanopaper reinforced polymeric nanocomposites. Polymer 2018; 156:85-94.

nanoplacas de grafeno (GNP), óxido de grafeno (GO), nanodiamantes (ND), entre otros. En las Figuras 12 y 13 se muestran ejemplos de todas estas nanoestructuras con base de carbono.

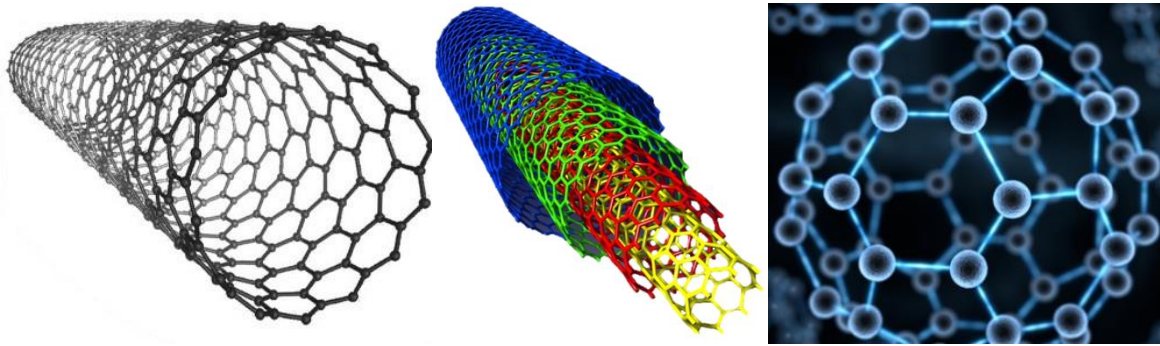


Figura 12.- Ejemplos de nanoestructuras con base de carbono como CNT, MWCNT y G. Orden de izquierda a derecha

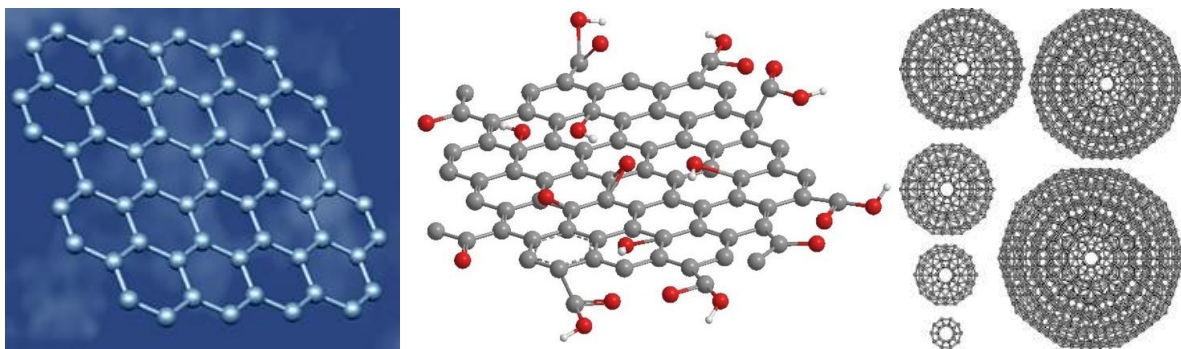


Figura 13.- Ejemplos de nanoestructuras con base de carbono como GNP, GO y ND. Orden de izquierda a derecha

A pesar de que las nanoestructuras con base de carbono son altamente prometedoras, tienen una desventaja muy marcada con respecto al resto de tipos de nanopartículas, las cuales generalmente presentan estructura esférica. Su gran desventaja es el peso y tamaño de las nanoestructuras. Esto provoca que las nanopartículas se aglomeren y se sedimenten, y a su vez provocan que el nanofluido pierda sus propiedades de transferencia de calor y las nanopartículas ocasionen estancamientos en los accesorios hidráulicos.

Afortunadamente, existen algunas soluciones a este problema como el pre-tratamiento del nanofluido con ultrasonido y el uso de tensoactivos o surfactantes. En la Figura 14 se muestra un equipo de baño ultrasónico comúnmente utilizado en la síntesis de nanofluidos.



Figura 14.- Baño ultrasónico comúnmente utilizado en la síntesis de nanofluidos.

El baño ultrasónico cuando está en operación genera ondas ultrasónicas que provocan que las macro estructuras de nanopartículas aglomeradas se desintegren, dejando a su paso partículas más pequeñas. El baño ultrasónico provoca la generación de micro-burbujas de vacío, también conocidas como cavitación, que al implotar desprenden nanopartículas de las macro-estructuras, haciéndolas menos pesadas, y a su vez, mejorando la estabilidad del nanofluido. Cuando las partículas llegan a una escala nanométrica, la fuerza de gravedad que se ejerce sobre ellas se iguala a la presión hidrostática del fluido, provocando que las partículas se queden suspendidas en el fluido, formando una suspensión coloidal o también llamados coloides. Una característica muy peculiar de los coloides es el cambio en su coloración dependiendo del tamaño de nanopartícula que se encuentre suspendida en el fluido. En la Figura 15 se muestra la gran variedad de coloraciones que pueden presentar los coloides de plata.

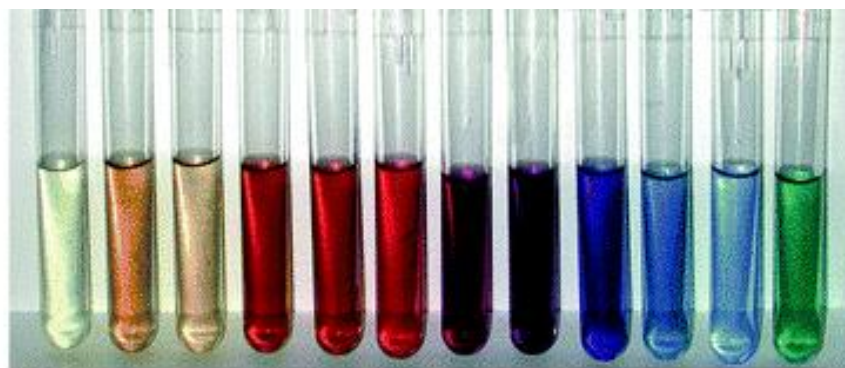


Figura 15.- Coloraciones que presentan los coloides de plata.

Con ayuda de un espectrofotómetro, se puede caracterizar el nanofluido y también conocer el tamaño y tipo de nanopartículas suspendidas en el fluido. Cada material tiene propiedades ópticas únicas como la conductancia, absorbancia y transmitancia. Al tomar lecturas de estas propiedades ópticas, se puede conocer con un alto grado de confiabilidad los materiales de los que está compuesto el fluido.

Una vez que el fluido ya se encuentra en suspensión coloidal, la interacción entre las cargas eléctricas de las nanopartículas también puede provocar que las partículas se aglomeren de nuevo y se sedimenten. Una solución a este problema es la adición de tensoactivos o surfactantes, los cuales le dan cuerpo a la nanopartícula, la neutralizan eléctricamente y la mantienen en suspensión coloidal. Los tensoactivos son altamente utilizados en la industria, por ejemplo, son el componente activo de jabones y detergentes. Son las macromoléculas encargadas de remover y encapsular las partículas de suciedad en la ropa o telas. Precisamente esa propiedad que tienen de encapsular partículas es la que ayuda a las nanopartículas a mantenerse en suspensión coloidal. A ese encapsulamiento de partículas que forman los tensoactivos se les conoce como micelas. En la Figura 16 se encuentra representada la estructura de una micela.

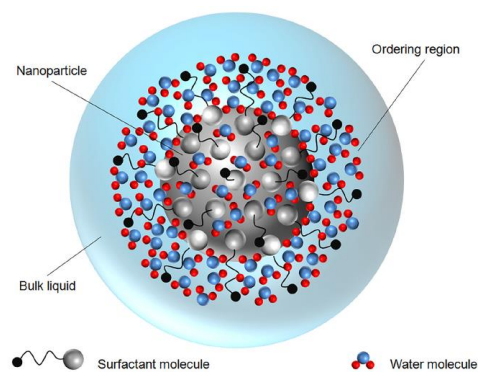


Figura 16.- Representación gráfica de una micela.

Los tensoactivos están compuestos de dos secciones, una cabeza hidrófila (tiene afinidad al agua) y una cola hidrófoba (repele el agua). En la cabeza se encuentran las cargas eléctricas que hacen característico al tensoactivo. Existen 4 tipos de surfactantes: No iónico, aniónico, catiónico y anfótero. En la Figura 17 se aprecia gráficamente la diferencia entre estos 4 tipos de surfactantes.

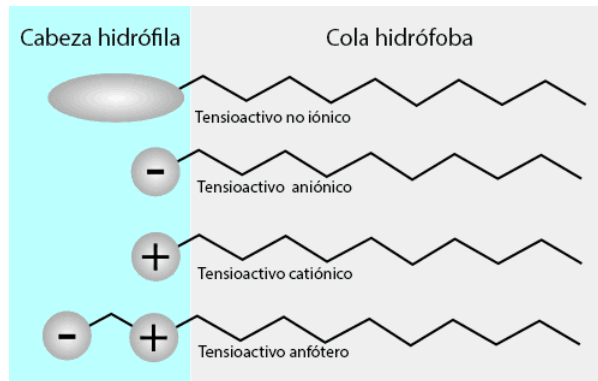


Figura 17.- Clasificación de los surfactantes

Otro aspecto importante de los tensoactivos es la composición y longitud de su cola, generalmente formada de una cadena de carbonos. Existen surfactantes que tienen exactamente la misma cabeza activa, pero una cola más larga o más corta o la composición de la cola puede ser ligeramente diferente. Cada uno de estos surfactantes logrará un efecto distinto en la estabilidad del nanofluido. En la Figura 18 se puede apreciar gráficamente la composición de 3 surfactantes aniónicos con diferentes longitudes de su cola: Sodio 1-butanefulfonato (BDS), Sodio dodecil sulfato (SDS) y Sodio 1 octadecanesulfonato (ODS).

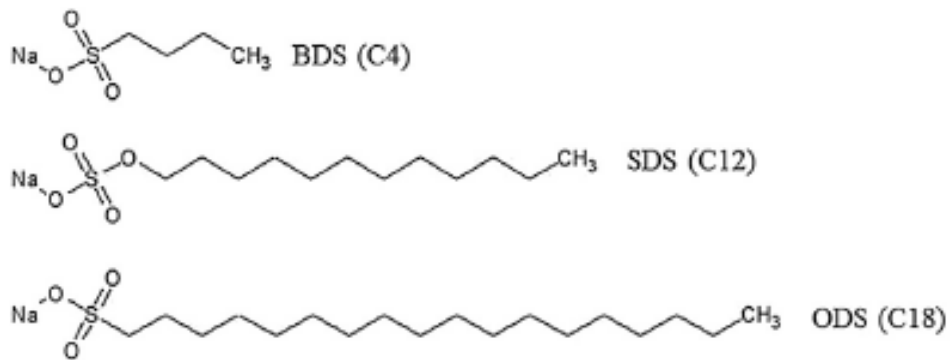


Figura 18.- Ejemplos de surfactantes aniónicos con diferentes longitudes de cola: BDS, SDS y ODS

Existe un parámetro usado en la fisicoquímica de coloides conocido como potencial zeta (ζ), el cual mide el potencial eléctrico que existe entre el centro de la nanopartícula y el extremo final de la cola de los surfactantes. El potencial zeta se utiliza como parámetro indicador de la estabilidad del coloide o nanofluido. Si el potencial zeta del nanofluido se encuentra entre -20 mV y 20 mV, el coloide

es inestable. De igual manera, si su valor es muy cercano a 0 mV, el coloide es altamente inestable. Los valores con los que se puede predecir que el coloide si es estable son los valores menores a -20 mV y mayores a 20 mV. Los nanofluidos con un potencial zeta menor a -60 mV o mayor a 60 mV son perfectamente estables. Eventualmente el potencial zeta tendrá una tendencia a 0 mV y esto provocará que las nanopartículas se aglomeren y finalmente se sedimenten. Esto se debe a la degradación del nanofluido causado por los esfuerzos térmicos, dilatación y contracción que sufren las micelas al ser utilizado el nanofluido como termofluido. A causa de este efecto, cada cierto tiempo se debe monitorear el potencial zeta del nanofluido para evitar que las nanopartículas se sedimenten. En la Figura 19 se representa gráficamente el potencial zeta en relación a cada una de las capas de una micela de una nanopartícula negativa. La primera capa (cargas positivas) representan la cabeza del surfactante y la segunda capa (cargas negativas) representan sus colas.

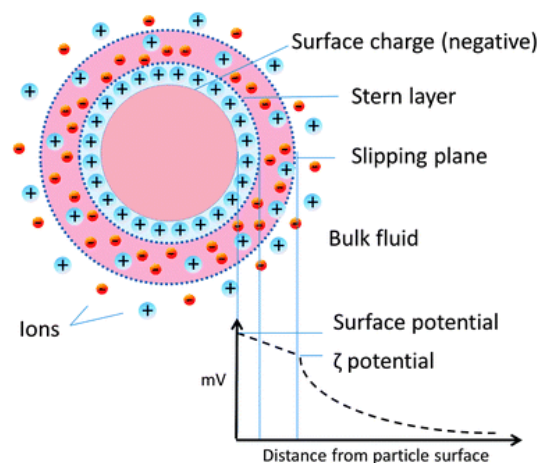


Figura 19.- Comportamiento del potencial en cada una de las capas de una micela de nanopartícula negativa.

Otro método de estabilización de coloides o nanofluidos es modificar su pH. Si las nanopartículas son positivas, encontrarán su estabilidad en un ambiente alcalino, ya que habrá iones OH^- disueltos en el fluido. En el caso contrario, si las nanopartículas son negativas, encontrarán su estabilidad en un ambiente ácido, ya que habrá iones H^+ disueltos en el fluido. A este tipo de estabilización se le conoce como estabilización electrostática y a la estabilización con surfactantes se le conoce como estabilización estérica, ambos se encuentran representados en la Figura 20. De igual

manera, en la Figura 21 se pueden apreciar muestras de nanofluido de óxido de zinc con diferentes grados de estabilidad a distintos valores de pH.

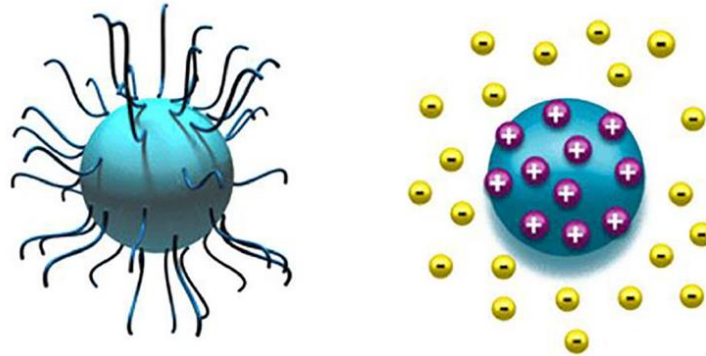


Figura 20.- Tipos de estabilización de nanofluidos: estérica (izquierda) y electrostática (derecha).

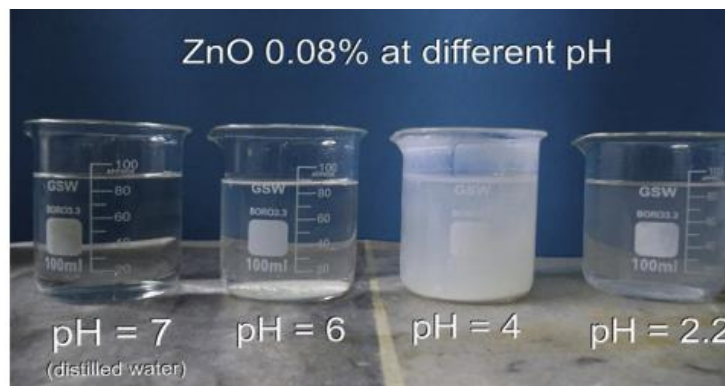


Figura 21.- Diferentes niveles de estabilidad en nanofluidos de óxido de zinc a distintos valores de pH.

Otro parámetro importante en la fisicoquímica de los colides es el movimiento Browniano. Cuando las partículas llegan a la escala nanométrica, éstas empiezan a tener un movimiento aleatorio mientras se mantienen suspendidas. Este efecto lo podemos observar a simple vista cuando un rayo de luz atraviesa una ventana y se observa que las partículas de polvo en el aire presentan este movimiento aleatorio. Otro ejemplo sería cuando agitamos un charco de agua turbia y se observa como la suciedad presenta movimientos aleatorios dentro del fluido. Exactamente lo mismo sucede a escala nanométrica y esta es una de las razones por las que los nanofluidos presentan alta conductividad térmica, al tener mayor interacción entre partículas. Es de esperarse que entre más pequeñas sean las nanopartículas, o las micelas, mayor será su movilidad dentro del fluido, y a su vez,

mayor será su movimiento Browniano. Existen equipos altamente sensibles y especializados que provocan el movimiento Browniano de las nanopartículas en muestras de nanofluido y detectan su posición, tamaño, dirección, cantidad de movimiento y su velocidad, y con todas estas variables evalúa el potencial zeta de la muestra. Un ejemplo de estos equipos es el Nanotracs Wave II, el cual se puede apreciar en la Figura 22.



Figura 22.- Equipo de medición de potencial zeta Nanotracs Wave II.

Finalmente, el uso de un tensoactivo u otro se verá directamente reflejado en la tensión superficial del fluido. Los tensoactivos, como su nombre lo dice, modifican la tensión que existe entre la fase líquida del nanofluido y la fase gaseosa del aire atmosférico. Del lado del líquido está presente la presión de vapor, que es la tendencia que tienen todos los líquidos hacia el cambio de fase y al incremento de la entropía en el universo y del lado del aire se encuentra la presión atmosférica que se ejerce sobre el líquido por efecto de la gravedad. Para que estas dos presiones coexistan, se modifica el área de interacción, o interfase, entre la fase líquida del nanofluido y la fase gaseosa del aire atmosférico. Este efecto se puede ver reflejado en las Figuras 23 y 24.

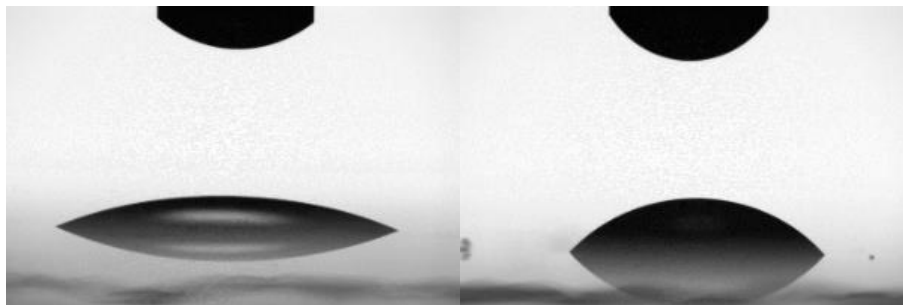


Figura 23.- Ejemplos de nanofluidos con baja tensión superficial.

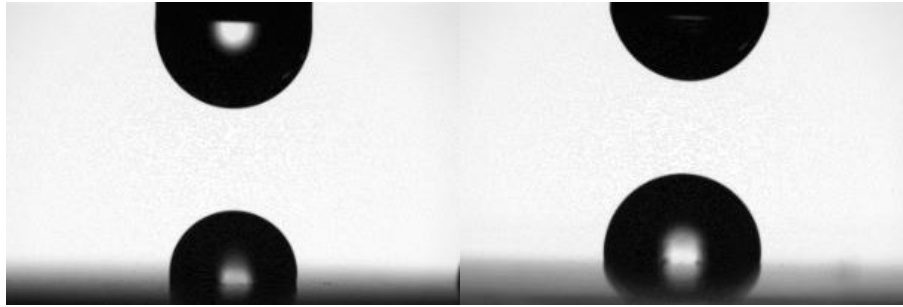


Figura 24.-Ejemplos de nanofluidos con alta tensión superficial.

Sistemas Solar-Hidrógeno

La tecnología moderna permite la explotación del hidrógeno como fuente de calor y electricidad. Esta tecnología se conoce como celdas de combustible. Dentro de este dispositivo electroquímico tiene lugar la reacción inversa de la electrólisis, liberando calor, induciendo una corriente eléctrica, consumiendo hidrógeno y oxígeno, y produciendo como un único subproducto moléculas de agua. Los sistemas solar-hidrógeno (SSH) combinan colectores solares o paneles fotovoltaicos con electrolizadores y celdas de combustible. Esta combinación permite la producción de hidrógeno en el electrolizador cuando el arreglo fotovoltaico produce más energía de la que demanda la red y el consumo de hidrógeno en la celda de combustible cuando la red demanda más energía que la que producen los paneles fotovoltaicos. Éste es el principio de almacenamiento de energía de los SSH. Esta modalidad de almacenamiento de energía permite al SSH gestionar la energía producida de manera más eficiente.¹³

En un arreglo solar fotovoltaico convencional, la energía producida debe consumirse en ese mismo momento para no sobrecargar la red y dañar las líneas de transmisión de la energía eléctrica. Una opción de almacenamiento de energía son los bancos de baterías, sin embargo, los bancos de baterías tienen desventajas importantes como su bajo tiempo de vida, alto costo, auto-descarga, sulfatación, daños permanentes en descargas profundas, entre otras. Cuando el banco de baterías se

¹³ Ancona, M. A., Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Peretto, A., Scarponi, L. B. (2017). From solar to hydrogen: Preliminary experimental investigation on a small scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 20979–20993.

encuentra saturado, la producción excedente de energía eléctrica proveniente del arreglo fotovoltaico debe disiparse al ambiente en forma de calor, representando un porcentaje de pérdidas al sistema y a su vez disminuyendo la eficiencia global del sistema.

Afortunadamente, los SSH no presentan ninguna de las desventajas antes mencionadas. La energía eléctrica excedente puede enviarse a un electrolizador tipo PEM para generar hidrógeno y almacenarlo en un tanque y cuando la energía generada en el arreglo fotovoltaico sea deficiente, ese hidrógeno puede enviarse a una celda de combustible para satisfacer ese déficit de energía eléctrica. Ese beneficio de los SSH da solución a la intermitencia de la energía solar y al almacenamiento confiable de la energía. Además, el calor residual generado en la celda de combustible puede ser aprovechado para calefacción o agua caliente sanitaria. En la Figura 25 se muestra un ejemplo de un SSH en el que se integran los equipos antes mencionados.¹⁴

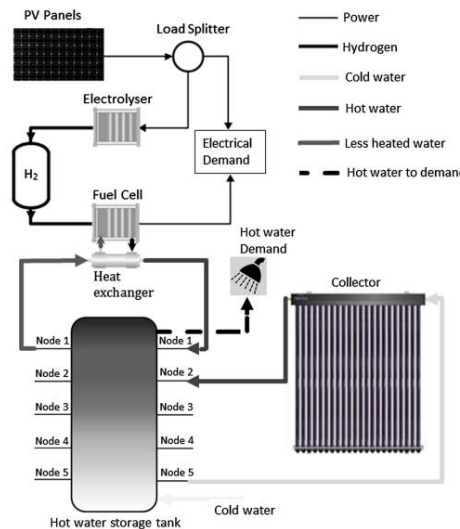


Figura 25.- Integración de equipos de energía solar e hidrógeno en un SSH

A pesar de que los SSH dan solución a problemáticas de los sistemas fotovoltaicos, es importante recalcar que en cada uno de los equipos o etapas del proceso de la energía solar existirán pérdidas de energía por efecto de la eficiencia del sistema. Uno de los propósitos más importantes de

¹⁴ Assaf, J., & Shabani, B. (2018). Multi-objective sizing optimization of a solar-thermal system integrated with a solar-hydrogen combined heat and power system, using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 164, 518–532.

esta investigación es cuantificar el incremento de la eficiencia en el electrolizador tipo PEM cuando se alimenta con agua a mayor temperatura. En la Figura 26 se muestran las pérdidas en cada uno de los pasos en el proceso de almacenamiento de energía en los SSH.

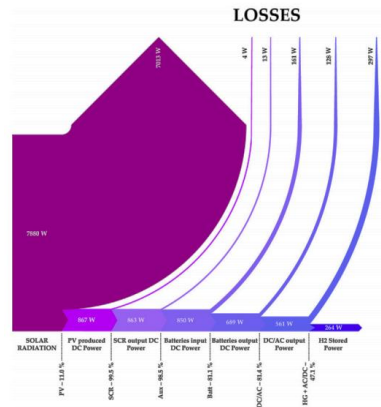


Figura 26.- Pérdidas en cada uno de los pasos en el proceso de almacenamiento de energía en los SSH. ¹³

En años recientes, el gobierno de Alemania ha financiado proyectos de investigación relacionados a la integración de las celdas de combustible tipo PEM al sector doméstico como parte de su plan de protección al ambiente publicado en octubre del 2016. ¹⁵ Una de sus iniciativas es el proyecto H2HOME, en el cual se evalúa el impacto técnico, ambiental y económico de la integración de celdas de combustible en hogares situados al este de Alemania. En el proyecto H2HOME se propone analizar un sistema interconectado a la red eléctrica y una red de suministro de hidrógeno que da solución a la demanda de energía eléctrica, refrigeración, calefacción y agua caliente sanitaria. La esquematización de este proyecto se muestra en la Figura 26.

¹⁵ Herrmann, A., Mädlow, A., & Krause, H. (2019). Key performance indicators evaluation of a domestic hydrogen fuel cell CHP. International Journal of Hydrogen Energy, 44(35), 19061–19066.

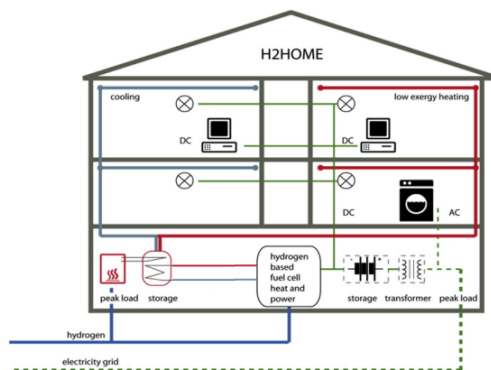


Figura 27.- Esquematación del proyecto H2HOME.¹⁴

Algunos autores como Topriska, et al¹⁶, han estudiado las aplicaciones de la combustión directa de hidrógeno. Estos investigadores de la universidad Brunel de Londres desarrollaron un análisis numérico-experimental de un SSH para aplicaciones de cocción de alimentos. Además, desarrollaron una simulación del SSH en condiciones climáticas reales de un pequeño pueblo de Jamaica en el software TRNSYS. La motivación de los autores para desarrollar esta investigación es estimar la viabilidad del uso de hidrógeno como combustible para cocinar en los países en desarrollo. Según sus resultados, descubrieron que es necesario 1.14 Nm³/año y un arreglo fotovoltaico de 100.8 kW para resolver la demanda de cocción de 622.05 kg de alimentos en el lugar de estudio. Los mismos autores desarrollaron un estudio similar con la misma metodología en tres países en desarrollo diferentes (Jamaica, Indonesia y Ghana)¹⁷ para descubrir cómo las condiciones climáticas afectan la producción de hidrógeno. Según sus hallazgos, las condiciones climáticas de estos 3 países no son relevantes en el estudio de la producción de hidrógeno ya que la desviación máxima de los 3 estudios es del 0.9%.

Ancona, et al,¹³ estudiaron la pérdida de eficiencia de cada componente de un arreglo fotovoltaico de un SSH para estimar la eficiencia global del sistema. Midieron diferentes variables como la corriente eléctrica y el voltaje en el conjunto fotovoltaico, el flujo másico de hidrógeno, la

¹⁶ Topriska, E., Kolokotroni, M., Dehouche, Z., & Wilson, E. (2015). Solar hydrogen system for cooking applications: Experimental and numerical study. *Renewable Energy*, 83,717–728.

¹⁷ Topriska, E., Kolokotroni, M., Dehouche, Z., Novieto, D. T., & Wilson, E. A. (2016). The potential to generate solar hydrogen for cooking applications: Case studies of Ghana, Jamaica and Indonesia. *Renewable Energy*, 95, 495–509.

radiación solar y las temperaturas de los puntos estratégicos. Descubrieron que la eficiencia global del SSH oscila entre 3.4% y 5.6%.

Omar, et al,¹⁸ simularon un SSH en el software Alpha Delphi 7 para estudiar los parámetros de rendimiento del SSH en tres ciudades diferentes de Turquía y localizar el mejor lugar para el desarrollo de un futuro proyecto de implementación de esta tecnología. En conjunto, evaluaron si la temperatura y la presión del electrolizador son factores relevantes en su eficiencia. Como parte de sus conclusiones, la presión no es un factor relevante y la temperatura influye directamente en la producción de hidrógeno. Además, la ubicación óptima para la aplicación del SSH es Konya, que se encuentra en el centro de Turquía. Una aportación importante de estos autores es el análisis del rendimiento de un colector solar híbrido (placa plana/fotovoltaico). Al retirarle calor al panel fotovoltaico se aumenta su eficiencia y además se puede usar esa agua caliente para calefacción o como agua caliente sanitaria. En esta investigación, esa agua caliente no solo se usa como agua caliente sanitaria, sino que esa agua se alimenta al electrolizador para aumentar su rendimiento en la producción de hidrógeno. En la Figura 28 se muestra la configuración de los equipos en el SSH analizado.

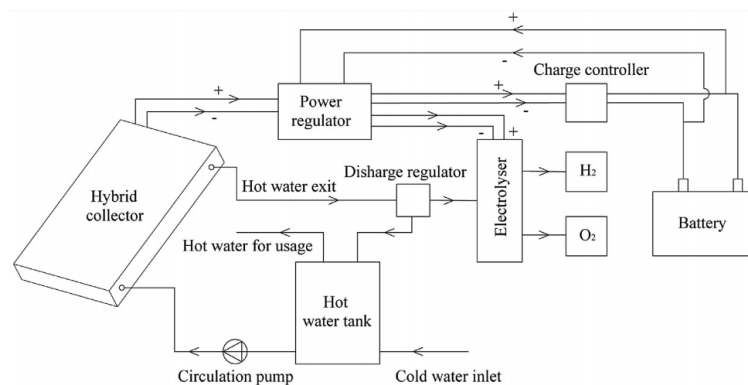


Figura 28.- Configuración de equipos analizados por Omar, et al.¹⁸

¹⁸ Omar, M. A., & Altinişik, K. (2016). Simulation of hydrogen production system with hybrid solar collector. International Journal of Hydrogen Energy, 41(30), 12836–12841.

Blal, et al,¹⁹ simularon en el software MATLAB un SSH y un sistema de viento-hidrógeno (SVH) en condiciones climáticas de Argelia con el propósito de evaluar la viabilidad de tecnologías híbridas en territorio argelino. Simularon ecuaciones electroquímicas que describen el comportamiento de una celda de combustible tipo PEM. Sus resultados muestran que Argelia es muy factible para los proyectos SSH y SVH y que las mejores ubicaciones para ellos son las ciudades de Saida, El bayadh y Adrar. En la Figura 29 se muestran los resultados de la producción anual de hidrógeno esperada para cada una de las ciudades de su estudio.

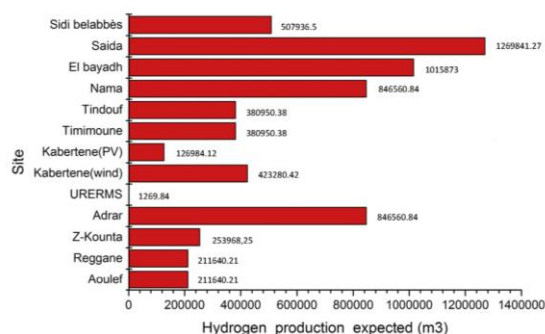


Figura 29.- Producción anual de hidrógeno esperada para distintas ciudades en Argelia.¹⁹

Una aportación importante de estos mismos autores es la conceptualización y modelo matemático de los dispositivos electroquímicos de producción de hidrógeno y de producción de energía eléctrica con hidrógeno (electrolizador tipo PEM y celda de combustible tipo PEM, respectivamente). A grandes rasgos, el electrolizador tipo PEM consume agua destilada y energía eléctrica para producir hidrógeno y oxígeno, y la celda de combustible realiza exactamente el mismo proceso pero en sentido contrario. Es decir, consume hidrógeno y oxígeno, y produce energía eléctrica y agua destilada. Afortunadamente, en ambos procesos no se genera ningún tipo de contaminante, y además, el agua destilada producida por la celda de combustible puede ser reutilizada en el electrolizador. En las Figuras 30 y 31 se muestran diagramas para representar gráficamente los procesos del electrolizador y la celda de combustible, respectivamente.

¹⁹ Blal, M., Belasri, A., Benatillah, A., Hamouda, M., Lachtar, S., Sahouane, N., Mostefaoui, M. (2018). Assessment of solar and wind energy as motive for potential hydrogen production of Algeria country; development a methodology for uses hydrogen-based fuel cells. International Journal of Hydrogen Energy, 43(19), 9192–9210.

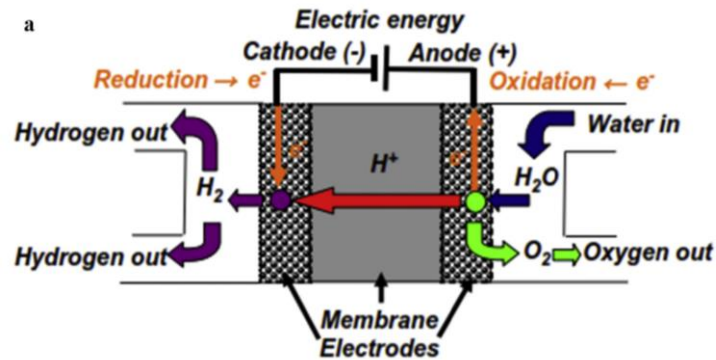


Figura 30.-Representación gráfica del proceso llevado a cabo en un electrolizador tipo PEM.

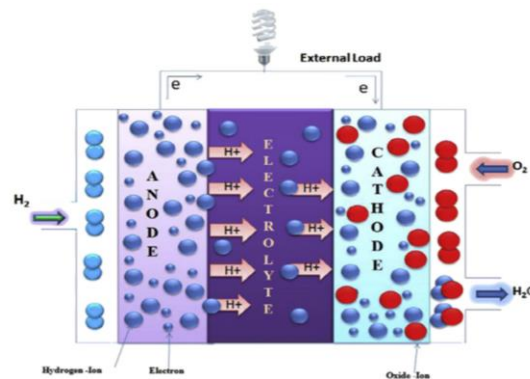


Figura 31.- Representación gráfica del proceso llevado a cabo en una celda de combustible tipo PEM.

Para que cualquiera de estos dos dispositivos funcione es necesaria la membrana de intercambio de protones, es decir, la membrana PEM. Esta membrana tiene tanto ventajas como desventajas. Una de sus ventajas, y también la más significativa, es que está compuesta de un polímero, es decir, un plástico. Este tipo de membrana tiene la característica de ser flexible, ligera y altamente conductora de protones. En la Figura 32 se muestra la estructura química de la membrana PEM. El hecho de que sea flexible abre las puertas a una infinidad de modelos y aplicaciones de las celdas de combustible. En la actualidad existen aplicaciones tanto móviles como estacionarias, por ejemplo, drones, generadores de respaldo, trenes, autobuses, retroexcavadoras, etc. Todas ellas consumiendo hidrógeno y generando como único residuo vapor de agua. Por otro lado, en comparación con los diferentes tipos de celdas de combustible, las tipo PEM tienen la ventaja de que la membrana tiene la propiedad de ser un conductor iónico siendo un material sólido ligero. Por ejemplo, las celdas de

combustible de óxido sólido utilizan un material cerámico para el intercambio de protones y los electrolizadores del tipo celda húmeda utilizan un electrolito líquido. Esto representa un problema tanto en el peso de la celda, por contener un material cerámico, o posibles fugas de electrolito, por contener un electrolito líquido. Es por esta razón que las celdas de combustible tipo PEM han tenido tanta aceptación, por su bajo mantenimiento, bajo peso, libre de fugas de electrolito y larga vida útil.

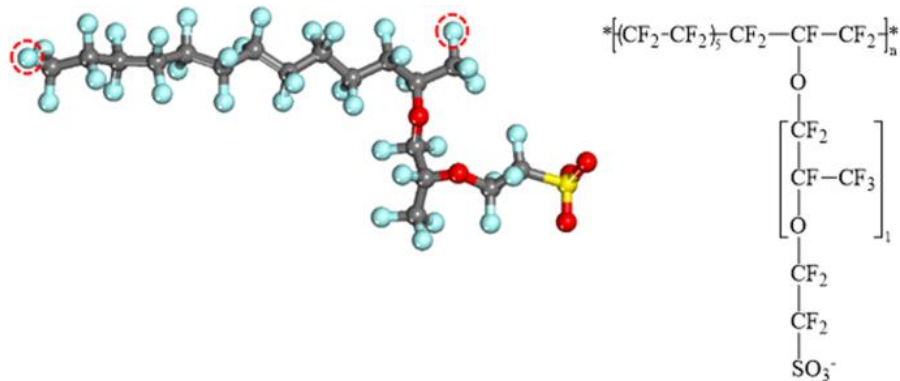


Figura 32.- Estructura química de la membrana PEM

Desafortunadamente, las celdas de combustible tipo PEM también tienen sus desventajas. Su principal desventaja radica en el proceso electroquímico que se lleva a cabo en la estructura interna de la membrana. Para que se pueda llevar a cabo el intercambio de carga eléctrica desde el ánodo hacia el cátodo la membrana tiene que estar húmeda, es decir, la porosidad interna de la membrana debe de estar impregnada de agua. Esta condición limita a las celdas PEM a una temperatura máxima de operación de 100 °C en condiciones ideales de presión (1 atm). El intercambio de carga eléctrica se favorece de los puentes de hidrógeno presentes en el agua líquida y los iones sulfito (SO_3^-) presentes en la estructura molecular de la membrana. Por lo tanto, si el agua cambia de fase, se pierden los puentes de hidrógeno, cortando la continuidad del fluido e imposibilitando la transferencia de carga. En la Figura 33 se muestra una representación gráfica de la composición de la membrana PEM en condiciones de operación. Los círculos con signo negativo representan los iones sulfito de la membrana, los círculos con signo positivo representan los portadores de carga protónica (iones con carga positiva) y los círculos sombreados las partículas de agua.

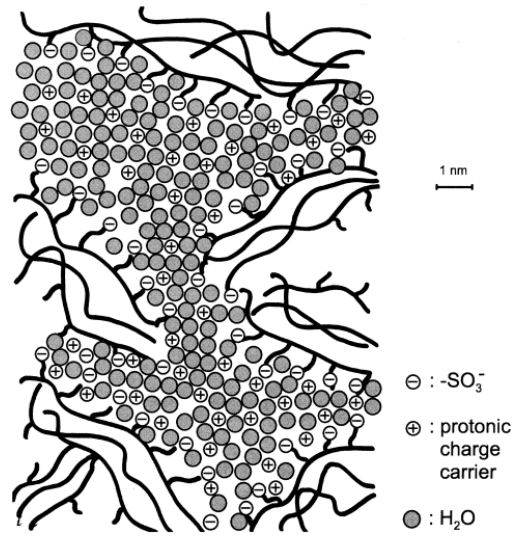


Figura 33.- Representación gráfica de la membrana PEM en condiciones de operación.

En un primer instante, cuando entra en contacto el hidrógeno suministrado a la celda de combustible y los iones sulfato de la membrana, el hidrógeno se ioniza liberando sus electrones hacia el circuito eléctrico y sus protones hacia la membrana. Debido a que el agua presenta un exceso de protones, se lleva a cabo un proceso complejo conocido como difusión estructurada, la cual consiste en reestructurar las moléculas de agua al formar y romper enlaces de hidrógeno. Estas nuevas moléculas formadas de agua ionizada se conocen como iones Zundel y Eigen en honor a sus descubridores. En la Figura 34 se representa gráficamente el proceso de difusión estructurada.

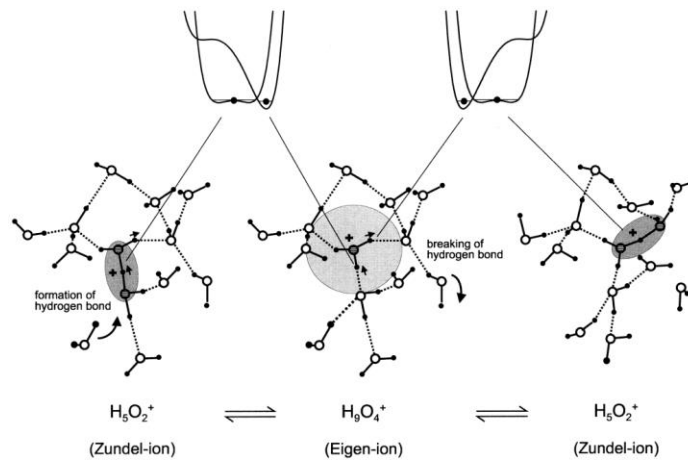


Figura 34.- Representación gráfica del proceso de difusión estructurada

La primera reacción que se lleva a cabo en la difusión estructurada es la formación del ion hidronio (H_3O^+) al hacer interacción el protón liberado en el ánodo y el agua que humedece la membrana, tal como se muestra en la Ecuación 1. A partir de ese momento el ion hidronio se favorece de los puentes de hidrógeno presentes en agua y se une a una molécula de agua para formar un ion Zundel ($H_5O_2^+$) tal como se muestra en la Ecuación 2. Una vez formado el ion Zundel, la interacción de los puentes de hidrógeno con este ion provocan la formación del ion Eigen al agregar dos nuevas moléculas de agua a su estructura de acuerdo a la Ecuación 3. A partir de este momento el ion Eigen se descompone liberando dos moléculas de agua y un nuevo ion Zundel (Ecuación 4), permitiendo el avance de la carga eléctrica en su trayecto hacia el cátodo. El proceso entre los iones Zundel y Eigen se repiten continuamente, tal como fue representado anteriormente en la Figura 34, hasta que la carga eléctrica logra llegar al cátodo. Al final de su trayecto, el último ion Zundel se descompone, liberando una molécula de agua y un ion hidronio (Ecuación 5). Finalmente el último ion hidronio libera un protón en el cátodo de la celda de combustible (Ecuación 6). En un electrolizador, el proceso es exactamente el mismo pero en dirección inversa.



Tal como se pudo apreciar, el proceso de difusión estructurada es complejo y en cada uno de sus pasos depende totalmente de las moléculas de agua y los puentes de hidrógeno entre ellas, así como los iones sulfito de la membrana que favorecen el avance de las cargas desde el ánodo hasta el cátodo. Por lo tanto, si se pierden los puentes de hidrógeno por efecto del cambio de fase, se interrumpe completamente el proceso de transferencia de carga.

Por otro lado, el incremento de la temperatura en una celda de combustible o en un electrolizador favorece a la cinética de las reacciones químicas y a su vez a la generación de energía eléctrica o producción de hidrógeno, según sea el caso. Es precisamente esa la razón de realizar una investigación que muestre los efectos en la eficiencia de un electrolizador PEM al suministrarle agua caliente sin comprometer sus principios de funcionamiento electroquímico.

CAPITULO III
METODOLOGÍA

La metodología a seguir para la resolución de la problemática consta de los siguientes pasos:

- Definición del sistema
- Método de cálculo
- Formulación del modelo matemático
- Implementación del modelo matemático en software de simulación
- Verificación y validación
- Experimentación
- Recolección y procesamiento de datos de simulación
- Interpretación de resultados
- Validación de las hipótesis
- Conclusiones

A continuación se hará la descripción de cada una de las etapas de la metodología.

Definición del sistema

El sistema solar-hidrógeno que será sometido a simulación para la validación de las hipótesis es el mostrado en la Figura 35.

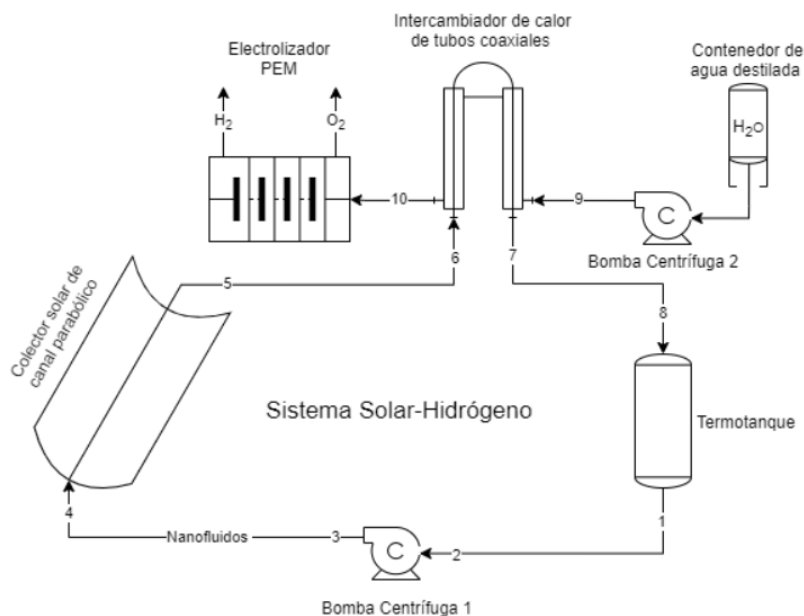


Figura 35.-Diagrama del sistema solar-hidrógeno

El sistema solar-hidrógeno consta de un circuito cerrado por donde se recirculan los nanofluidos y un circuito abierto por donde se alimenta con agua caliente al electrolizador. Para hacer el intercambio de calor entre los nanofluidos y el agua se utilizará un intercambiador de calor de tubos coaxiales. Los fluidos se harán recircular con 2 bombas centrifugas de baja potencia, una para cada circuito. Por otro lado, el colector solar utilizado será de canal parabólico de tubo evacuado. Finalmente, el generador de hidrógeno utilizado será un electrolizador tipo PEM.

Clasificación del sistema

De acuerdo a la naturaleza del sistema, éste será considerado como determinístico. Es decir, el sistema no contiene ningún elemento, parámetro o variable que sea aleatoria. De acuerdo a esta clasificación, todas las variables de salida e internas quedan perfectamente determinadas al especificar las variables de entrada, los parámetros y las variables de estado. Es decir, las relaciones funcionales entre las variables del sistema están perfectamente definidas. Además, el sistema puede considerarse a su vez como continuo. Con la finalidad de conocer el efecto de la concentración de las nanopartículas en el rendimiento del colector solar, esta variable tendrá un cambio continuo en un margen definido. Es decir, la variable no presentará pasos discretos en el margen establecido, sino un avance continuo. Finalmente, el desarrollo del modelo matemático se desarrollará en estado estacionario. Es decir, el análisis del sistema será independiente del tiempo.

Modos de simulación

Los modos de simulación necesarios para generar la información que pueda validar o refutar las hipótesis planteadas en esta investigación son dos, el modo análisis y el modo diseño. El modo análisis es una de las modalidades más empleadas, en él las variables de salida del modelo representan a las variables de salida del sistema real. Debido a que imita un sistema que realmente funciona, el modelo es matemáticamente más estable y se asegura la existencia de una solución. Es por esta razón que el modo análisis será utilizado para evaluar el rendimiento del colector solar y el rendimiento del electrolizador tipo PEM. Por otro lado, en el modo diseño las salidas del modelo matemático representan a los parámetros del sistema real. Esta modalidad se utiliza cuando el problema es

determinar los parámetros para los cuales el sistema producirá las salidas deseadas para las variables de entrada especificadas. La modalidad de diseño será utilizada para determinar el efecto de los nanofluidos en la longitud necesaria para el intercambiador de calor de tubos coaxiales.

Materiales

Los materiales utilizados para este estudio y cualquier análisis termodinámico son pieza clave en el rendimiento de los equipos y del sistema en general. Es por esta razón que serán considerados los materiales adecuados para cada una de las aplicaciones. A continuación se mostrará una lista de los materiales y fluidos empleados en cada una de los componentes del sistema.

Colector solar:

- Tubo receptor: Acero inoxidable (AISI 316)
- Cubierta de vidrio: Borosilicato
- Fluido de referencia: Agua destilada
- Fluido de estudio: nanofluidos

Intercambiador de calor de tubos coaxiales:

- Tubo externo: Cobre
- Tubo interno: Cobre
- Aislamiento: Caucho nitrilo

Electrolizador tipo PEM

- Electrodo: Cobre
- Placas bipolar: Grafito
- Catalizador del ánodo/cátodo: Platino
- Membrana/electrolito sólido: membrana de ácido perfluorosulfónico (Nafion™)
- Fluido de entrada: Agua destilada

Nanofluidos

- Fluido base: Mezcla de etilenglicol/agua destilada

- Nanopartículas: óxido de aluminio (Al_2O_3), dióxido de silicio (SiO_2), óxido de zinc (ZnO), Grafeno (G), cobre (Cu)
- Agente tensoactivo (surfactante): sulfato de sodio decahidratado, grado reactivo al 97%

Método de cálculo del sistema solar-hidrógeno

El método de cálculo es extenso y complejo. Por esta razón, se hará una división de 9 pasos a seguir para obtener los resultados deseados y lograr la evaluación de cada una de las hipótesis y la elaboración de las conclusiones. En la Figura 36 se muestran los 9 pasos del método de cálculo del sistema solar-hidrógeno.

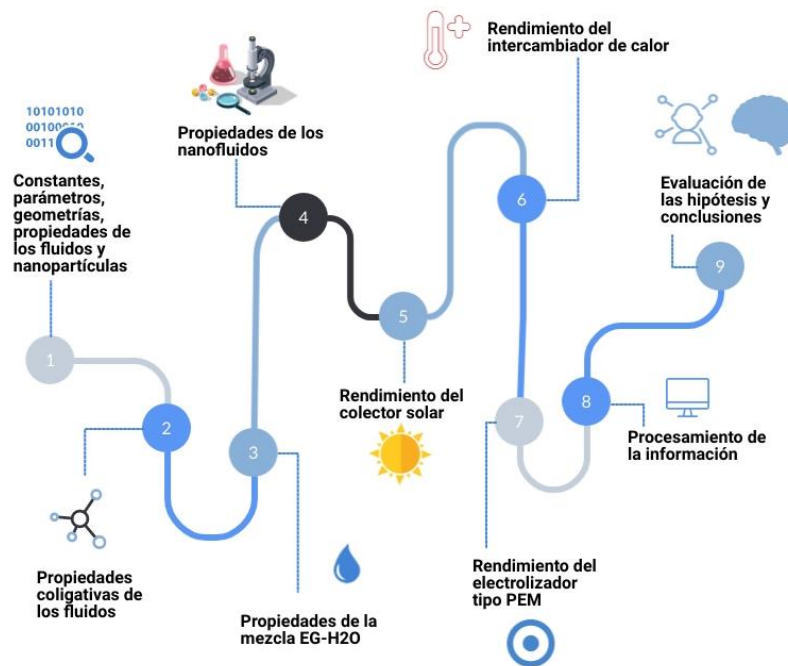


Figura 36.- Método de cálculo del sistema solar-hidrógeno

El paso numero 1 consiste en recopilar toda la información acerca de los fluidos y nanopartículas que estarán presentes en el sistema, como sus propiedades termodinámicas, morfología, etc. Así mismo, se hará una recolección de parámetros geométricos del colector solar, el intercambiador de calor y el electrolizador tipo PEM.

Una vez recolectada toda la información de los fluidos, en el paso 2 se inicia el proceso de cálculo obteniendo las propiedades coligativas de la mezcla de etilenglicol-agua con la finalidad de obtener la proporción adecuada de cada uno de los dos fluidos. A la salida del colector solar se pueden esperar temperaturas por encima de los 100 °C. Si el fluido llega a cambiar de fase dentro o a la salida del colector solar, las nanopartículas se sedimentarán, estropeando el nanofluido. Una manera de proteger al nanofluido del cambio de fase es incrementar el punto ebulloscópico del agua al mezclarlo con etilenglicol.

Al tomarse la decisión de cuál es la mezcla etilenglicol-agua adecuada, en el paso 3 se calculan las propiedades termodinámicas de esa mezcla. Esas propiedades cambian en función de la temperatura. Por esa razón, en este paso se evalúan las propiedades de la mezcla de acuerdo al rango de temperaturas de operación del colector solar. Estos valores serán considerados como las propiedades del fluido base y se utilizarán en el siguiente paso para determinar las propiedades de los nanofluidos.

En el paso 4 se retoman las propiedades de las nanopartículas definidas en el paso 1 y las propiedades del fluido base del paso 3 para determinar las propiedades de los nanofluidos. Estos valores dependen de la concentración de las nanopartículas. En este paso se hará una base de datos con la variación de la concentración entre 0.1%Vol y 0.5%Vol para evaluar el efecto que tiene la concentración de nanopartículas en el rendimiento del colector solar, en el intercambiador de calor y finalmente en la producción de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM.

El rendimiento del colector solar se evalúa en el paso 5. En este paso se utilizan las propiedades de los 5 tipos de nanofluidos considerados para este estudio. Finalmente, se evalúa con cuál de los diferentes nanofluidos se logra obtener la temperatura más alta a la salida del colector solar.

En el paso 6, las temperaturas de salida del colector solar son consideradas como la temperatura de entrada del fluido caliente al intercambiador de calor de tubos coaxiales. De igual manera, en la otra sección del intercambiador de calor se considera una temperatura constante en la entrada del agua como fluido frío. Al terminar este análisis se obtienen las temperaturas de salida,

tanto de los nanofluidos como del agua. Los nanofluidos toman una dirección hacia el termotanque y el agua caliente hacia la entrada de agua en el electrolizador tipo PEM.

El rendimiento del electrolizador se ve afectado directamente por la temperatura del agua. En el paso 7 se considera como temperatura de entrada del agua al electrolizador, la temperatura de salida del agua del intercambiador de calor para evaluar su rendimiento. Las dos variables de salida más importantes de este análisis son el voltaje del electrolizador y la producción de hidrógeno.

El procesamiento de la información del paso 8 se realiza para documentar todo el proceso de cálculo, así como bases de datos, gráficas y tablas que puedan ser utilizadas en futuras investigaciones de aplicaciones de los nanofluidos. Finalmente, tomando como evidencia la información procesada en el paso 8, se evalúan las hipótesis planteadas para validarlas o refutarlas en el paso 9.

Formulación del modelo matemático

A continuación se mostrará el modelo matemático, los parámetros geométricos de cada uno de los equipos, constantes y propiedades intrínsecas de los materiales y fluidos mencionados anteriormente, tal como se planteó en el paso 1 del método de cálculo. En la Tabla 1 se muestran las propiedades termodinámicas de las nanopartículas, así como su diámetro (considerando que todas las nanopartículas tienen morfología esférica).

Tabla 1.- Propiedades termodinámicas de las nanopartículas.

Material de las nanopartículas	$C_{p_{np}} \left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$	$\rho_{np} \left[\frac{kg}{m^3} \right]$	$k_{np} \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$	$d_{np} [nm]$
Al_2O_3	765	3970	40	50
SiO_2	703	2200	1	15
ZnO	495.2	5600	13	50
G	790	2200	5000	100
Cu	385	8940	401	25

En la Tabla 2 se muestran las constantes necesarias para el cálculo de las propiedades coligativas del agua.

Tabla 2.- Constantes para el cálculo de propiedades coligativas del agua.

Constante	Valor
Punto ebulloscópico en estado estándar	$T_{eb}^o = 100 \text{ }^\circ\text{C}$
Punto crioscópico en estado estándar	$T_{cr}^o = 0 \text{ }^\circ\text{C}$
Masa molar del etilenglicol	$Mm_{eg} = 62.07 \frac{gr}{mol}$
Constante ebulloscópica del agua	$k_{eb} = 0.52 \frac{^\circ\text{C} \cdot kg}{mol}$
Constante crioscópica del agua	$k_{cr} = 1.86 \frac{^\circ\text{C} \cdot kg}{mol}$

En la Tabla 3 se muestran los parámetros referentes a la geometría y propiedades ópticas del colector solar de canal parabólico.

Tabla 3.- Parámetros geométricos y ópticos del colector solar de canal parabólico.

Constante	Valor
Ancho y largo del colector	1.5/3 (m)
Diámetro interno/externo del receptor	0.038/0.04 (m)
Diámetro interno/externo de la cubierta	0.063/0.0665 (m)
Emitancia de la cubierta	0.88
Emitancia del receptor	0.17
Transmitancia de la cubierta	0.96
Reflectancia de la cubierta	0.93
Factor de intercepción	0.95
Absorbancia del receptor	0.96
Número de colectores	1
Emitancia térmica	0.95
Presión/temperatura ambiente	101.3 (kPa)/25 ($^\circ\text{C}$)

En la Tabla 4 se muestran las constantes y los parámetros necesarios para la resolución del modelo matemático del electrolizador tipo PEM.

Tabla 4.- Constantes y parámetros del electrolizador tipo PEM

Constante/Parámetro	Valor
Constante de Faraday (F)	$96\,485 \left(\frac{C}{mol}\right)$
Grosor de la membrana (δ_{mem})	0.183 (mm)
Constante universal de los gases (R)	$8.314 \left(\frac{J}{mol \cdot K}\right)$
Densidad de corriente en el ánodo/cátodo ($I_{0_{an}}/I_{0_{cat}}$)	$10/10 \left(\frac{A}{cm^2}\right)$
Presión del hidrógeno/oxígeno/agua ($P_{H_2}/P_{O_2}/P_{H_2O}$)	10/10/10 (bar)
LHV del hidrógeno	$224 \left(\frac{kJ}{mol}\right)$
Resistencia de los electrodos (R_{el})	$10.6 \times 10^{-6} (\Omega)$
Resistencia específica del ánodo (ρ_{eff}^{an})	$43.1 \times 10^{-6} (\Omega \text{ cm})$
Resistencia específica del cátodo (ρ_{eff}^{cat})	$16 \times 10^{-3} (\Omega \text{ cm})$
Contenido de membranas (λ)	22
Área de la superficie de la membrana (A)	160 (cm ²)
Potencia	100 (W)

Al concluir con la definición de constantes, parámetros, geometrías, propiedades de los fluidos y las nanopartículas se ha logrado el objetivo del punto 1 del método de cálculo del sistema solar-hidrógeno.

Propiedades coligativas de los fluidos

En esta etapa del cálculo se desea obtener la proporción adecuada de la mezcla de agua y etilenglicol. Para lograr ese objetivo se llevará a cabo un análisis del comportamiento del incremento ebulloscópico y decremento crioscópico del agua. Se desea incrementar por lo menos 30°C el punto ebulloscópico del agua para garantizar que los nanofluidos no cambiarán de fase dentro o a la salida

del colector solar. Si esto pasara, las nanopartículas se sedimentarían y el nanofluido perdería sus propiedades térmicas. El modelo matemático que describe el comportamiento de las propiedades coligativas del agua se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5.- Ecuaciones de las propiedades coligativas del agua

Parámetro	Ecuación	Ec. #
Concentración de etilenglicol	$\Phi_{eg} = 1 - \Phi_{H_2O}$	(1)
Masa de etilenglicol	$m_{eg} = V_{eg} \cdot \rho_{EG}$	(2)
Masa de agua	$m_{H_2O} = V_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}$	(3)
Número de moles	$n = \frac{m_{eg}}{Mm_{eg}}$	(4)
Molalidad	$m = \frac{n}{m_{H_2O}}$	(5)
Incremento del punto ebulloscópico	$\Delta T_{eb} = k_{eb} \cdot m$	(6)
Temperatura Ebulloscópica	$T_{eb} = T_{eb}^o + \Delta T_{eb}$	(7)
Decremento del punto crioscópico	$\Delta T_{cr} = k_{cr} \cdot m$	(8)
Temperatura Crioscópica	$T_{cr} = T_{cr}^o - \Delta T_{cr}$	(9)

La Tabla 5 se complementa con la Tabla 2, donde se muestran todas las constantes que dan solución a las 9 ecuaciones de las propiedades coligativas del agua. A continuación se hará una descripción del método de solución de dichas ecuaciones. En primer lugar, se parte de la suposición de que las concentraciones entre el etilenglicol y el agua son complementarias, es decir, que la suma de ambas concentraciones siempre será la unidad o el 100% del fluido (Ec. 1). Tomando esa consideración, se hace el cálculo del volumen correspondiente a la concentración de etilenglicol, es decir, si la concentración es del 25%, el volumen de etilenglicol será de 0.25 litros por cada litro de mezcla y así sucesivamente. En la ecuación 2 se retoma el volumen de etilenglicol antes mencionado y la densidad del etilenglicol para calcular la masa de etilenglicol presente en la mezcla. Se realiza exactamente el mismo cálculo para calcular la masa de agua presente en la mezcla y se da solución a la ecuación 3. Tanto el incremento ebulloscópico, como del decremento crioscópico son directamente

proporcionales de la molalidad de la mezcla (Ecuaciones 6 y 8). Es decir, las propiedades coligativas del agua se ven afectadas directamente por el número de partículas disueltas o suspendidas en el fluido. Estas propiedades son totalmente independientes de la naturaleza, el tamaño o la morfología de las partículas. Es por esta razón que es necesario calcular el número de moles de etilenglicol disueltos en el agua, con la ecuación 4 y la molalidad de esta solución con la ecuación 5. Una vez conocida la molalidad de la solución, se puede retomar la constante ebulloscópica y crioscópica del agua de la Tabla 2 y dar solución a las ecuaciones 6 y 8, correspondientes al incremento ebulloscópico y decremento crioscópico. De manera similar, se retoma el punto ebulloscópico y crioscópico en estado estándar de la Tabla 2 para dar solución a las ecuaciones 7 y 9 para conocer la temperatura de ebullición y congelación de la mezcla, es decir, el punto ebulloscópico y crioscópico, respectivamente.

El arreglo de esas 9 ecuaciones de las propiedades coligativas permite conocer la temperatura de ebullición y congelamiento de la mezcla etilenglicol-agua con solo variar la concentración de etilenglicol. A manera de experimentación, se pretende variar la concentración del etilenglicol en el simulador entre 0 y 100% de concentración para encontrar la mezcla que proporcione por lo menos un aumento de 30 °C al punto ebulloscópico y tomar esa concentración como punto de partida en la síntesis de los nanofluidos en los puntos 3 y 4 del método de cálculo del sistema (Figura 36).

Propiedades de la mezcla etilenglicol-agua

Tanto el etilenglicol como el agua tienen propiedades termodinámicas totalmente distintas, como la densidad, calor específico, conductividad térmica, viscosidad, etc. Es de esperarse que al hacer una mezcla entre ambos fluidos, surgirán nuevas propiedades termodinámicas. Algunas propiedades dependen de la concentración volumétrica de los fluidos en la mezcla como lo es la densidad, y otras son propiedades dependientes de la concentración másica de las sustancias como el calor específico, la conductividad térmica y la viscosidad. Es por esta razón que se emplearán algunas ecuaciones de conversión de concentraciones para poder obtener todas las propiedades termodinámicas de la mezcla. En la Tabla 6 se muestra el modelo matemático que permite obtener las propiedades de la mezcla etilenglicol-agua, es decir, el fluido base de los nanofluidos.

Tabla 6.- Propiedades de la mezcla etilenglicol-agua (fluido base)

Parámetro/variable	Ecuación	Ec. #
Densidad del fluido base	$\rho_{bf} = \rho_{eg} \cdot \Phi_{eg} + \rho_{H_2O} \cdot \Phi_{H_2O}$	(10)
Fracción másica de etilenglicol	$\Phi_{m_{eg}} = \rho_{eg} \cdot \left[\frac{\Phi_{eg}}{\rho_{eg} \cdot \Phi_{eg} + \rho_{H_2O} \cdot \Phi_{H_2O}} \right]$	(11)
Fracción másica de agua	$\Phi_{m_{H_2O}} = \rho_{H_2O} \cdot \left[\frac{\Phi_{H_2O}}{\rho_{eg} \cdot \Phi_{eg} + \rho_{H_2O} \cdot \Phi_{H_2O}} \right]$	(12)
Calor específico del fluido base a presión constante	$Cp_{bf} = \frac{Cp_{eg} \cdot \Phi_{eg} \cdot \rho_{eg} + Cp_{H_2O} \cdot \Phi_{H_2O} \cdot \rho_{H_2O}}{\rho_{bf}}$	(13)
Conductividad térmica del fluido base	$k_{bf} = \Phi_{m_{eg}} \cdot k_{eg} + \Phi_{m_{H_2O}} \cdot k_{H_2O} - 0.72 \cdot \Phi_{m_{eg}} \cdot \Phi_{m_{H_2O}} \cdot (k_{H_2O} - k_{eg})$	(14)
Viscosidad dinámica del fluido base	$\mu_{bf} = \Phi_{m_{eg}} \cdot \mu_{eg} + \Phi_{m_{H_2O}} \cdot \mu_{H_2O}$	(15)
Densidad del fluido base en estado estándar	$\rho^o_{bf} = \rho^o_{eg} \cdot \Phi_{eg} + \rho^o_{H_2O} \cdot \Phi_{H_2O}$	(16)
Diámetro de abultamiento del fluido base	$d_{bf} = \left[\frac{6 \cdot (Mm_{eg} + Mm_{H_2O})}{6.022 \times 10^{26} \cdot \pi \cdot \rho^o_{bf}} \right]^{\frac{1}{3}}$	(17)
Número de Prandtl del fluido base	$Pr_{bf} = \frac{Cp_{bf} \cdot \mu_{bf}}{k_{bf}}$	(18)

El aporte que tiene la densidad de cada uno de los fluidos en el fluido base es el punto de partida de este modelo matemático. De igual manera, se toma en consideración la concentración volumétrica de cada una de las sustancias para obtener la densidad del fluido base en la ecuación 10. Cada uno de los parámetros y variables de esta ecuación se repiten constantemente a lo largo del modelo matemático. Es por esta razón que es de suma importancia que estos sean bien definidos al inicio del cálculo. Todas las propiedades termodinámicas mencionadas anteriormente son dependientes de la temperatura del fluido y no tienen un comportamiento lineal. Esa es una de las razones por las que se emplea la simulación en software especializado en la resolución de ecuaciones que cuentan con una base de datos con todas las propiedades termodinámicas de distintos fluidos en función de la temperatura.

Tal como se mencionó anteriormente, otro factor importante es la fracción másica de cada una de las sustancias. Para obtener sus valores se emplean las ecuaciones 11 y 12. Una vez obtenida la fracción másica de las sustancias, se utilizan estos valores para conocer las propiedades del fluido base, como el calor específico, conductividad térmica y la viscosidad dinámica del fluido, con las ecuaciones 13, 14 y 15. La ecuación 18 requiere que se calculen con anterioridad las ecuaciones 13, 14 y 15 para obtener el número de Prandtl del fluido base.

En la Tabla 6 también se incluyen parámetros que serán necesarios para obtener las propiedades termodinámicas de los nanofluidos, como la densidad del fluido base en condiciones estándar (a una temperatura de 25 °C y una presión de 1 atm) y el diámetro de abultamiento del fluido base. En cualquier fluido, las partículas o moléculas que lo componen tienden a hacer abultamientos, ya sea por efecto electrostático, fuerzas de Van Der Waals, dipolos, etc. La ecuación 17 permite calcular el diámetro de ese abultamiento de partículas. Para poder dar solución a esta ecuación es necesario resolver antes la densidad del fluido base en condiciones estándar (ecuación 16) y retomar la información de los fluidos de la Tabla 2. Con la resolución de estas ecuaciones se obtienen todas las propiedades termodinámicas del fluido base, las cuales servirán como punto de partida del punto 4 del método de cálculo del sistema solar hidrógeno, donde se obtienen las propiedades termodinámicas de los nanofluidos. El proceso de resolución de ecuaciones del punto 4 es muy similar al realizado anteriormente.

Propiedades termodinámicas de los nanofluidos

El modelo matemático que define las propiedades termodinámicas de los nanofluidos es relativamente sencillo. Este modelo matemático se muestra en la Tabla 7. En estas ecuaciones se retoman las propiedades termodinámicas del fluido base y las propiedades de las nanopartículas de la Tabla 1. Con estas propiedades se realizará un estudio paramétrico, variando la concentración de nanopartículas en el nanofluido entre 0.1 y 0.5%Vol, para analizar el efecto de las nanopartículas en las propiedades termodinámicas del nanofluido.

Tabla 7.- Modelo matemático que define las propiedades termodinámicas de los nanofluidos

Parámetro	Ecuación	Ec. #
Número de Reynolds de la nanopartícula	$Re_{np} = \frac{2 \cdot \rho_{bf} \cdot k_b \cdot T_{bf}}{\pi \cdot \mu_{bf}^2 \cdot d_{np}}$	(19)
Densidad del nanofluido	$\rho_{nf} = \Phi_{np} \cdot \rho_{np} + (1 - \Phi_{np}) \cdot \rho_{bf}$	(20)
Calor específico del nanofluido a presión constante	$Cp_{nf} = \frac{\Phi_{np} \cdot Cp_{np} \cdot \rho_{np} + (1 - \Phi_{np}) \cdot Cp_{bf} \cdot \rho_{bf}}{\rho_{nf}}$	(21)
Viscosidad dinámica del nanofluido	$\mu_{nf} = \mu_{bf} \cdot \left[\frac{1}{1 - 34.87 \cdot \left(\frac{d_{np}}{d_{bf}}\right)^{-0.3} \cdot \Phi_{np}^{1.03}} \right]$	(22)
Conductividad térmica del nanofluido	$k_{nf} = k_{bf} \cdot [1 + 4.4 \cdot Re_{np}^{0.4} \cdot Pr_{bf}^{0.66} \cdot \left(\frac{T_{bfK}}{T_{crK}}\right)^{10} \cdot \left(\frac{k_{np}}{k_{bf}}\right)^{0.03} \cdot \Phi_{np}^{0.66}]$	(23)
Número de Prandtl del nanofluido	$Pr_{nf} = \frac{Cp_{nf} \cdot \mu_{nf}}{k_{nf}}$	(24)
Viscosidad cinemática del nanofluido	$\nu_{nf} = \frac{\mu_{nf}}{\rho_{nf}}$	(25)

En este modelo matemático se parte del cálculo del número de Reynolds de la nanopartícula, un parámetro necesario en el cálculo de la conductividad térmica del nanofluido. Entre más pequeñas son las nanopartículas, su facilidad de movimiento incrementa. Su peso es tan pequeño que el efecto de la gravedad en ellas se iguala a la presión hidrostática del fluido, provocando que las nanopartículas se mantengan suspendidas y libres de movimiento. A esta escala las nanopartículas presentan un movimiento aleatorio llamado movimiento Browniano. Entre más pequeñas las partículas, mayor es el número de micro-estados posibles para la posición de las nanopartículas, es decir, la entropía del sistema incrementa. Este incremento en la entropía del sistema provoca a su vez el incremento del movimiento Browniano, la interacción entre nanopartículas y la turbulencia de estas mismas. Un indicador de la turbulencia de las nanopartículas es el número de Reynolds, el cual se obtiene de la ecuación 19. Para dar solución a esta ecuación es necesario retomar las propiedades del fluido base, así como el tamaño de las nanopartículas y la constante de Boltzmann (1.38×10^{-23} J/K).

Las ecuaciones 20 y 21 tienen un comportamiento idéntico a las ecuaciones 10 y 13, donde se calcula la densidad y el calor específico del nanofluido en función de la concentración de nanopartículas. Para resolverlas se utilizan las propiedades del fluido base, las propiedades de las nanopartículas y la concentración de nanopartículas se variará de acuerdo al estudio paramétrico mencionado anteriormente. Para dar solución a la ecuación 22 se retoma el valor obtenido en la ecuación 17, correspondiente al diámetro del abultamiento del fluido base, el diámetro de las nanopartículas y la viscosidad del fluido base para obtener la viscosidad del nanofluido. De igual manera, la concentración de las nanopartículas se obtendrá del estudio paramétrico.

Uno de los parámetros más importantes de este modelo matemático es la conductividad térmica del nanofluido. Para poder calcular su valor hay que calcular previamente algunas propiedades del fluido base, como la conductividad térmica (Ec.14), el número de Reynolds de las nanopartículas (Ec. 19), el número de Prandtl del fluido base (Ec. 18), la temperatura del fluido y la temperatura crioscópica del fluido en escala absoluta, y retomar parámetros como la conductividad térmica de las nanopartículas y su concentración (Tabla 1). De todas las propiedades de los nanofluidos, la más compleja de calcular es la conductividad térmica debido a todos los parámetros y ecuaciones que deben ser resueltas previamente a su cálculo.

La ecuación 28 tiene un comportamiento idéntico a la ecuación 24, donde se calcula el número de Prandtl, en esta ocasión se calcula esta propiedad para los nanofluidos, retomando los valores de las ecuaciones 21, 22 y 23, correspondientes al calor específico, viscosidad dinámica y conductividad térmica del nanofluido, respectivamente.

Finalmente, la ecuación 25 es utilizada para obtener la viscosidad cinemática del nanofluido, retomando los valores de las ecuaciones 20 y 22, correspondientes a la viscosidad dinámica y la densidad del nanofluido, respectivamente. Todas estas ecuaciones serán utilizadas para analizar el rendimiento de colector solar de canal parabólico y el intercambiador de calor de tubos coaxiales. Las propiedades de los nanofluidos son dependientes de la temperatura del fluido. En los equipos mencionados anteriormente el rango de temperaturas entre la entrada y la salida del fluido es muy alto, y además, hay variables desconocidas como la temperatura de salida del colector solar o la

temperatura de entrada del intercambiador de calor. Por esta razón, se vuelve imposible determinar una temperatura promedio a la cual se calculen las propiedades termodinámicas de los nanofluidos. Una manera de solucionar esta problemática es iniciar un proceso de iteraciones, es decir, en un primer cálculo asumir que el colector llegará a una determinada temperatura, se calcula la temperatura media y las propiedades de los nanofluidos a esa temperatura. Con esas propiedades de los nanofluidos se resuelven las ecuaciones que gobiernan el rendimiento del colector solar de canal parabólico. Al final del cálculo se llegará a una temperatura de salida del colector solar, se hace una comparación entre esa temperatura de salida y la temperatura asumida inicialmente. En caso de ser iguales, se continúa con el proceso de cálculo, y en caso de ser diferentes, se toma la temperatura calculada como la nueva temperatura asumida y el proceso se repite cuantas veces sean necesarias hasta que la temperatura asumida sea igual a la temperatura de salida del colector solar. Debido al alto número de variables, parámetros, ecuaciones e iteraciones, este proceso se realiza por medio de software especializado en la resolución de ecuaciones simultáneas como el programa Engineering Equation Solver (EES).

Rendimiento del colector solar de canal parabólico

En este apartado se establecerá el modelo matemático que define el rendimiento de un colector solar de canal parabólico. Para iniciar con el análisis es necesario retomar los parámetros geométricos del colector solar definidos en la Tabla 3 y mostrados gráficamente en la Figura 37.

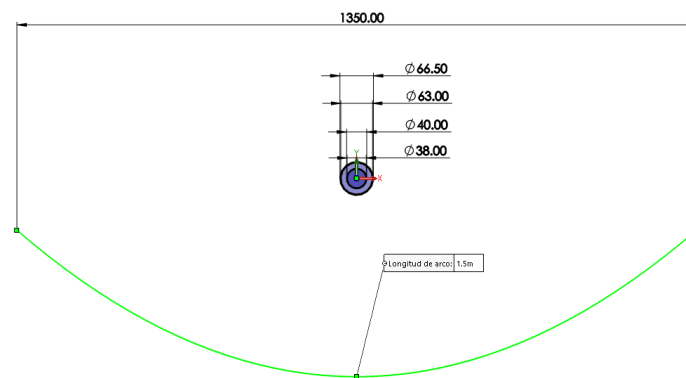


Figura 37.- Geometría del colector solar de canal parabólico.

El colector solar consta de 3 partes esenciales: la lámina reflectora, la cubierta de borosilicato y el tubo receptor. En la Figura 38 se muestra una representación gráfica del colector solar de canal parabólico, manteniendo las proporciones exactas de la geometría propuesta. De igual manera, en la Figura 39 se muestra una ampliación a la sección del tubo receptor y la cubierta de vidrio. El tubo receptor será considerado con una pintura color negro mate en su cara externa para maximizar su absorción de radiación y minimizar las pérdidas por reflejo de radiación.



Figura 38.- Representación gráfica del colector solar de canal parabólico.

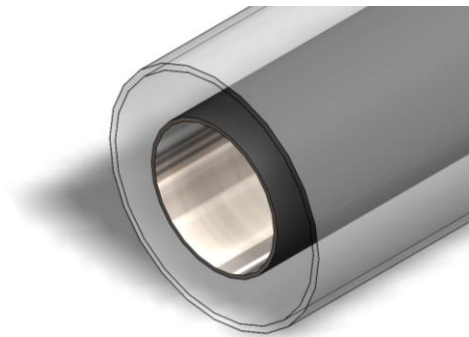


Figura 39.- Ampliación a la sección del tubo receptor y la cubierta de borosilicato.

Una vez definida y analizada la geometría, se procede a analizar los fenómenos de transferencia de calor presentes en la sección de la cubierta y el tubo receptor, es decir, la sección mostrada anteriormente en la Figura 39. La sección entre el tubo receptor y la cubierta de vidrio será considerada al vacío para evitar las pérdidas por conducción o convección en esa sección. En la Figura 40 se muestran gráficamente las ganancias y pérdidas de calor que serán consideradas en el modelo

matemático. Las pérdidas por convección, radiación y conducción se muestran en color naranja y las ganancias de calor por radiación, provenientes de la lamina reflectora, se muestran en color rojo.

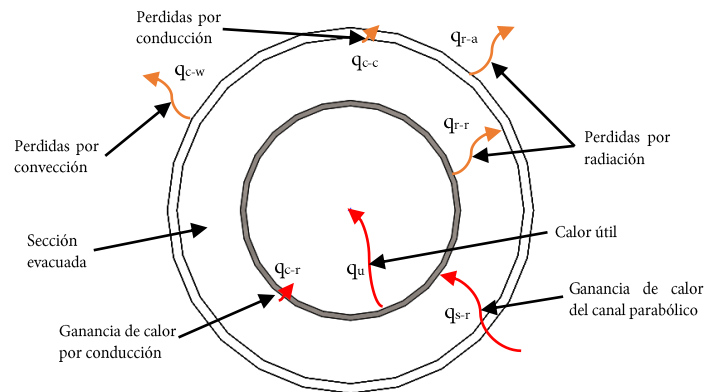


Figura 40.- Ganancias y pérdidas de calor en la sección del tubo receptor y la cubierta de vidrio.

La Figura 41 muestra el circuito de resistencia térmica que caracteriza al tubo receptor y su cubierta. De igual manera en esta figura se muestra el balance de energía térmica del colector solar de canal parabólico.

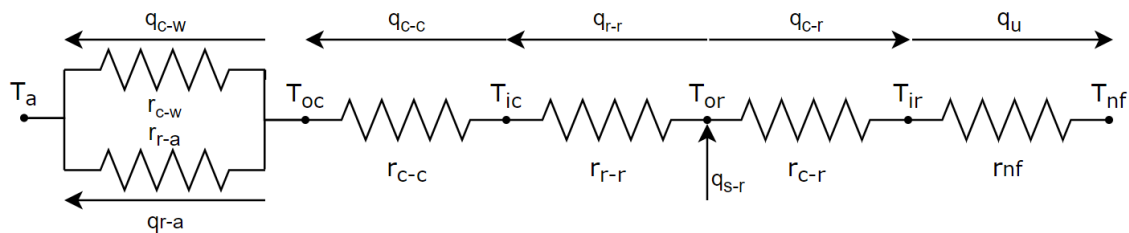


Figura 41.- Circuito de resistencia térmica característico del colector solar de canal parabólico con cubierta al vacío.

De acuerdo al balance de energía mostrado en la figura anterior, se establece un modelo matemático que describe el rendimiento del colector solar de canal parabólico. En él se calcula el calor útil, el coeficiente global de pérdidas de calor, los coeficientes convectivos, la eficiencia óptica, entre otros. En la Tabla 8 se muestra una recopilación de 16 ecuaciones que describen el rendimiento del colector solar de canal parabólico. Estas ecuaciones deberán resolverse para obtener la temperatura de los nanofluidos a la salida del colector solar. Tal como se mencionó en la sección anterior, estas ecuaciones requieren de un proceso de iteración para poder ser resueltas.

Tabla 8.- Modelo matemático del rendimiento del colector solar de canal parabólico

Parámetro	Ecuación	Ec. #
Calor útil obtenido en el tubo absorbedor	$Q_u = \dot{m}_r \cdot C p_{nf_r} \cdot (T_{in_r} - T_{out_r})$	(26)
Calor útil obtenido en el colector solar de canal parabólico	$Q_u = A_{ap} \cdot F_R \cdot \left(S - \frac{A_r}{A_{ap}} \cdot U_L \cdot (T_{in_r} - T_a) \right)$	(27)
Radiación solar absorbida	$S = G_b \cdot \eta_r$	(28)
Eficiencia óptica del receptor	$\eta_r = \rho \cdot \gamma \cdot \tau \cdot \alpha \cdot K$	(29)
Factor de remoción de calor	$F_R = \frac{\dot{m}_r \cdot C p_{nf_r}}{A_r \cdot U_L} \cdot \left(1 - \exp \left(\frac{-A_r \cdot U_L \cdot F'}{\dot{m}_r \cdot C p_{nf_r}} \right) \right)$	(30)
Factor de eficiencia convectiva	$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_L} + \frac{D_{r_o}}{D_{r_i}} \cdot \frac{1}{h_{f_i}} + \frac{D_{r_o}}{2 \cdot k_r} \cdot \ln \left(\frac{D_{r_o}}{D_{r_i}} \right)}$	(31)
Coefficiente convectivo en el interior del tubo receptor	$h_{f_i} = \frac{Nu_{nf_r} \cdot k_{nf_r}}{D_{r_i}}$	(32)
Numero de Nusselt del tubo receptor	$Nu_{nf_r} = 0.023 \cdot Re_{nf_r}^{0.8} \cdot Pr_{nf_r}^{0.4}$	(33)
Coefficiente global de pérdidas de calor	$U_L = \left[\frac{A_r}{(h_w + h_{r_{c-a}}) \cdot A_c} + \frac{1}{h_{r_{r-c}}} \right]^{-1}$	(34)
Coefficiente de radiación entre la cubierta y el ambiente	$h_{r_{c-a}} = \varepsilon_c \cdot \sigma \cdot (T_c + T_r) \cdot (T_c^2 + T_r^2)$	(35)
Coefficiente de radiación entre el receptor y la cubierta	$h_{r_{r-c}} = \frac{\sigma \cdot (T_c + T_r) \cdot (T_c^2 + T_r^2)}{\frac{1}{\varepsilon_c} + \frac{A_r}{A_c} \cdot \left(\frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right)}$	(36)
Coefficiente convectivo por efecto del viento	$h_w = \frac{Nu_{air} \cdot k_{air}}{D_{out_c}}$	(37)
Temperatura de la cubierta de vidrio	$T_c = \frac{A_r \cdot h_{r_{r-c}} \cdot T_r + A_c \cdot (h_{r_{c-a}} + h_w) \cdot T_a}{A_r \cdot h_{r_{r-c}} + A_c \cdot (h_{r_{c-a}} + h_w)}$	(38)
Número de Nuselt de pérdidas de calor por efecto del viento	$Nu_{air} = 0.4 + 0.54 \cdot Re_{air}^{0.52} \quad 0.1 < Re_{air} < 1000$ $Nu_{air} = 0.3 \cdot Re_{air}^{0.6} \quad 1000 < Re_{air} < 50\,000$	(39)
Energía solar total recibida	$Q_{solar} = A_{ap} \cdot F_r \cdot S \cdot N$	(40)
Área de apertura del colector	$A_{ap} = (W - D_{out_c}) \cdot L$	(41)

Este modelo matemático se soluciona por bloques de iteraciones. Es decir, hay valores en las ecuaciones que son desconocidos como la temperatura de la cubierta de vidrio o la temperatura del tubo receptor. Por esta razón, se inicia el proceso de iteraciones haciendo una primera suposición de estas temperaturas y al final de la iteración se comprueba su valor con la ecuación 38. Las ecuaciones del primer bloque de iteraciones corresponden a todos los coeficientes de transferencia de calor. Es decir, las ecuaciones 34 a 39. Para poder dar solución a estas ecuaciones se requiere retomar los parámetros de la geometría del colector solar de canal parabólico y la emitancia del tubo receptor, mostradas anteriormente en la Tabla 3.

El siguiente bloque de iteraciones está conformado de las ecuaciones 26 a 33. Se inicia asumiendo una temperatura de salida del colector solar. Con esa temperatura de salida se calcula la temperatura media del fluido en el colector, y a su vez, con esa temperatura se calculan todas las propiedades termodinámicas medias del fluido base y del nanofluido (ecuaciones de las Tablas 6 y 7). Con las propiedades medias de los nanofluidos se inicia calculando el número de Nusselt en la ecuación 33. Esta propiedad es útil para calcular el coeficiente convectivo de la pared interna del tubo receptor, presente en la ecuación 32. De igual manera, este nuevo parámetro calculado se utiliza en la ecuación 31 para obtener el factor de eficiencia convectiva. Este nuevo parámetro calculado se utiliza en la ecuación 30, con la que se calcula el factor de remoción de calor. De acuerdo al balance de energía mostrado anteriormente en las Figuras 40 y 41, el calor útil del sistema puede ser calculado con las ecuaciones 26 o 27. De manera general se puede describir el calor útil como la diferencia entre la absorción de calor, por efecto de las propiedades ópticas, y las pérdidas de calor, por efecto de la temperatura ambiente. Para poder calcular la radiación solar absorbida, se retoman las propiedades ópticas del tubo receptor presentes en la Tabla 3. Con estas propiedades se da solución a la ecuación 29, correspondiente a la eficiencia óptica del tubo receptor, y a su vez, con esa eficiencia se obtiene la radiación solar absorbida de la ecuación 28. Retomando el área de apertura del colector solar, presente en la ecuación 41, se da solución a la ecuación 27, obteniendo el calor útil. Finalmente, ese valor obtenido es utilizado en la ecuación 26 para calcular la temperatura de salida del colector solar de canal parabólico. Se realiza una comparación entre el valor asumido al inicio de este bloque de

iteraciones y en caso de ser diferentes, se toma como el nuevo valor asumido de la temperatura de salida del colector a este último valor calculado y se reinicia el proceso iteración de este bloque hasta que la temperatura asumida y la calculada sean iguales.

Rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales

A continuación se mostrará el modelo matemático que define el rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales. Esta sección del método de cálculo del sistema solar-hidrógeno, mostrado anteriormente en la Figura 36, corresponde al punto 6. En esta sección el modo de simulación cambiará de modo análisis a modo diseño para poder cuantificar el efecto que tienen los nanofluidos en la longitud necesaria del intercambiador de calor. Finalmente, se retomará el modo análisis para obtener la temperatura de salida del agua destilada que se dirige hacia el electrolizador.

El método de análisis de esta sección corresponde al método ϵ -NTU, en el que se obtiene la eficacia (ϵ) del intercambiador de calor en función del Número de Unidades de Transferencia (NTU). En la Tabla 9 se muestra un modelo matemático comprendido por 27 ecuaciones que definen el rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales. De manera general, este método consiste en analizar las capacidades caloríficas de los fluidos y su influencia en la eficacia del intercambiador de calor y en el número de unidades de transferencia de calor.

Tabla 9.- Modelo matemático que define el rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales

Parámetro	Ecuación	Ec. #
Flujo másico del nanofluido en el intercambiador de calor	$\dot{m}_{nf_{CHE}} = \rho_{nf_{CHE}} \cdot \dot{V}_{nf_{CHE}}$	(42)
Flujo másico del agua en el intercambiador de calor	$\dot{m}_{H_2O_{CHE}} = \rho_{H_2O_{CHE}} \cdot \dot{V}_{H_2O_{CHE}}$	(43)
Capacidad calorífica del lado caliente	$C_{hot} = \dot{m}_{nf_{CHE}} \cdot Cp_{nf_{CHE}}$	(44)
Capacidad calorífica del lado frío	$C_{cold} = \dot{m}_{H_2O_{CHE}} \cdot Cp_{H_2O_{CHE}}$	(45)
Capacidad calorífica máxima	$C_{max} = \max(C_{hot}, C_{cold})$	(46)
Capacidad calorífica mínima	$C_{min} = \min(C_{hot}, C_{cold})$	(47)
Tasa de capacidad calorífica	$C^* = \frac{C_{min}}{C_{max}}$	(48)
Transferencia de calor	$Q_{CHE} = C_{hot} \cdot (T_{in_{nf_{CHE}}} - T_{out_{nf_{CHE}}})$	(49)
Transferencia de calor	$Q_{CHE} = C_{cold} \cdot (T_{out_{H_2O_{CHE}}} - T_{in_{H_2O_{CHE}}})$	(50)
Transferencia de calor máxima	$Q_{max} = C_{cold} \cdot (T_{in_{nf_{CHE}}} - T_{in_{H_2O_{CHE}}})$ if $C_{cold} < C_{hot}$	(51)

	$Q_{max} = C_{hot} \cdot (T_{in_{nf_{CHE}}} - T_{in_{H_2O_{CHE}}})$ if $C_{hot} < C_{cold}$	
Efectividad del intercambiador de calor	$\varepsilon = \frac{C_{cold} \cdot (T_{out_{H_2O_{CHE}}} - T_{in_{H_2O_{CHE}}})}{C_{min} \cdot (T_{in_{nf_{CHE}}} - T_{in_{H_2O_{CHE}}})}$	(52)
Número de unidades térmicas	$NTU = \left(\frac{1}{1 - C^*} \right) \cdot \ln \left(\frac{1 - \varepsilon \cdot C^*}{1 - \varepsilon} \right)$	(53)
Número de unidades térmicas	$NTU = U_{CHE} \cdot \frac{A_{HE}}{C_{min}}$	(54)
Número de Reynolds del nanofluido en el intercambiador de calor	$Re_{nf_{CHE}} = \frac{\dot{V}_{nf_{CHE}} \cdot D_{iit}}{\pi \cdot \frac{D_{iit}^2}{4} \cdot \nu_{nf_{CHE}}}$	(55)
Factor de fricción del lado caliente	$f_i = \frac{1}{\left[-1.8 \cdot \log \left(\frac{10.9}{Re_{nf_{CHE}}} + \left(\frac{\varepsilon_{Cu}}{3.7 \cdot D_{iit}} \right)^{1.11} \right) \right]^2}$	(56)
Número de Nusselt del lado caliente	$Nu_{nf_{CHE}} = 1.953 \cdot (Re_{nf_{CHE}} \cdot Pr_{nf_{CHE}} \cdot D_{iit})^{\frac{1}{3}}$ si $Re_{nf_{CHE}} < 2300$ $Nu_{nf_{CHE}} = \frac{f_i \cdot (Re_{nf_{CHE}} - 1000) \cdot Pr_{nf_{CHE}}}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_i}{8} \right)^{0.5} \cdot (Pr_{nf_{CHE}}^{\frac{2}{3}} - 1)}$ si $Re_{nf_{CHE}} \geq 2300$	(57)
Coefficiente convectivo interno del lado caliente	$h_i = \frac{Nu_{nf_{CHE}} \cdot k_{nf_{CHE}}}{D_{iit}}$	(58)
Número de Reynolds del agua del lado frío	$Re_{H_2O_{CHE}} = \frac{\dot{V}_{H_2O_{CHE}} \cdot (D_{iot} - D_{oit})}{\pi \cdot \frac{(D_{iot} - D_{oit})^2}{4} \cdot \nu_{H_2O_{CHE}}}$	(59)
Factor de fricción del lado frío	$f_o = \frac{1}{\left[-1.8 \cdot \log \left(\frac{10.9}{Re_{H_2O_{CHE}}} + \left(\frac{\varepsilon_{Cu}}{3.7 \cdot (D_{iot} - D_{oit})} \right)^{1.11} \right) \right]^2}$	(60)
Número de Nusselt del lado frío	$Nu_{H_2O_{CHE}} = 1.953 \cdot (Re_{H_2O_{CHE}} \cdot Pr_{H_2O_{CHE}} \cdot (D_{iot} - D_{oit}))^{\frac{1}{3}}$ si $Re_{H_2O_{CHE}} < 2300$ $Nu_{H_2O_{CHE}} = \frac{f_o \cdot (Re_{H_2O_{CHE}} - 1000) \cdot Pr_{H_2O_{CHE}}}{1 + 12.7 \cdot \left(\frac{f_o}{8} \right)^{0.5} \cdot (Pr_{H_2O_{CHE}}^{\frac{2}{3}} - 1)}$ si $Re_{H_2O_{CHE}} \geq 2300$	(61)
Coefficiente convectivo interno del lado frío	$h_o = \frac{Nu_{H_2O_{CHE}} \cdot k_{H_2O_{CHE}}}{D_{oit}}$	(62)
Resistencia térmica interna del tubo interno del intercambiador de calor	$R_i = \frac{1}{h_i \cdot \pi \cdot D_{iit} \cdot L_{CHE}}$	(63)
Resistencia térmica de las paredes de la tubería interna	$R_{wall} = \frac{\ln \left(\frac{D_{oit}}{D_{iit}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot k_{Cu} \cdot L_{CHE}}$	(64)
Resistencia térmica externa del tubo interno del intercambiador de calor	$R_o = \frac{1}{h_o \cdot \pi \cdot D_{oit} \cdot L_{CHE}}$	(65)
Resistencia térmica total	$R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o$	(66)
Área de transferencia de calor	$A_{CHE} = \pi \cdot D_{oit} \cdot L_{CHE}$	(67)
Coefficiente global de transferencia de calor	$U_{CHE} = \frac{1}{R_{total} \cdot A_{CHE}}$	(68)

Para determinar el rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales es necesario retomar el balance térmico, la geometría y la configuración de los flujos, mostrados en las Figuras 42, 43 y 44. En la Figura 42 se muestra con flechas rojas los diferentes mecanismos de transferencia de calor presentes en una sección transversal del intercambiador de calor. La pared externa de la tubería será considerada como adiabática debido al aislamiento de espuma elastomérica. Por esta razón, el flujo de calor será considerado unidireccional desde el nanofluido hacia el agua. En la Figura 43 se muestra el circuito de resistencias térmicas que caracteriza a este tipo de intercambiador de calor.

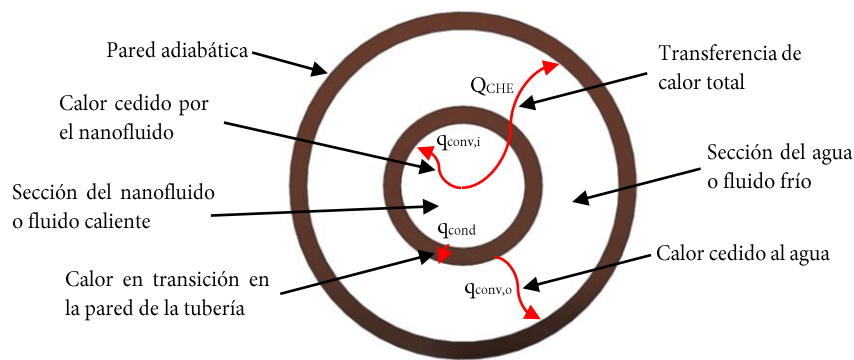


Figura 42.- Balance térmico en la sección transversal del intercambiador de calor de tubos coaxiales

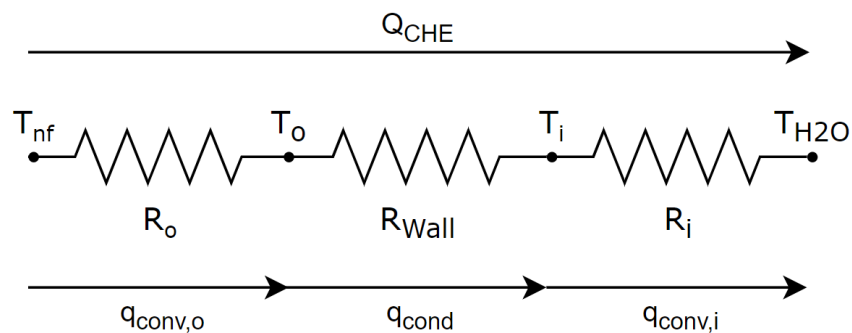


Figura 43.- Circuito de resistencia térmica característico del intercambiador de calor de tubos coaxiales.

Uno de los parámetros más importantes a considerar en este sistema es el coeficiente global de transferencia de calor, el cual hace característico el rendimiento del intercambiador de calor. Este coeficiente es calculado con la ecuación 68. Es evidente que si el coeficiente global de transferencia de calor es mayor, el área necesaria para realizar la transferencia de calor será menor y a su vez se verá

reflejado en la longitud del intercambiador de calor. Para calcular este coeficiente es necesario calcular la resistencia total al flujo de calor con las ecuaciones 63 a 66. En estas ecuaciones es necesario tomar en consideración la geometría de la sección transversal de las tuberías del intercambiador de calor, mostrada en la Figura 44 y la configuración de los flujos, mostrada en la Figura 45.

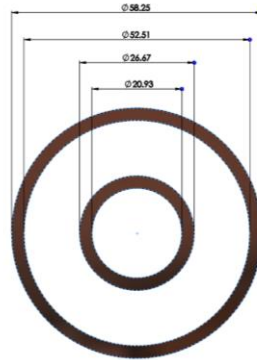


Figura 44.- Sección transversal del intercambiador de calor de tubos coaxiales

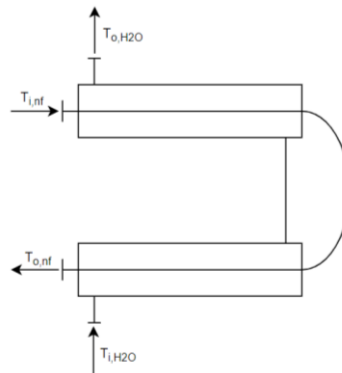


Figura 45.-Configuración en contraflujo en el intercambiador de calor de tubos coaxiales

El cálculo del coeficiente convectivo interno y externo es un proceso repetitivo para ambas secciones del tubo interno. El primer paso es calcular el número de Reynolds en ambas secciones del intercambiador de calor. Estos números se obtienen con las ecuaciones 54 y 59. Seguido de este cálculo se obtiene el factor de fricción, tanto interno como externo, con las ecuaciones 55 y 60. Continuando con el cálculo, es necesario obtener el número de Nusselt externo e interno. Estos valores están condicionados a la turbulencia de fluido en cada sección del intercambiador de calor. Si el número de Reynolds es mayor o igual a 2300, es considerado como un fluido turbulento, por el contrario, es

considerado un fluido laminar. Ambas condiciones se encuentran en las ecuaciones 57 y 61. Retomando la conductividad térmica de los fluidos y la geometría del intercambiador de calor se obtienen el coeficiente convectivo interno y externo con las ecuaciones 58 y 62, respectivamente.

Finalmente, se utiliza el coeficiente global de transferencia de calor para obtener el área necesaria de transferencia de calor con la ecuación. Debido a que los diámetros de la tubería ya se encuentran definidos, la única variable que resta por definir es la longitud de la tubería con la ecuación 67. Todo este proceso se repite para cada uno de los nanofluidos con la finalidad de evaluar su efecto en la longitud necesaria del intercambiador de calor de tubos coaxiales.

Una vez terminado el modo diseño en el intercambiador de calor, se emplea el modo análisis para evaluar su rendimiento de acuerdo al método ϵ -NTU. Este método se basa en el hecho de que las diferencias de las temperaturas de entrada o de salida se encuentran en función del coeficiente global de transferencia de calor, el área de transferencia de calor y las capacidades caloríficas. Las ecuaciones que rigen el rendimiento del intercambiador de calor pueden ser descritas en forma adimensional, como es el caso de la tasa de capacidad calorífica de la ecuación 48. La tasa de capacidad calorífica se obtiene con la relación entre la capacidad calorífica mínima y máxima de las 2 secciones del intercambiador de calor, es decir, la sección del agua y los nanofluidos, respectivamente. De igual manera, otro valor adimensional es la efectividad (ϵ), la cual se obtiene con la ecuación 52, y relaciona la transferencia de calor total (de acuerdo a la geometría propuesta) y la máxima transferencia de calor posible en un área infinita de transferencia de calor.

Para determinar la capacidad calorífica mínima y máxima de las ecuaciones 46 y 47 es necesario retomar el calor específico de los nanofluidos y del agua para calcular la capacidad calorífica del lado caliente y del lado frío con las ecuaciones 44 y 45, respectivamente. Además, para calcular las capacidades caloríficas es necesario convertir los caudales en ambas secciones en flujos máxicos. Para lograr esto se utilizan las ecuaciones 42 y 43. Finalmente, se realiza una comparación numérica entre ambas capacidades caloríficas, la mayor será considerada como la capacidad calorífica máxima y la menor como la capacidad calorífica mínima. Estos valores son utilizados para conocer la tasa de capacidad calorífica, la cual es útil para el cálculo del número de unidades térmicas de la ecuación 53.

Para obtener la temperatura de salida del agua en el intercambiador de calor de tubos coaxiales se parte del balance de energía, es decir, que el calor cedido por los nanofluidos es igual al calor absorbido por el agua. Este balance de energía se encuentra representado con las ecuaciones 49 y 50. El calor cedido por los nanofluidos se encuentra perfectamente definido, ya que se conoce tanto la temperatura de entrada (temperatura de salida del colector solar), como la temperatura de salida (definida inicialmente como 25°C).

Finalmente, con ayuda de la ecuación 51 se obtiene la transferencia de calor máxima, dependiendo de cuál de las 2 capacidades caloríficas es mayor, la del lado frío o caliente. Esta transferencia de calor máxima es útil en el cálculo de la eficacia del intercambiador de calor. De igual manera, este valor de la eficacia y la tasa de capacidad calorífica son utilizados para calcular el número de unidades térmicas del intercambiador de calor, con la ecuación 53.

Rendimiento del electrolizador tipo PEM

El rendimiento del electrolizador tipo PEM parte de la temperatura del agua que ingresa a el, proveniente del intercambiador de calor. Este procedimiento corresponde al paso 7 del método de cálculo del sistema solar hidrógeno, representado anteriormente en la Figura 36. El modelo matemático que rige el rendimiento del electrolizador tipo PEM se muestra en la Tabla 10. Tal como se mencionó anteriormente, la temperatura del agua en el electrolizador juega un papel importante en su rendimiento y se puede apreciar este valor en la mayoría de las ecuaciones de la Tabla 10. De manera general, el incremento de la temperatura en una reacción química acelera la cinética de la reacción, y es por esta razón que se espera que el electrolizador presente un incremento en su rendimiento al suministrarlo con agua caliente. Para resolver las ecuaciones de la Tabla 10 es necesario retomar los parámetros del electrolizador, planteados anteriormente en la Tabla 4.

El voltaje global del electrolizador disminuye con el incremento de la temperatura del agua. Esta disminución de voltaje implica un incremento en la corriente del electrolizador, y a su vez, este efecto se ve reflejado en un incremento en la producción de hidrógeno. Para poder cuantificar el voltaje global es necesario dar solución a la ecuación 69, la cual parte del balance de energía en el

electrolizador. El voltaje global se ve afectado directamente por la polarización y caída de voltaje en los electrodos, la membrana y el efecto de la concentración de reactivos en los electrodos. Cada uno de estos valores mencionados anteriormente se puede obtener con las ecuaciones 70 a 73, 77 y 78. A su vez, para poder dar solución a la ecuación 73, es necesario dar solución a las ecuaciones 74 a 76.

Finalmente, el incremento en la corriente del electrolizador se ve reflejado al dar solución a la ecuación 79. Este incremento en la corriente provoca de igual manera un incremento en la generación de hidrógeno en el electrolizador. La generación de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM se puede obtener a partir de la ecuación 80.

Tabla 10.- Modelo matemático del rendimiento del electrolizador tipo PEM

Parámetro	Ecuación	Ec. #
Voltaje global	$V = V_{oc} + V_{act\ an} + V_{act\ cat} + V_{ohmic} + V_{con\ an} + V_{con\ cat}$	(69)
Voltaje de circuito abierto	$V_{oc} = 1.23 - 0.00058 \cdot (T_{elec} - 298) + 0.0000438 \cdot T_{elec} \cdot \ln\left(\frac{P_{H_2} \cdot P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}}\right)$	(70)
Sobrepotencial de activación del ánodo	$V_{act\ an} = \frac{R \cdot T_{elec}}{F} \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{J}{2 \cdot J_{o\ an}}\right)$	(71)
Sobrepotencial de activación del cátodo	$V_{act\ cat} = \frac{R \cdot T_{elec}}{F} \cdot \sinh^{-1}\left(\frac{J}{2 \cdot J_{o\ cat}}\right)$	(72)
Sobrepotencial Óhmico	$V_{ohmic} = R_{cell} \cdot I = (R_{el} + R_{bp} + R_{mem}) \cdot I$	(73)
Resistencia del electrodo	$R_{el\ bp} = \rho_{eff} \cdot \frac{l}{A}$	(74)
Resistencia de la membrana PEM	$R_{mem} = \frac{\delta_{mem}}{A \cdot \sigma_{mem}}$	(75)
Conductividad de la membrana PEM	$\sigma_{mem} = (0.005139 \cdot \lambda - 0.00326) \cdot \left[1264 \cdot \left(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{elec}}\right)\right]$	(76)
Sobrepotencial por concentración en el ánodo	$V_{con\ an} = \frac{RT_{elec}}{4 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{C_{O_2}^{mem}}{C_{O_2o}^{mem}}\right)$	(77)
Sobrepotencial por concentración en el cátodo	$V_{con\ cat} = \frac{RT_{elec}}{4 \cdot F} \cdot \ln\left(\frac{C_{H_2}^{mem}}{C_{H_2o}^{mem}}\right)$	(78)
Potencia requerida en el electrolizador	$P_{stack} = N_{cell} \cdot V \cdot I$	(79)
Masa de hidrógeno generada	$m_{H_2} = \frac{I \cdot t \cdot M_{H_2}}{2F}$	(80)

Implementación del modelo matemático en software de simulación

El modelo matemático antes descrito será sometido a solución por medio del software Engineering Equation Solver (EES). Este software es ampliamente utilizado en las diferentes ramas de la ingeniería por su practicidad y confiabilidad de los resultados. Además, este software ofrece la posibilidad de resolver ecuaciones simultáneas e iteraciones en un tiempo relativamente corto. Además, en este software es posible realizar los estudios paramétricos planteados en el método de solución del sistema solar-hidrógeno.

CAPITULO IV
RESULTADOS

Verificación y validación

De acuerdo al planteamiento de la metodología de cálculo del sistema solar-hidrógeno, el punto número 8 corresponde al procesamiento de la información o resultados. Un primer paso antes de realizar la experimentación con el sistema simulado es la verificación y validación de los resultados. Este proceso se realiza para conocer la incertidumbre del modelo simulado en comparación de datos experimentales de referencia, es decir, conocer el porcentaje de error de los datos obtenidos en la simulación. Una metodología adoptada ampliamente por la comunidad científica internacional es la comparación de los resultados de los simuladores con datos experimentales publicados por el reconocido Laboratorio Nacional SANDIA, operado por el Departamento de Energía de los Estados Unidos, situado en Albuquerque Nuevo México, en el año 1994.

En su publicación de resultados, específicamente el reporte SEGS LS-2 Solar Collector, se encuentran diferentes tablas de acuerdo a consideraciones especiales en los tubos receptores, tales como: tubos con cubierta o sin cubierta de vidrio, tubos pintados de negro o sin pintura, tubos con o sin vacío en la cubierta de vidrio. Para realizar la verificación y validación de resultados se tomará como referencia la tabla D-1 del reporte de SANDIA, el cual corresponde a los datos experimentales de medición de la eficiencia de un colector solar con cubierta al vacío. Estos valores se encuentran en la Tabla 11.

Tabla 11.- Datos experimentales de medición de la eficiencia de un colector solar con cubierta al vacío.

Cermet Selective Coating - Vacuum Annulus									
Test Date 1992	Direct Normal Insolation W/m²	Wind speed m/sec	Air Temp °C	Temp In °C	Temp Out °C	Delta Air °C	Flow rate L/min	Meas Effic %	Est Error ±%
02/06	807.9	1.0	15.8	18.34	36.17	11.6	18.4	72.63	1.91
17/06	933.7	2.6	21.2	102.2	124.0	91.9	47.7	72.51	1.95
17/06	968.2	3.7	22.4	151.0	173.3	139.8	47.8	70.9	1.92
17/06	982.3	2.5	24.3	197.5	219.5	184.3	49.1	70.17	1.81
22/06	909.5	3.3	26.2	250.7	269.4	233.9	54.7	70.25	1.90
22/06	937.9	1.0	28.8	297.8	316.9	278.6	55.5	67.98	1.86
25/06	880.6	2.9	27.5	299.0	317.2	280.7	55.6	68.92	2.06
26/06	920.9	2.6	29.5	379.5	398.0	359.4	56.8	62.34	2.41
29/06	903.2	4.2	31.1	355.9	374.0	334.1	56.3	63.82	2.36

En esta experimentación, realizada en el año 1992, se tomaron mediciones de datos meteorológicos como la radiación solar directa, la velocidad del viento y la temperatura ambiente. De igual manera, se hicieron mediciones del sistema como temperaturas de entrada y de salida, y caudal del fluido. Tomando como referencia estos valores, se realizó el registro de la eficiencia medida y su respectivo porcentaje de error, de acuerdo a la incertidumbre de los equipos de medición que se utilizaron en la experimentación.

Para llevar a cabo la verificación y validación de los resultados, se realizó un estudio paramétrico, haciendo variaciones en los datos meteorológicos de entrada y las condiciones de operación del colector solar, de acuerdo a los datos experimentales del Laboratorio Nacional SANDIA. En la Tabla 12 se muestran los resultados obtenidos con el simulador, como la temperatura de salida del fluido y la eficiencia térmica del colector solar de canal parabólico con tubo evacuado. Además, en esta tabla se muestra al porcentaje de error entre los resultados de experimentación publicados por SANDIA y los obtenidos con el simulador. Los resultados obtenidos no solamente muestran coherencia, sino que muestran un porcentaje de error que se encuentra dentro del margen de incertidumbre de las mediciones, mostrada anteriormente en la Tabla 11. Por lo tanto, el simulador será considerado como coherente y validado.

Tabla 12.- Validación del simulador de colector solar de canal parabólico con tubo evacuado.

G_b	u_{air}	T_{amb}	T_{in}	V_{fluid}	$T_{out_{sim}}$	$T_{out_{SANDIA}}$	$T_{out} \%error$	$\eta_{th_{sim}}$	$\eta_{th_{SANDIA}}$	$\eta_{th} \%error$
933.7	2.6	21.2	102.2	47.7	124.4	124	0.322	0.7336	0.7251	1.159
968.2	3.7	22.4	151	47.8	174	173.3	0.402	0.7278	0.709	2.583
982.3	2.5	24.3	197.5	49.1	220.2	219.5	0.318	0.7208	0.7017	2.65
909.5	3.3	26.3	250.7	54.7	269.8	269.4	0.148	0.7100	0.7025	1.056
937.9	1	26.2	297.8	55.5	317.4	316.9	0.158	0.6928	0.6798	1.876
880.6	2.9	28.8	299	55.6	317.3	317.2	0.032	0.6907	0.6892	0.217
903.2	4.2	27.5	355.9	56.3	374.4	374	0.107	0.6512	0.6382	1.996

Experimentación

La validación del simulador del colector solar de canal parabólico de tubo evacuado abre las puertas a la experimentación y la realización de diferentes estudios paramétricos que pueden ser utilizados para conocer el impacto que tienen ciertas variables en el rendimiento del colector solar, el intercambiador de calor de tubos evacuados o el electrolizador tipo PEM. Las propiedades de los nanofluidos serán constantemente utilizadas en cada uno de los estudios paramétricos que se plantean en la experimentación. Por esta razón, el primer estudio paramétrico realizado será una variación de las propiedades de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas y su temperatura.

Uno de los estudios paramétricos necesarios para validar o refutar las hipótesis planteadas en este estudio es el cambio de los fluidos de trabajo en el colector y el efecto que provoca la concentración de las nanopartículas en la temperatura de salida del colector. De igual manera, para evaluar el efecto que tiene el uso de nanofluidos en la longitud necesaria del intercambiador de calor de tubos coaxiales, se llevará a cabo un estudio paramétrico en el que se varíen los fluidos de trabajo y la concentración de nanopartículas. Finalmente, la temperatura de salida del agua, obtenida de la simulación del rendimiento del intercambiador de calor de tubos coaxiales, será utilizada como dato de entrada en un estudio paramétrico del electrolizador tipo PEM para concluir con el método de cálculo del sistema solar-hidrógeno.

Recolección y procesamiento de datos de simulación

Los datos o información procesada por el simulador serán recolectados de forma tabular. Los datos referentes a las propiedades de los nanofluidos, y los diferentes estudios paramétricos, serán recopilados en una base de datos en formato Excel para consulta o posibles usos futuros de la información. Para el procesamiento y formato de la información tabular de la base de datos se utilizará el software Origin, para generar los diferentes tipos de gráficas que serán mostradas en el apartado de resultados. Finalmente, los datos y gráficas serán analizados para validar o refutar los diferentes puntos planteados en la hipótesis.

Interpretación de resultados

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos de acuerdo a cada uno de los pasos del método de solución del sistema solar-hidrógeno. El punto numero 1 plantea una experimentación con las mezclas de etilenglicol-agua con la finalidad de encontrar la mezcla adecuada y así evitar que los nanofluidos cambien de fase a la salida del colector solar, es decir, que el incremento ebulloscópico sea por lo menos 30 °C. En la Figura 46 se muestran las propiedades coligativas de la mezcla etilenglicol agua.

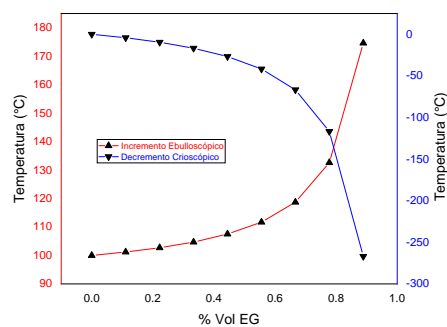


Figura 46.- Propiedades coligativas de la mezcla etilenglicol-agua

De acuerdo a los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión que la mezcla adecuada para el fluido base, es decir, la mezcla etilenglicol-agua, corresponde a un 75% etilenglicol y 25% de agua. Tomando como referencia esa mezcla se evaluaron las propiedades del fluido base. De acuerdo a los estudio paramétricos planteados en el apartado anterior, el siguiente estudio corresponde a las propiedades termodinámicas de los nanofluidos. En las Figuras 47, 48 y 49 se muestran las diferentes propiedades de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.

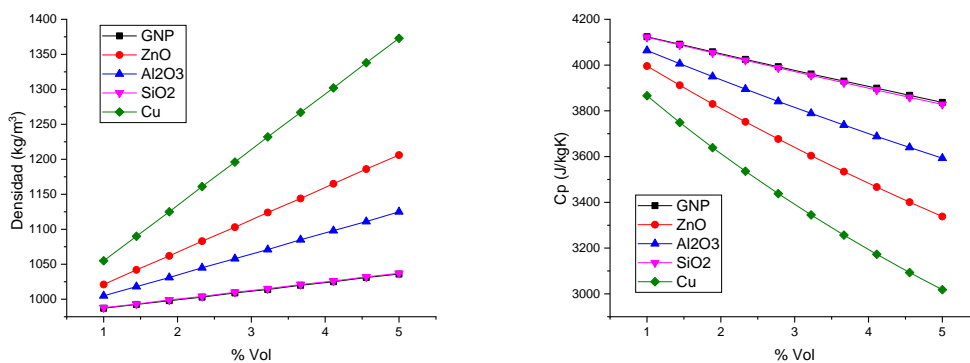


Figura 47.- Densidad y calor específico de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas

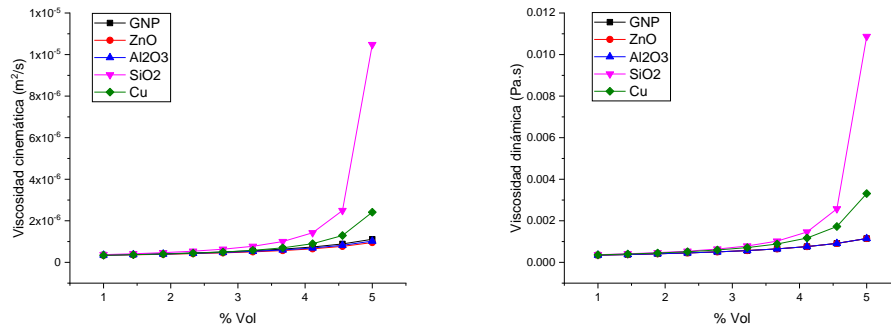


Figura 48.- Viscosidad cinemática y dinámica de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas

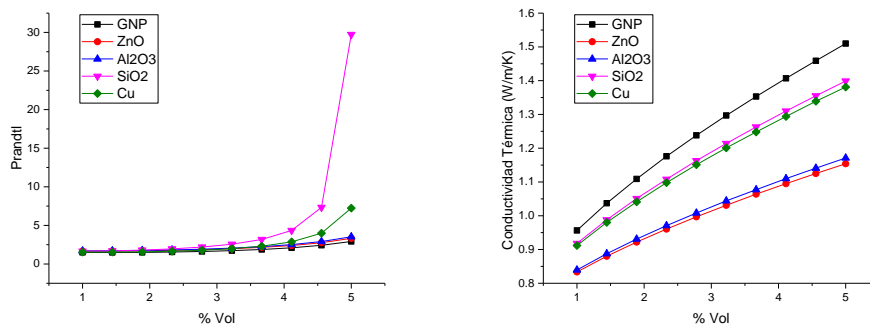


Figura 49.- Prandtl y conductividad térmica de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.

Todas las propiedades termodinámicas de los nanofluidos mostradas anteriormente tienen un punto de partida y en algunas secciones las diferencias son prácticamente insignificantes. Este punto de partida corresponde a las propiedades del fluido base. De acuerdo al incremento en la concentración de nanopartículas en el nanofluido, las propiedades intrínsecas de cada tipo de nanopartículas hacen efecto en sus propiedades generales. A pesar de que cada tipo de nanopartícula es totalmente diferente al resto, todas las propiedades de los nanofluidos siguen la misma familia de curvas, es decir, tienen la misma tendencia al incremento de la concentración.

En la Figura 47 se muestra la densidad del fluido y el calor específico. En ambos casos que el incremento en la concentración de nanopartículas favorece a la transferencia de calor. Es decir, en un fluido más denso, las partículas del fluido se encuentran más cercanas unas a otras, favoreciendo la interacción y el intercambio de calor por contacto o colisiones entre partículas. De igual manera, un

fluido con un calor específico bajo representa un fluido que cada vez requiere menos calor para incrementar su temperatura.

A pesar de que el incremento de la concentración de nanopartículas sea favorable para algunas propiedades termodinámicas, para otras es desfavorable, como es el caso de la densidad del fluido, mostrada anteriormente en la Figura 47. Los nanofluidos que más se ven afectados por el incremento de la concentración de nanopartículas son los nanofluidos de cobre y dióxido de silicio. Particularmente, estas nanopartículas son las más pequeñas consideradas en este estudio, las nanopartículas de cobre rondan los 25 nm y las de dióxido de silicio los 15 nm. El alto incremento de la viscosidad del fluido puede llegar a tener efectos negativos en el consumo energético del sistema de bombeo y el decremento en la turbulencia del nanofluido. A pesar de que el tubo colector es de una longitud relativamente corta (3 m), y por ser de acero inoxidable, es decir, una rugosidad insignificante, el cálculo de la potencia de bombeo en esa sección del sistema puede mostrar el efecto que tiene el incremento en la concentración de las nanopartículas en la potencia de bombeo, así como la turbulencia del nanofluido dentro del tubo colector. En la Figura 50 se muestran los resultados de ese estudio paramétrico.

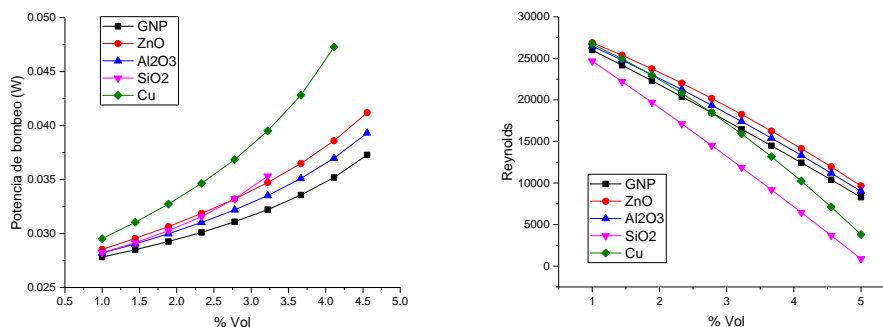


Figura 50.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la potencia de bombeo y la turbulencia del nanofluido.

Una vez determinadas las propiedades de los nanofluidos, éstas pueden ser utilizadas para evaluar el rendimiento del colector solar de canal parabólico y el intercambiador de calor de tubos coaxiales. El siguiente estudio paramétrico consiste en variar la concentración de las nanopartículas en los nanofluidos para evaluar su efecto en la eficiencia térmica del colector solar, así como en las

pérdidas de calor y la temperatura a la salida del colector solar. En la Figura 51 se muestra la eficiencia térmica y pérdida de calor en el colector solar de canal parabólico operado con agua. Dichos valores se encuentran en función de la diferencia de temperaturas, entre la entrada del fluido y la temperatura ambiente. Estos valores serán tomados como referencia para evaluar el incremento en la eficiencia en el colector solar al ser operado con los diferentes nanofluidos.

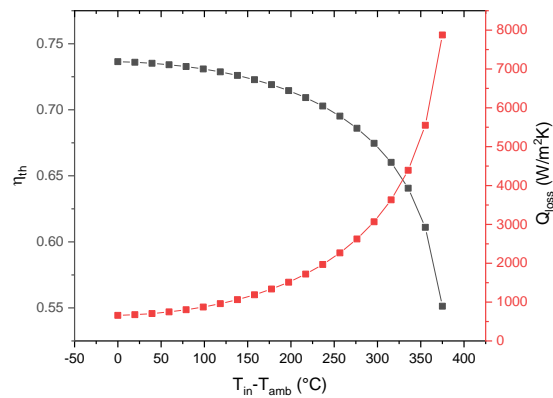


Figura 51.- Eficiencia térmica y pérdidas de calor en el colector solar de canal parabólico operado con agua

En la Figura 52 se muestra el rendimiento el colector solar de acuerdo a los diferentes nanofluidos utilizados en este estudio y en sus diferentes concentraciones de nanopartículas. Tal como se puede apreciar, las nanopartículas de nanoplacas de graféno son las que toman la vanguardia en este estudio, mostrando una temperatura máxima de 126.8 $^{\circ}C$, en comparación con una temperatura de salida del agua de 115.3 $^{\circ}C$. Esa diferencia de 11.5 $^{\circ}C$ representa un incremento del 9.97% en el rendimiento del colector solar.

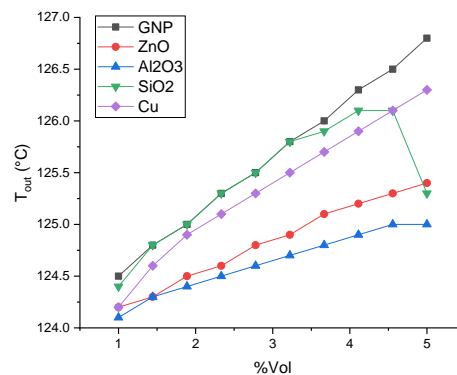


Figura 52.- Temperatura de salida del colector solar en función de la concentración de nanopartículas

De manera similar, se llevó a cabo un estudio paramétrico en el que se obtuvo el efecto en la concentración de las nanopartículas en la eficiencia térmica del colector solar. Es evidente que de nuevo los nanofluidos a base de nanoplacas de graféno se mantienen a la vanguardia, mostrando una eficiencia térmica más estable que el resto de nanofluidos. La eficiencia máxima obtenida en el estudio corresponde a 75.02 % con una concentración de nanopartículas de nanoplacas de graféno de 2.11 %Vol. Bajo las mismas condiciones, el colector solar de canal parabólico operado con agua presenta una eficiencia de 74.18%, de tal manera que el incremento en la eficiencia global del colector por el uso de nanofluidos como fluido de trabajo corresponde a 1.13%. Los resultados de esta experimentación se muestran en la Figura 53.

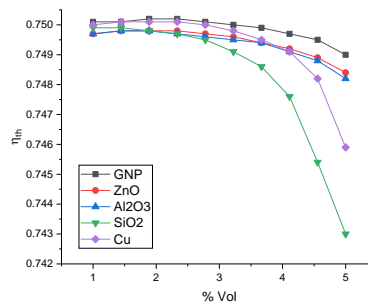


Figura 53.- Eficiencia del colector solar de canal parabólico en función de la concentración de nanopartículas

De acuerdo al método de cálculo del sistema solar-hidrógeno, la siguiente experimentación consiste en considerar las temperaturas de salida del colector solar de canal parabólico como temperaturas de entrada del intercambiador de calor de tubos coaxiales, con la finalidad de evaluar su rendimiento a diferentes concentraciones de nanopartículas. Los resultados de este estudio paramétrico se muestra en las Figuras 54 y 55.

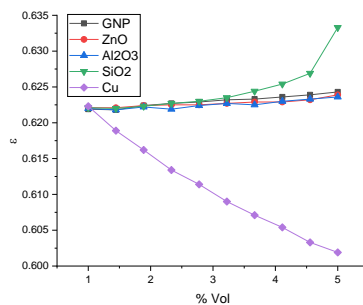


Figura 54.- Efectividad del intercambiador de calor de tubos coaxiales en función de la concentración de nanopartículas

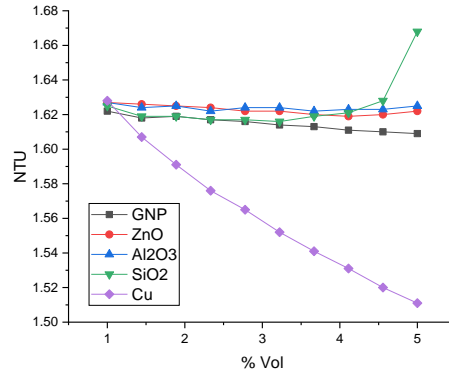


Figura 55.- NTU del intercambiador de calor de tubos coaxiales en función de la concentración de nanopartículas.

La efectividad más alta registrada en este estudio paramétrico corresponde a los nanofluidos a base de dióxido de silicio, con un valor de 63.33% con una concentración de 5 %Vol de nanopartículas. Por el contrario, el valor más bajo de efectividad corresponde a los nanofluidos a base de cobre, con un valor de 60.19% con una concentración de 5 %Vol de nanopartículas. Este incremento y decremento en la efectividad del intercambiador de calor se debe a la máxima diferencia de temperaturas, es decir, la diferencia de temperaturas entre la entrada de los nanofluidos y la entrada del agua destilada. De igual manera, este efecto se debe a la transferencia de calor efectiva entre los nanofluidos y el agua destilada.

Por otro lado, el número de unidades de transferencia tiene un comportamiento similar, presentando un valor máximo de 1.688 para el dióxido de silicio y un valor mínimo de 1.511 para el cobre, ambos en una concentración máxima de 5 %Vol. Este efecto se debe al incremento y decremento del área de transferencia de calor, que a su vez se verá reflejado en la longitud necesaria del intercambiador de calor de tubos coaxiales.

En la Figura 56 se muestra el resultado del estudio paramétrico en el que se observa la longitud necesaria del intercambiador de calor en función de la concentración de nanopartículas en los nanofluidos. La longitud del intercambiador de calor de tubos coaxiales depende directamente del coeficiente global de transferencia de calor. El incremento de la concentración de nanopartículas, en cada uno de los nanofluidos, muestra un decremento en la longitud necesaria del intercambiador de calor. El nanofluido que logró un decremento máximo corresponde a los nanofluidos de nanoplacas

de grafeno, representando una disminución del 61% con respecto al agua como fluido de trabajo o fluido caliente. Con esta información se valida uno de los puntos planteados en la hipótesis. Por lo tanto, se puede concluir que las nanopartículas a base de carbono pueden disminuir en al menos un 50% la longitud necesaria del intercambiador de calor de tubos coaxiales.

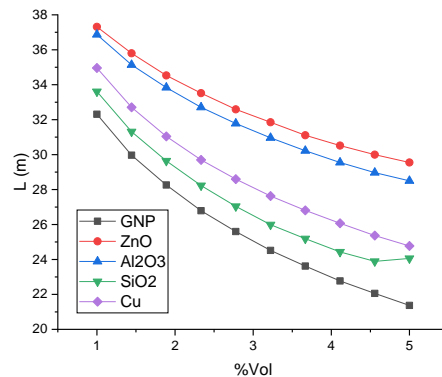


Figura 56.- Longitud del intercambiador de calor en función de la concentración de nanopartículas.

De igual manera, existen diferentes nanofluidos a cierta concentración de nanopartículas que también pueden lograr la disminución del 50% del intercambiador de calor. La longitud necesaria del intercambiador de calor si se utilizara agua como fluido de trabajo sería de 54.5 m. Por lo tanto, los nanofluidos de cobre y de dióxido de silicio también pueden lograr esa reducción del intercambiador de calor, a partir de una concentración de 2.78 %Vol para el dióxido de silicio y 3.3 %Vol para el cobre. El siguiente estudio paramétrico corresponde a la temperatura de salida del agua destilada en el intercambiador de calor, provocada por los nanofluidos a diferentes concentraciones de nanopartículas. Los resultados de este estudio se encuentran en la Figura 57.

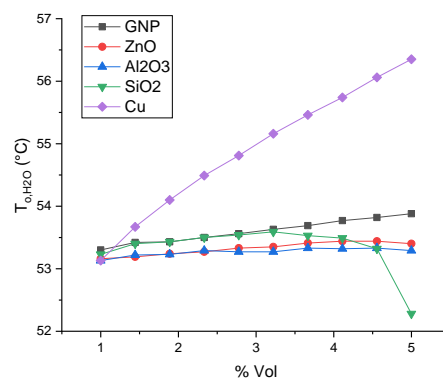


Figura 57.- Temperatura de salida del agua destilada en el intercambiador de calor

En este estudio paramétrico, los nanofluidos de cobre lograron incrementar la temperatura del agua a la salida del intercambiador hasta una temperatura máxima de 56 °C. La temperatura de entrada del agua destilada al intercambiador de calor fue establecida como constante a 10 °C. Por lo tanto, el uso de nanofluidos de cobre como fluido de trabajo puede incrementar hasta 46 °C el agua destilada. De igual manera, los nanofluidos a base de nanoestructuras de carbono, como las nanoplacas de graféno, pueden incrementar la temperatura del agua destilada 43.88 °C, logrando una temperatura máxima a la salida del intercambiador de calor de 53.88 °C, a una concentración máxima de nanopartículas. Esta temperatura será utilizada para validar el último punto de la hipótesis.

El último estudio paramétrico corresponde al rendimiento del electrolizador tipo PEM. En este estudio se tomarán las temperaturas de salida del agua destilada del intercambiador de calor y serán consideradas como temperaturas del electrolito en el electrolizador. La finalidad de este estudio paramétrico es evaluar el efecto que tienen los nanofluidos como fluido de trabajo en el sistema solar-hidrógeno en el rendimiento del electrolizador y validar el último punto de la hipótesis. En la Figuras 58 a 62 se muestran los resultados de este estudio paramétrico.

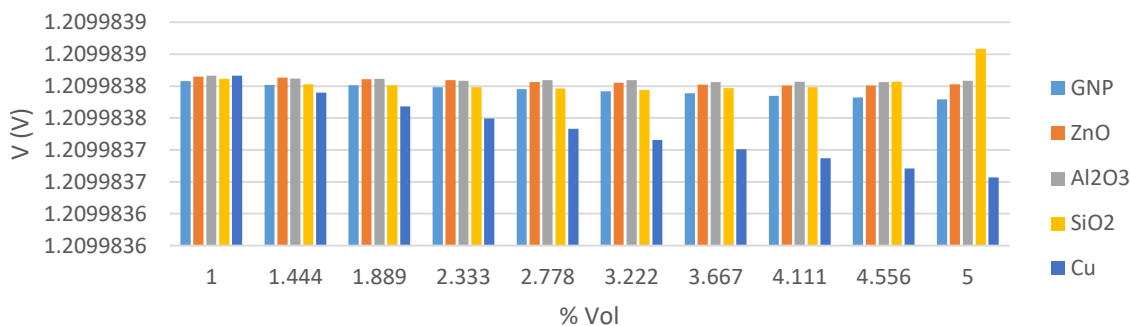


Figura 58.- Efecto de la concentración de nanopartículas en el voltaje del electrolizador tipo PEM

El aumento en la concentración de nanopartículas en los nanofluidos provoca un cambio mínimo en el voltaje del electrolizador. Sin embargo, el incremento en la temperatura del electrolito disminuye en promedio 21 mV el voltaje del electrolizador, con referencia al voltaje de 1.23 V en condiciones estándar. Este decremento en el voltaje representa 1.7% del voltaje en condiciones estándar. El decremento en el voltaje provoca a su vez el incremento de la corriente entre los

electrodos, y a su vez, el incremento en la producción de hidrógeno. Los resultados de este estudio se muestran en la Figura 59 y 60. La corriente en condiciones estándar corresponde a 81.3 A. Tomando como referencia la corriente promedio en el estudio, se logró un incremento del 1.6 % en la corriente del electrolizador tipo PEM.

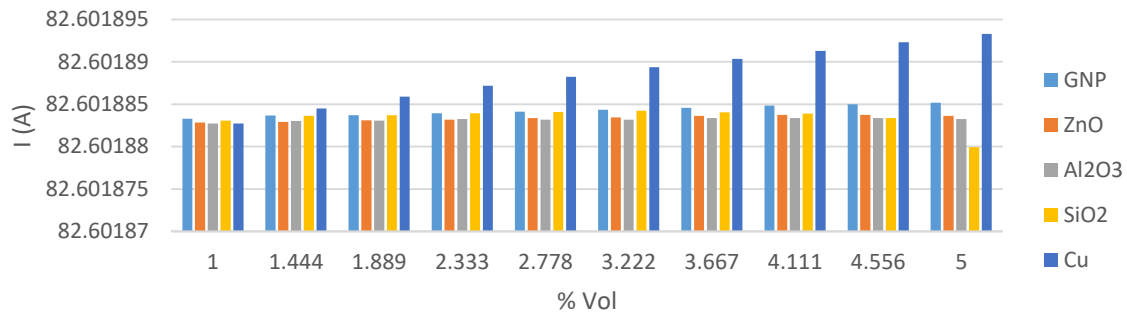


Figura 59.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la corriente del electrolizador tipo PEM

Cada una de las corrientes de la Figura 59 fue utilizada para estimar la generación de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM. Los resultados de este estudio se muestran en la Figura 60. En condiciones estándar, el electrolizador tiene una generación de 3.762 litros de hidrógeno. Tomando como referencia esa producción de hidrógeno, el uso de nanofluidos como fluido de trabajo en el sistema solar-hidrógeno provoca un incremento del 19% en la producción de hidrógeno. Este valor es útil para validar el último punto de la hipótesis. Por lo tanto, el uso de nanofluidos a base de nanoestructuras de carbono si puede incrementar en al menos 15% la producción de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM.

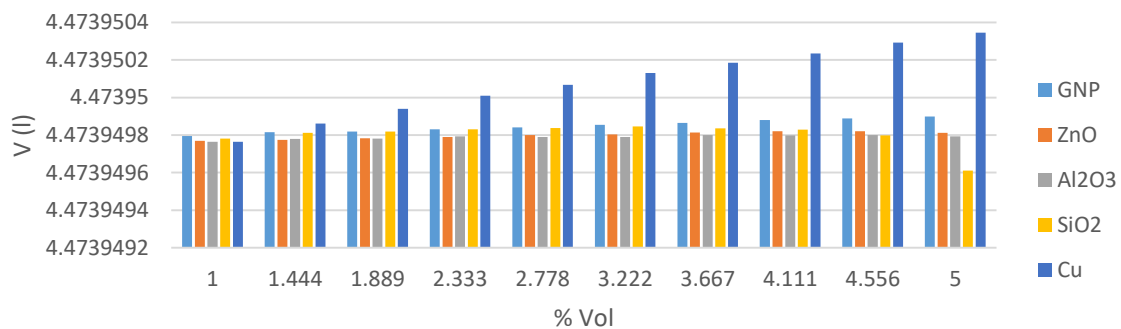


Figura 60.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la generación de hidrógeno en el electrolizador tipo PEM

El siguiente estudio muestra la cantidad de energía almacenada en el volumen de hidrógeno generado en el estudio anterior. Los resultados de este estudio se muestran en la Figura 61. En condiciones estándar la energía almacenada en el hidrógeno corresponde a 12.02 kJ. Tomando como referencia el valor promedio de este estudio, el uso de nanofluidos como fluido de trabajo en el sistema solar-hidrógeno provoca un aumento en la energía almacenada en el hidrógeno de 20.25%.

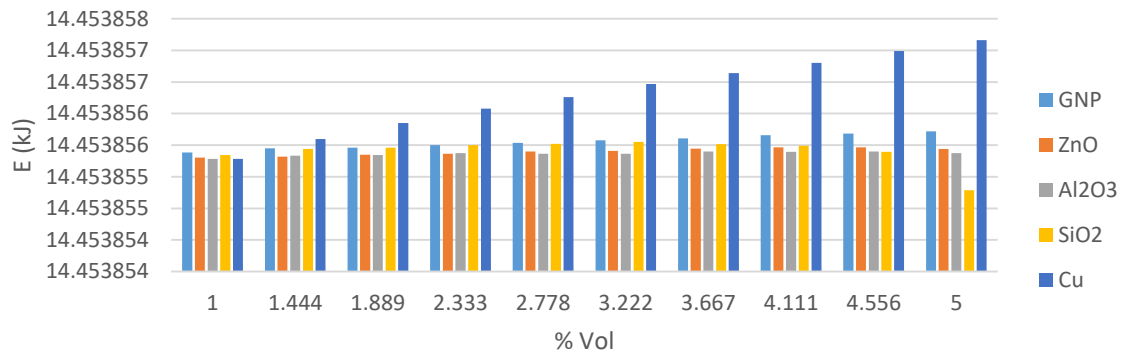


Figura 61.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la cantidad de energía almacenada en el hidrógeno.

El siguiente estudio paramétrico muestra el efecto de la concentración de las nanopartículas en la eficiencia del electrolizador. Los resultados de este estudio se muestran en la Figura 62. En condiciones estándar la eficiencia del electrolizador corresponde a 43.27 %. Tomando como referencia la eficiencia promedio de este estudio, el uso de nanofluidos como fluido de trabajo en el sistema solar-hidrógeno eleva 8.76% la eficiencia del electrolizador tipo PEM.

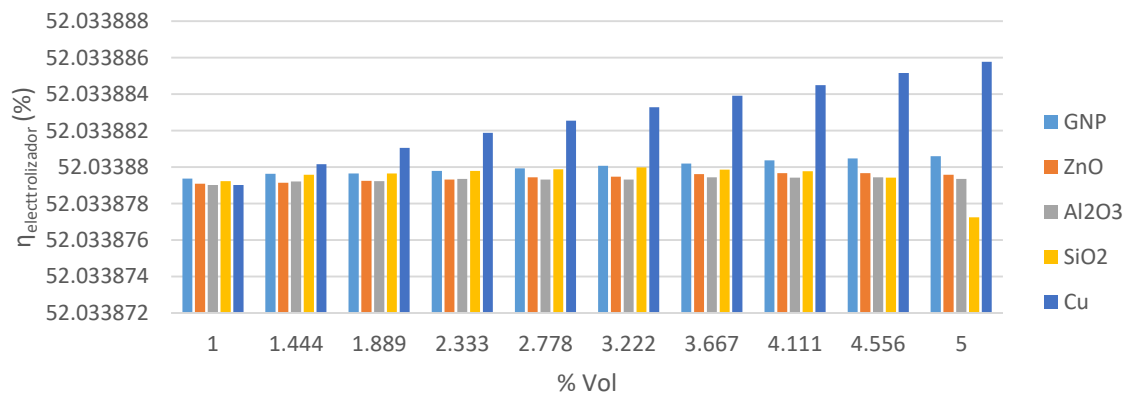


Figura 62.- Efecto de la concentración de nanopartículas en la eficiencia del electrolizador tipo PEM

El siguiente estudio consiste en la evaluación de la eficiencia global del sistema solar-hidrógeno en función de la concentración de nanopartículas en los nanofluidos. El resultado de esta experimentación se muestra en la Figura 63. En condiciones estándar y agua como fluido de trabajo, el sistema tendría una eficiencia global de 19.26%. De acuerdo a los resultados obtenidos, el incremento máximo en la eficiencia global se obtiene con nanofluidos a base de nanopartículas de cobre en una concentración de 4.56 %Vol. Este incremento máximo corresponde a 5.1%.

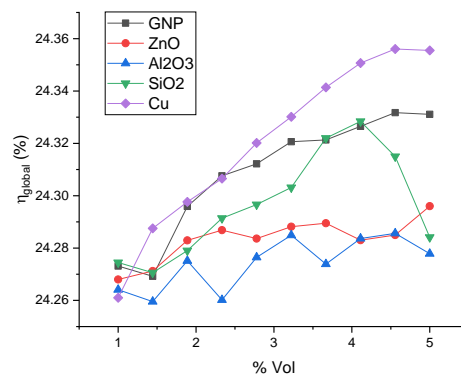


Figura 63.- Eficiencia global del sistema solar-hidrógeno en función de la concentración de nanopartículas

Finalmente, se realizó un estudio de mercado para evaluar el costo de los nanofluidos de acuerdo a la concentración de nanopartículas. Este estudio se realizó con la finalidad de evaluar la relación costo/beneficio de los nanofluidos. De acuerdo a los datos obtenidos, los nanofluidos de menor precio son los nanofluidos de nanoplacas de grafeno, con un valor de 90.65 MXN por litro. Por el contrario, los nanofluidos de mayor valor corresponden a los nanofluidos de cobre, con un valor de 1066.43 MXN por litro. En la Figura 64 se muestran los resultados de este estudio.

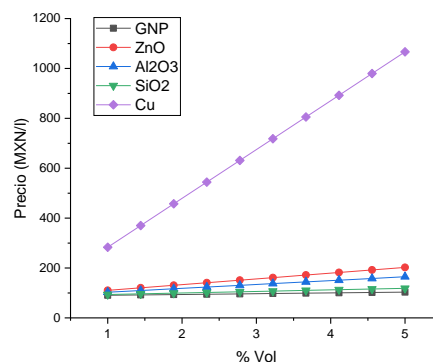


Figura 64.- Precio de los nanofluidos en función de la concentración de nanopartículas.

CAPITULO V

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

En el presente documento se realizó un análisis numérico de un sistema termosolar operado con nanofluidos para producción de hidrógeno. El sistema solar-hidrógeno opera con 5 tipos de nanofluidos, puestos a prueba para evaluar su efecto en la producción de hidrógeno en un electrolizador tipo PEM, el rendimiento de diferentes componentes del sistema y la posible reducción de las dimensiones de un intercambiador de calor.

Primeramente, se llevó a cabo una recopilación, análisis y revisión bibliográfica actualizada acerca de sistemas solar-hidrógeno y nanofluidos. Como resultado del estudio del estado del arte se definió la metodología de simulación del sistema solar-hidrógeno operado con nanofluidos. Además, se propuso un diseño del sistema y sus componentes para ser sometido a simulación en software especializado en resolución de ecuaciones de ingeniería.

Una vez definido el sistema y sus componentes, se establecieron diferentes parámetros, constantes, geometrías y condiciones de operación del sistema. De acuerdo a la bibliografía consultada, se definió un total de 80 ecuaciones que rigen el rendimiento del sistema solar-hidrógeno. Tomando como referencia esas ecuaciones se estableció un método de cálculo del sistema, compuesto de 9 pasos a seguir. En esta metodología se contemplan las propiedades coligativas de la mezcla etilenglicol-agua, las propiedades termodinámicas de esa mezcla, las propiedades termodinámicas de los nanofluidos, y el rendimientos de los equipos que componen el sistema, como el colector solar de canal parabólico, el intercambiador de calor de tubos coaxiales y el electrolizador tipo PEM.

El análisis numérico del sistema contempla la simulación y estudios paramétricos del rendimiento de los equipos en función de la concentración de nanopartículas en los nanofluidos. Los estudios paramétricos tiene la finalidad de validar o refutar la hipótesis planteada la cual expresa que los nanofluidos con base en nanopartículas de nanoestructuras de carbono como el graféno, nanotubos de carbono o nanoplacas de graféno pueden reducir en al menos un 50% las dimensiones del intercambiador de calor de tubos concéntricos del sistema solar-hidrógeno e incrementar la producción de hidrógeno del electrolizador tipo PEM.

De acuerdo a los resultados obtenidos, se llegó a la conclusión que la mezcla adecuada para el fluido base, es decir, la mezcla etilenglicol-agua, corresponde a un 75% etilenglicol y 25% de agua, ya que garantiza en al menos un incremento en el punto ebulloscópico de 30 °C. Este incremento del punto de ebullición del agua favorece a que el nanofluido no cambie de fase y se mantengan sus propiedades y estabilidad de las nanopartículas.

Se obtuvieron las propiedades de los nanofluidos en un rango entre 1 y 5 %Vol. Se observó que los nanofluidos de las partículas más pequeñas como los nanofluidos de cobre y dióxido de silicio, incrementan exponencialmente su viscosidad a partir de 3 %Vol, esta propiedad genera inconvenientes por el incremento de la potencia de bombeo y el rendimiento del fluido en los equipos. Además, este incremento en la viscosidad del fluido provoca que el fluido deje de ser turbulento y se comporte como laminar.

Antes de hacer las pruebas o experimentación con el colector, se realizó una validación del colector solar de canal parabólico, tomando como referencia los datos experimentales del laboratorio nacional SANDIA. De acuerdo al estudio paramétrico realizado en el colector solar de canal parabólico, es posible incrementar la eficiencia térmica del colector en un 9.97% utilizando nanofluidos a base de nanoplacas de grafeno a una concentración de 5 %Vol. A este incremento en la eficiencia le corresponde un incremento en la temperatura máxima a la salida del colector de 126.8°C.

De manera similar, se llevó a cabo un estudio paramétrico en el que se obtuvo el efecto en la concentración de las nanopartículas en la eficiencia térmica del colector solar. De este estudio paramétrico se obtuvo que los nanofluidos de nanoplacas de grafeno muestran la eficiencia máxima del sistema a una concentración de nanopartículas de 2.11 %Vol, obteniendo una eficiencia de 75.02%, la cual es 1.13% mayor, con respecto al agua como fluido de trabajo.

Las temperaturas de salida del colector fueron consideradas como temperaturas de entrada del intercambiador de calor y se evaluó su rendimiento de acuerdo al método ϵ -NTU. La efectividad más alta registrada en este estudio paramétrico corresponde a los nanofluidos a base de dióxido de silicio, con un valor de 63.33% con una concentración de 5 %Vol de nanopartículas. Por el contrario,

el valor más bajo de efectividad corresponde a los nanofluidos a base de cobre, con un valor de 60.19% con una concentración de 5 %Vol de nanopartículas. Este incremento y decremento en la efectividad del intercambiador de calor se debe a la máxima diferencia de temperaturas, es decir, la diferencia de temperaturas entre la entrada de los nanofluidos y la entrada del agua destilada. De igual manera, este efecto se debe a la transferencia de calor efectiva entre los nanofluidos y el agua destilada.

Por otro lado, el número de unidades de transferencia tiene un comportamiento similar, presentando un valor máximo de 1.688 para el dióxido de silicio y un valor mínimo de 1.511 para el cobre, ambos en una concentración máxima de 5 %Vol. Este efecto se debe al incremento y decremento del área de transferencia de calor, que a su vez se verá reflejado en la longitud necesaria del intercambiador de calor de tubos coaxiales.

Con el siguiente estudio paramétrico se logró validar el punto de la hipótesis que establece que el uso de nanofluidos a base de nanoestructuras de carbono puede disminuir en al menos 50% de las dimensiones del intercambiador de calor de tubos coaxiales. El nanofluido que logró un decremento máximo corresponde a los nanofluidos de nanoplacas de grafeno, representando una disminución del 61% con respecto al agua como fluido de trabajo. De igual manera, existen diferentes nanofluidos a cierta concentración de nanopartículas que también pueden lograr la disminución del 50% del intercambiador de calor. La longitud necesaria del intercambiador de calor si se utilizara agua como fluido de trabajo sería de 54.5 m. Por lo tanto, los nanofluidos de cobre y de dióxido de silicio también pueden lograr esa reducción del intercambiador de calor, a partir de una concentración de 2.78 %Vol para el dióxido de silicio y 3.3 %Vol para el cobre.

El siguiente estudio paramétrico evalúa la temperatura de salida del agua destilada del intercambiador de calor. En este estudio se logró obtener que la temperatura máxima a la salida del intercambiador corresponde a 56 °C, generada por los nanofluidos de cobre, incrementando la temperatura 46 °C. Estas temperaturas de salida del intercambiador de calor fueron consideradas como temperaturas del electrolito en el electrolizador para obtener los diferentes estudios del rendimiento del electrolizador tipo PEM.

La siguiente serie de estudios paramétricos consisten de evaluar diferentes variables del electrolizador tipo PEM como el voltaje, la corriente, el volumen de hidrógeno generado, la energía contenida en el hidrógeno y la eficiencia del electrolizador. Las variaciones en cada uno de estas variables con respecto a la concentración de los diferentes nanofluidos fueron insignificantes, sin embargo, el incremento en la temperatura del electrolito logró disminuir en promedio 21 mV el voltaje del electrolizador, con referencia al voltaje de 1.23 V en condiciones estándar. El decremento en el voltaje provocó a su vez un incremento promedio de la corriente entre los electrodos de 1.6%, y a su vez, un incremento en la producción de hidrógeno en 19% con respecto a las condiciones estándar. De esta manera se validó el segundo punto de la hipótesis que establece que los nanofluidos a base de nanoestructuras de carbono son capaces de aumentar la producción de hidrógeno.

Siguiendo con la metodología de análisis, se realizó un estudio paramétrico con la finalidad de evaluar la energía contenida en el hidrógeno generado, y a su vez, evaluar la eficiencia del electrolizador tipo PEM. De este estudio se obtuvo que en condiciones estándar la energía almacenada en el hidrógeno corresponde a 12.02 kJ. Tomando como referencia el valor promedio de este estudio, el uso de nanofluidos como fluido de trabajo en el sistema solar-hidrógeno provoca un aumento en la energía almacenada en el hidrógeno en un 20.25%. De igual manera, en condiciones estándar la eficiencia del electrolizador corresponde a 43.27 %. Tomando como referencia la eficiencia promedio de este estudio, el uso de nanofluidos como fluido de trabajo en el sistema solar-hidrógeno eleva 8.76% la eficiencia del electrolizador tipo PEM.

Finalmente, se evaluó el efecto de la concentración de las nanopartículas en la eficiencia global del sistema solar-hidrógeno, con la finalidad de validar el último punto de la hipótesis, que establece que los nanofluidos a base de nanoestructuras de carbono pueden elevar en al menos 5% la eficiencia global del sistema solar-hidrógeno. El resultado de esta experimentación muestra que en condiciones estándar y agua como fluido de trabajo, el sistema tendría una eficiencia global de 19.26%. De igual manera, el incremento máximo en la eficiencia global que se puede obtener con nanofluidos a base de nanopartículas de nanoplacas de grafeno corresponde a 24.33% en una concentración de 4.56 %Vol. Este incremento máximo corresponde a 5.07%, el cual valida el último punto de la hipótesis.

Adicionalmente, se realizó un estudio de mercado para evaluar la relación costo/beneficio de los nanofluidos. De acuerdo a los datos obtenidos, los nanofluidos de menor precio son los nanofluidos de nanoplacas de graféno, con un valor de 90.65 MXN por litro. Por el contrario, los nanofluidos de mayor valor corresponden a los nanofluidos de cobre, con un valor de 1066.43 MXN por litro. A pesar de que los nanofluidos de cobre son los que presentaron el más alto rendimiento en el sistema solar-hidrógeno, su precio no los hace rentables para esta aplicación. Por el contrario los nanofluidos de nanoplacas de graféno son los más rentables en este estudio, presentando el menor costo en concentraciones altas y uno de los rendimientos más altos del sistema solar-hidrógeno.

Recomendaciones

Se recomienda dar continuidad a la investigación realizada en este estudio con prácticas de laboratorio, experimentación y la validación experimental de los datos obtenidos, así como la divulgación de la ciencia y la tecnología. Además, se recomienda y motiva a los estudiantes de licenciatura y posgrado a adentrarse en temas de investigación y desarrollo relacionados a las aplicaciones de los nanofluidos, las energías renovables y la tecnología sustentable.

Referencias bibliográficas

- [1] Ancona, M. A., Bianchi, M., Branchini, L., De Pascale, A., Melino, F., Peretto, A., Scarponi, L. B. (2017). From solar to hydrogen: Preliminary experimental investigation on a small scale facility. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(33), 20979–20993. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.06.141>
- [2] Herrmann, A., Mädlow, A., & Krause, H. (2019). Key performance indicators evaluation of a domestic hydrogen fuel cell CHP. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(35), 19061–19066. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.06.014>
- [3] Assaf, J., & Shabani, B. (2018). Multi-objective sizing optimization of a solar-thermal system integrated with a solar-hydrogen combined heat and power system, using genetic algorithm. *Energy Conversion and Management*, 164, 518–532. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.026>
- [4] Omar, M. A., & Altinişik, K. (2016). Simulation of hydrogen production system with hybrid solar collector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 41(30), 12836–12841. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.05.166>
- [5] Topriska, E., Kolokotroni, M., Dehouche, Z., & Wilson, E. (2015). Solar hydrogen system for cooking applications: Experimental and numerical study. *Renewable Energy*, 83, 717–728. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.05.011>
- [6] Topriska, E., Kolokotroni, M., Dehouche, Z., Novieto, D. T., & Wilson, E. A. (2016). The potential to generate solar hydrogen for cooking applications: Case studies of Ghana, Jamaica and Indonesia. *Renewable Energy*, 95, 495–509. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.04.060>
- [7] Assaf, J., & Shabani, B. (2016). Transient simulation modelling and energy performance of a standalone solar-hydrogen combined heat and power system integrated with solar-thermal collectors. *Applied Energy*, 178, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.027>
- [8] Blal, M., Belasri, A., Benatillah, A., Hamouda, M., Lachtar, S., Sahouane, N., Mostefaoui, M. (2018). Assessment of solar and wind energy as motive for potential hydrogen production of Algeria country; development a methodology for uses hydrogen-based fuel cells. *International Journal of Hydrogen Energy*, 43(19), 9192–9210. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.200>
- [9] Ural, Z., & Gencoglu, M. T. (2014). Design and simulation of a solar-hydrogen system for different situations. *International Journal of Hydrogen Energy*, 39(16), 8833–8840. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.12.025>
- [10] Koumi Ngoh, S., Ayina Ohandja, L. M., Kemajou, A., & Monkam, L. (2014). Design and simulation of hybrid solar high-temperature hydrogen production system using both solar photovoltaic and thermal energy. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 7, 279–293. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.05.002>
- [11] Jafari, M., Armaghan, D., Seyed Mahmoudi, S. M., & Chitsaz, A. (2019). Thermo-economic analysis of a standalone solar hydrogen system with hybrid energy storage. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(36), 19614–19627. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.195>
- [12] Bamisile, O., Huang, Q., Hu, W., Dagbasi, M., & Kemena, A. D. (2019). Performance analysis of a novel solar PTC integrated system for multi-generation with hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.10.234>
- [13] Saleem, M. S., Abas, N., Kalair, A. R., Rauf, S., Haider, A., Tahir, M. S., & Sagir, M. (2019). Design and optimization of hybrid solar-hydrogen generation system using TRNSYS. *International Journal of Hydrogen Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.05.188>
- [14] Yuksel, Y. E., Ozturk, M., & Dincer, I. (2019). Energetic and exergetic assessments of a novel solar power tower based multigeneration system with hydrogen production and liquefaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 44(26), 13071–13084. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.03.263>

- [15] Siddiqui, O., Ishaq, H., & Dincer, I. (2019). A novel solar and geothermal-based trigeneration system for electricity generation, hydrogen production and cooling. *Energy Conversion and Management*, 198,111812. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111812>
- [16] Allouhi, A., Benzakour Amine, M., Saidur, R., Kousksou, T., & Jamil, A. (2018). Energy and exergy analyses of a parabolic trough collector operated with nanofluids for medium and high temperature applications. *Energy Conversion and Management*, 155, 201–217. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.10.059>
- [17] Peng, H., Guo, W., & Li, M. (2019). Thermal-hydraulic and thermodynamic performances of liquid metal based nanofluid in parabolic trough solar receiver tube. *Energy*, 116564. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116564>
- [18] Toghyani, S., Afshari, E., Baniasadi, E., & Shadloo, M. S. (2019). Energy and exergy analyses of a nanofluid based solar cooling and hydrogen production combined system. *Renewable Energy*, 141, 1013–1025. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.073>