

ACADEMIA JOURNALS



OPUS PRO SCIENTIA ET STUDIUM

Humanidades, Ciencia, Tecnología e Innovación en Puebla

ISSN 2644-0903 online

Vol. 4. No. 1, 2022

www.academiajournals.com

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN AUSPICIADO POR EL
CONVENIO CONCYTEP-ACADEMIA JOURNALS



Gobierno de Puebla

Hacer historia. Hacer futuro.



**Secretaría
de Educación**
Gobierno de Puebla

CONCYTEP
Consejo de Ciencia
y Tecnología del Estado
de Puebla

I.Q. Henoc Flores Sánchez

Dinámica en la Eficiencia Energética de una Turbina de Gas Sujeta a Combustión Asistida por Adición de Hidrógeno Solar

Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Directores de Tesis: Dra. Mayra Ruiz Reyes

Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Comité Revisor

President: Dr. Álvaro Sampieri Croda

Secretaria: Dra. Nelly Ramírez Corona

Vocal: Mayra Ruiz Reyes

Vocal: Francisco Manuel Pacheco Aguirre

Número de Secuencia 4-1-7



Benemérita Universidad Autónoma de Puebla

Facultad de Ingeniería Química



DINÁMICA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA
TURBINA DE GAS SUJETA A COMBUSTIÓN ASISTIDA POR
ADICIÓN DE HIDRÓGENO SOLAR

PRESENTA

I.Q. HENOC FLORES SÁNCHEZ

Para obtener el grado en
MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

DIRECTORES DE TESIS
DRA. MAYRA RUIZ REYES
DR. FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

COMITÉ REVISOR
PRESIDENTE: DR. ÁLVARO SAMPIERI CRODA
SECRETARIA: DRA. NELLY RAMÍREZ CORONA
VOCAL: MAYRA RUIZ REYES
VOCAL: FRANCISCO MANUEL PACHECO AGUIRRE

H. Puebla de Zaragoza Aprobada el 1 de Julio de 2021

DINÁMICA EN LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE UNA TURBINA DE GAS SUJETA A COMBUSTIÓN ASISTIDA POR ADICIÓN DE HIDRÓGENO SOLAR

HENOC FLORES SÁNCHEZ

Resumen

La turbina de gas es una turbomáquina diseñada para utilizar la energía aportada por los gases que salen de una cámara de combustión a alta presión y muy altas temperaturas, dichos gases al chocar contra los alabes de la turbina de expansión provocan su giro, este giro es aprovechado para mover un generador y producir electricidad o provocar un impulso utilizado para mover un objeto. Las turbinas de gas son usadas comúnmente en ciclos de potencia, en donde, el objetivo es lograr el máximo rendimiento de trabajo con el mínimo requerimiento de combustible. La aparición de las centrales térmicas de ciclo combinado y la exigencia de mayores potencias, rendimientos, disponibilidad y fiabilidad han hecho de la turbina de gas uno de los equipos en los que se centra una gran parte de la investigación dirigida a la generación de energía a partir de combustibles fósiles. Aunado a esto, la posibilidad de hibridación con energías renovables (solar-térmica) y nuevos ciclos basados en el Hidrógeno o el Helio conlleva al continuo desarrollo tecnológico de estas turbomáquinas.

En el presente trabajo de tesis se busca determinar la flexibilidad teórica en la operación de una turbina de gas sujeta a combustión asistida por adición de hidrógeno proveniente de un electrolizador experimental alimentado con energía solar. Para ello, en una primera etapa se modificó el modelo de simulación del ciclo de potencia reportado por Muñoz Cora et. al. (2018) en el cual se trabajó un modelo de simulación en ASPEN PLUS de un ciclo de potencia convencional acoplando la tecnología de combustión asistida con lo cual se analizó el rendimiento termodinámico en relación a los sistemas convencionales en estado estacionario. Debido a la naturaleza intermitente de la energía solar, la producción de hidrógeno presenta un comportamiento oscilatorio, por lo que se caracterizó la dinámica del proceso considerando como perturbación externa la disponibilidad de hidrógeno en el sistema. Para ello se desarrolló un modelo matemático que describa la dinámica de variación de la radiación solar característica de la zona Metropolitana de Puebla, dicho modelo se programó en una subrutina en Fortran para ser acoplada en análisis de sensibilidad en ASPEN PLUS. Ante las variaciones en la concentración de hidrógeno (perturbaciones) se realizaron análisis de sensibilidad para determinar los rangos de ajuste de las condiciones de operación del ciclo de potencia con el fin de lograr una eficiencia dentro de un rango marginalmente estable. A partir de los datos obtenidos se generó un modelo que describe la correlación entre la proporción $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Aire}$, la temperatura del sistema de reacción y la eficiencia energética.

Agradecimientos

A la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, a la Facultad de Ingeniería Química de la misma y al cuerpo que integra el posgrado en Ingeniería Química, por proveer los espacios propicios para mi desarrollo personal y profesional.

A la Dra. Mayra Ruiz Reyes, por la dirección, revisión y apoyo en la realización de este trabajo. Por los consejos y puntos de vista amplios y acertados acerca del trabajo y cuestiones de vida diaria. Por su increíble paciencia y determinación. Por las incontables horas que pasó frente a la pantalla debido al trabajo. Además de su trabajo docente destacable e inigualable.

Al Dr. Francisco Manuel Pacheco Aguirre, por la codirección y apoyo al trabajo realizado. Por su paciencia. Por las palabras precisas en el momento indicado.

A la Dra. Nelly Ramírez Coronal, por su apoyo y disposición en la revisión del trabajo.

Al Dr. Álvaro Sampieri Croda, por sus aportaciones en la revisión de la tesis y por su trabajo de docencia destacable.

A la VIEP - BUAP, por el apoyo otorgado al área de investigación y a los posgrados de la universidad.

Al CONACYT, por permitir integrarme al programa de posgrado y avanzar académicamente, por la beca de posgrado y administración eficiente.

Dedicatorias

A mi madre, padre y hermano, por su amor incondicional, por su apoyo, por sus consejos, su paciencia y por su ejemplo que día a día me motivan a mejorar en cada aspecto.

A mis amigos: Betty, Diana, Enrique, Ismael, Israel y Hugo que de una manera incuestionable han forjado parte de mi vida y que con su compañía han hecho valer el trayecto hasta este punto. Por su amistad y por llenar mi vida de grandes momentos.

A Karla, Graciela, Octavio, Nallely, Mariana y todos y cada uno de mis compañeros de Maestría, que inconscientemente me han apoyado con su ejemplo y con su amistad, que con “simples” palabras logran inspirarme y motivarme.

A Bere, por todo el amor y el apoyo desinteresado que me brinda y está dispuesta a brindar, por las sabias palabras de aliento y miradas de paz que sigo necesitando, por el ejemplo de trabajo y determinación para cumplir metas, por estar en todo momento y por siempre recordarme que hay razones para avanzar.

Gracias.

CONTENIDO

Resumen	i
Capítulo 1	1
Introducción.....	1
1.1 Generalidades	2
1.2 Planteamiento del problema	3
1.3 Justificación.....	4
1.4 Hipótesis.....	5
1.5 Objetivo general	5
1.6 Objetivos específicos.....	5
Capítulo 2	6
Antecedentes.....	6
2.1 Antecedentes	7
2.2 Generación de energía eléctrica.....	9
2.3 Ciclo de potencia combinado	10
2.4 Tecnología de turbinas de gas para una combustión rica en hidrógeno	12
2.5 Combustión asistida.....	13
2.6 Modelación de sistemas térmicos con turbina para generación de electricidad.....	14
Capítulo 3	17
Metodología.....	17
3.1 Modelación ciclo de potencia sujeto a la combustión asistida de CH ₄ con H ₂ , en modo de intercambio	18
3.1.2 Modelación del sistema de reacción.....	19
3.1.4 Modelación de etapa de expansión y compresión	21
3.2 Modelación la producción de Hidrógeno Solar y acoplar el modelo al ciclo de potencia. .	23
3.2.2 Modelación de la operación del panel fotovoltaico.....	24
3.3 Cálculo de la eficiencia del proceso	27

Capítulo 4	29
Resultados.....	29
4.1 Modelación ciclo de potencia sujeto a la combustión asistida de CH ₄ con H ₂ , en modo de intercambio	30
4.2 Secuencia de cálculo para la modelación de la Producción de Hidrógeno Solar teórico...33	
4.3 Modelación celda fotovoltaica	41
4.4 Simulación del ciclo de potencia.....	45
4.5 Análisis de estabilidad.....	52
Capítulo 5	63
Conclusiones.....	63
Bibliografía.....	66

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Tipo de energía empleada para la producción de electricidad en 2010 (Participación porcentual) Fuente: World Energy Balances 2012, Extended Energy Balances, IEA, 2012.	8
<i>Figura 2.2 Ciclo de potencia combinado gas-vapor</i>	11
Figura 2.3 Diagrama de flujo de ciclo de potencia propuesto por Muñoz Cora, et al. (2018)..	16
Figura 3.1 Secuencia de cálculo para la relación aire-combustible.....	22
Figura 3.2 Ubicación de la estación de monitoreo de SIVEA.....	25
Figura 3.3 Diagrama de Flujo de la secuencia de cálculo.	28
Figura 4.1 Diagrama de flujo del Ciclo de Potencia.....	32
Figura 4.2 Validación de la simulación	33
Figura 4.3.Rango de variación y media por día durante el periodo muestreado	34
Figura 4.4 Comportamiento de la radiación en la 1° semana de abril 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos	35
Figura 4.5 Comportamiento de la radiación en la 3° semana de octubre 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos	35
Figura 4.6 Comportamiento de la radiación en la 1° semana de abril 2020 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos	35
Figura 4.7 Comportamiento de la temperatura en la 1° semana de abril 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos	36
Figura 4.8 Comportamiento de la temperatura en la 3° semana de octubre 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos	36
Figura 4.9 Comportamiento de la temperatura en la 1° semana de abril 2020 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos	36

Figura 4.10 Datos de radiación solar compilados de 170 días	37
Figura 4.11 Ajuste de Radiación solar del 11 de abril de 2019.....	38
Figura 4.12 Ajuste de Radiación Solar del 21 de octubre de 2019.	38
Figura 4.13 Ajuste de Radiación solar del 16 de abril de 2020.....	39
Figura 4.14 Ajuste de la Temperatura ambiente del 11 de abril de 2019.....	40
Figura 4.15 Ajuste de la Temperatura ambiente del 21 de octubre de 2019.....	40
Figura 4.16 Ajuste de la Temperatura ambiente del 16 de abril de 2020.....	40
Figura 4.17 Algoritmo de solución para el cálculo de I-V de la fotocelda.....	42
Figura 4.18 Curva del modelo I-V y P-V de un sistema de fotoceldas prueba	43
Figura 4.19 Curva I-V de un día promedio	44
Figura 4.20 Comportamiento de la radiación e hidrógeno generado en un día promedio	45
Figura 4.21 Comportamiento de la radiación e hidrógeno generado en un día promedio	46
Figura 4.22 Incidencia de radiación solar y producción de hidrógeno sujeto a la curva de desempeño I-V del reactor electrolítico.....	47
Figura 4.23 Temperatura de la corriente producto del reactor de REAC-H ₂ y Eficiencia del ciclo a ϕ_{CH_4} de 0.2 a 0.4 en incrementos de 0.05 y un ϕ_{H_2} de 0.06.....	48
Figura 4.24 Temperatura de las corrientes productos de los reactores un ϕ_{CH_4} de 0.2 a 0.4 en incrementos de 0.05 y un ϕ_{H_2} de 0.06.....	49
Figura 4.25 Entalpía de las corrientes de entrada y salida en turbinas TCH ₄ y TH ₂	50
Figura 4.26 Eficiencia del proceso a temperatura variable en la operación de la celda electrolítica.	51
Figura 4.27 Eficiencia vs ϕ_{H_2} , ϕ_{CH_4} , del proceso a temperatura variable en la operación de la celda electrolítica.....	51

Figura 4.28 Eficiencia vs ϕ_{H_2} , ϕ_{CH_4} , del proceso a temperatura variable en la operación de la celda electrolítica.....	52
Figura 4.29 Curvas de respuesta de Radiación (RAD), Corriente de la celda (I), Hidrógeno producido (H ₂).	53
Figura 4.30 Efecto de $\phi_{CH_4}=0.05, 0.1, 0.2$ y $\phi_{CH_2}=0.1$ en la eficiencia y temperatura del sistema de reacción.	60
Figura 4.31 Efecto de $\phi_{CH_4}=0.05, 0.1, 0.2$ y $\phi_{CH_2}=0.05$ en la eficiencia y temperatura del sistema de reacción.	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Rangos del índice de Wobbe	12
Tabla 2.2 Reacciones de combustión	13
Tabla 3.1.-Valores optimizados de los parámetros cinéticos para el catalizador de Pt-Pd fresco y tratado con vapor, Abbasi, et al. (2012)	20
Tabla 3.2.- Parámetros del catalizador (Abbasi, et al., 2012)	20
Tabla 4.1 Parámetros de ajuste de la Radiación Solar, la media y la desviación estándar.....	39
Tabla 4.2 Parámetros de ajuste de la Temperatura, media y la desviación estándar.....	41
Tabla 4.3 Valores empleados para la modelación de las curvas I-V y P-V	42
Tabla 4.4 Datos de Incidencia de radiación solar empleado para la curva I-V de la Figura 4.19	44
Tabla 4.5 Parámetros del Panel Solar y del reactor electrolítico.....	47
Tabla 4.6 Curvas de respuesta de la eficiencia, en operación a altas temperaturas.....	53
Tabla 4.7 Análisis de la curva de respuesta $\phi_{H_2}=0.1$, $\phi_{CH_4}=0.05$	54
Tabla 4.8 Análisis de la relación Eficiencia/ FH_2 para la condición $\phi_{H_2}=0.1$, $\phi_{CH_4}=0.05$	55
Tabla 4.9 Análisis de la curva de respuesta $\phi_{H_2}=0.1$, $\phi_{CH_4}=0.2$	57
Tabla 4.10 Análisis de la curva de respuesta $\phi_{H_2}=0.06$, $\phi_{CH_4}=0.2$	58
Tabla 4.11 Análisis de la relación de señales Input= FH_2 , output=Eficiencia para el sistema $\phi_{CH_4}=0.05$, $\phi_{CH_2}=0.06$	61

Capítulo 1

Introducción

1.1 Generalidades

Uno de los principales usos de los combustibles es la producción de electricidad, en donde el carbón es su principal fuente de energía, sin embargo, actualmente es reemplazado cada vez más por el gas natural, las energías renovables y la energía nuclear (U.S. Energy Information Administration, 2017). Si bien se han generado nuevas fuentes de energía limpia, el desarrollo de tecnología con las cuales podemos aprovecharlas todavía es limitado aunado al hecho de que las fuentes renovables de energía son intrínsecamente intermitentes Martínez (1992). Debido a esto, el consumo de combustibles fósiles sigue en aumento. La IEO2017 (International Energy Outlook 2017) ha reportado que, el consumo de energía en los países que no pertenecen a la OCDE (Organization for Economic Cooperation and Development) aumentará un 41% entre 2015 y 2040, en contraste con un aumento del 9% en los países de la OCDE, indicando que no solo no disminuye el uso de combustibles fósiles como fuente primaria, sino que aumenta ligeramente con el paso del tiempo, por lo que es indispensable continuar con la evolución energética haciendo uso de nuevas fuentes de energía limpias y vectores energéticos sustentables como el hidrógeno U.S. Energy Information Administration, (2017); Ursúa, et al., (2012)

En México, la energía eléctrica es producida mayormente en plantas de ciclo combinado empleando como fuente de energía la combustión de combustibles fósiles. La combustión de combustibles fósiles, promueve las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Es por ello que en 1997 se estableció el Protocolo de Kioto con el fin mitigar los efectos del cambio climático reduciendo las cantidades de GEI liberadas en la atmósfera. En los últimos años se ha incrementado el interés de la investigación dirigida a la producción de energía verde ya sea como fuente principal de energía o auxiliar (Hara, 2013; SEMARNAT, et al., 2013; SENER, 2009; Venkata, et al., 2007; Davis, et al., 2007). En nuestro país, dentro de las principales líneas de acción para reducir las emisiones de GEI se encuentran: (1) Promover el uso de combustibles no fósiles, (2) Promover la eficiencia energética y cogeneración de

energía y (3) Impulsar la investigación, desarrollo y adecuación para México de tecnologías avanzadas de generación y uso de energía renovable.

En el presente trabajo se pretende realizar el análisis basado en simulación de sistemas no convencionales de producción de electricidad con el objetivo de establecer las bases teóricas para el desarrollo y adaptación de un ciclo de potencia para la producción de energía eléctrica a partir de la combustión de hidrógeno obtenido a partir de un electrolizador alimentado con energía solar.

1.2 Planteamiento del problema

En 2015 aproximadamente el 46 % del consumo energético de EE. UU. se generó a partir de petróleo o sus derivados líquidos, el 40 % del gas natural, 7 % del carbón, 4 % de hidroeléctrica y 1 % de la energía nuclear según Lin y Benjamin (2018). En México el 80 % de la energía eléctrica es generada a partir de la combustión de combustibles fósiles reportado por SEGOB (2010), y esta tendencia es similar en la mayoría de los países a nivel mundial lo que conlleva al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, siendo México y Brasil los países que más emisiones de CO₂ producen en América Latina de acuerdo con datos del Banco Mundial (2014).

Debido a la emisión continua de gases nocivos al ambiente se ha optado por el uso de energías renovables que eliminen el uso de combustibles fósiles, sin embargo, la tecnología con la cual es posible el aprovechamiento de éstas aún no está completamente desarrollada, lo que dificulta su completa distribución y aplicación a corto plazo reportado por Lilik, et al. (2010). Por lo que surge la necesidad de optimizar los procesos y/o evaluar diferentes arreglos que permitan su transición hacia el uso de energías más limpias mediante la descarbonización de combustibles, empleo de nuevos vectores energéticos o combinación de fuentes de energías renovables.

En este sentido, si una planta de energía térmica es diseñada con base a un funcionamiento ideal la integración de energías renovables al sistema implica el estudio fenomenológico y desarrollo de bases de diseño para su adecuado funcionamiento en condiciones de carga fuera de diseño debido a la fluctuación del suministro de energía, así como a las perturbaciones propias de las fuentes de energía renovables integradas al sistema.

1.3 Justificación

Por lo general, una planta de turbina de gas con combustión interna, funciona en "circuito abierto", en donde el estado final no corresponde al estado inicial, sin embargo, su desempeño a menudo se evalúa tratándolo como equivalente a una planta de energía cíclica cerrada. El uso de hidrógeno solar como vector energético conlleva a múltiples beneficios, dentro de los que se destaca la posibilidad de generar un escenario energético cerrado, aunado a la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), sin embargo, para su implementación es necesario evaluar la flexibilidad del sistema con el fin de determinar rangos operativos que maximicen la estabilidad en la eficiencia del proceso ante fluctuaciones en el suministro del vector energético (hidrógeno). Debido a la complejidad de los procesos involucrados en la operación de una turbina de gas, el desarrollo de modelos que puedan ser utilizados para estudiar la dinámica del sistema permitirá entender la fenomenología de los procesos híbridos para evaluar el límite de carga mínima, así como realizar síntesis de diseño de sistemas de control. Por el que, en el presente trabajo de tesis, se busca estudiar los factores que contribuyan a la adaptación de tecnología actual para su transición hacia el uso de fuentes de energías alternas como el hidrógeno solar y generar una línea base para la síntesis de sistemas de control.

1.4 Hipótesis

La evaluación de la dinámica de variación en la eficiencia de una turbina de gas en un ciclo de potencia con combustión asistida por adición de hidrógeno producido en un electrolizador alimentado con energía solar permite generar líneas base para el diseño de sistemas de control ante el comportamiento oscilatorio en la producción de hidrogeno solar.

1.5 Objetivo general

Evaluar la dinámica de variación en la eficiencia de una turbina de gas en un ciclo de potencia con combustión asistida por adición de hidrógeno producido en un electrolizador alimentado con energía solar.

1.6 Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo de simulación en Aspen Plus de un ciclo de potencia sujeto a la combustión asistida de CH_4 con H_2 , en modo de intercambio.
2. Modelar la producción de Hidrógeno Solar y acoplar el modelo al ciclo de potencia.
3. Evaluar la estabilidad en la eficiencia de turbina de gas en base al principio de estados cuasi-estacionarios.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1 Antecedentes

El aumento gradual de la demanda energética en el mundo junto con la posible escasez de combustibles fósiles y la preocupación por el medio ambiente ha impulsado el desarrollo de líneas de investigación dirigidas a la generación y uso de energías limpia según Kyriakopoulos, et al. (2016), Lilik, et al. (2010), y Taweekun, et al. (2019), con el fin de mitigar la emisión de GEI y contribuir a la diversificación de la matriz de generación de energía eléctrica.

Dentro de los países que utilizan de manera más intensiva las energías renovables para la generación de electricidad se encuentran: Islandia, Noruega, Paraguay, Colombia, Brasil y Canadá, por mencionar algunos, que van desde 100% hasta 61% de participación. En contraste, los que presentan la menor participación de estas tecnologías entre 0% y 9% son Arabia Saudita, Israel, Argelia, Sudáfrica, Corea del Sur y Australia (ver Figura 2.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) en donde su principal fuente de energía es Gas Natural y Carbón de acuerdo con IEA (2012). La participación de las energías renovables depende de varios factores, entre ellos: los tamaños de las economías y el grado de avance en las tecnologías de generación, distribución y uso.

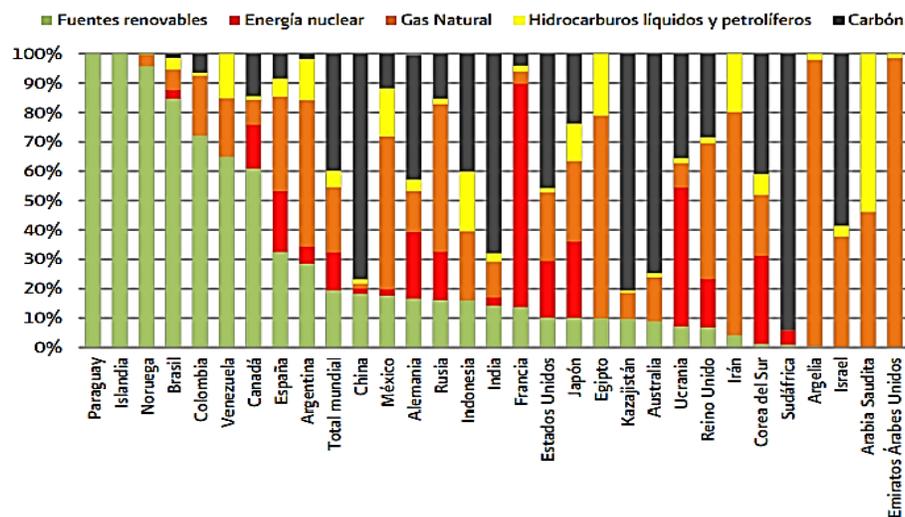


Figura 2.1 *Tipo de energía empleada para la producción de electricidad en 2010 (Participación porcentual) Fuente: World Energy Balances 2012, Extended Energy Balances, IEA, 2012.*

En México, la principal fuente de energía para la generación de electricidad es el Gas Natural, por lo que una de las prioridades del sector energético es la transición energética rumbo a la generación y consumo de energía más limpias. La Estrategia Nacional de Energía 2012-2026, establece que la generación eléctrica a partir de energías limpias debe alcanzar una participación de 35% de la generación total en 2026. Sin embargo, los costos de generación de estas tecnologías aún resultan elevados en comparación con otras fuentes de energía por lo que una de las alternativas es la adaptación de la tecnología actual en la implementación de nuevas fuentes de energía o vectores energéticos.

Tomando como base que la mayor parte de la tecnología instalada para la generación de electricidad está basada en quema de combustibles fósiles (Petróleo), la optimización del sistema de combustión es de actual interés. Por lo que, la búsqueda de un sustituto con capacidades similares a las del petróleo que permita mantener los niveles de desarrollo de la sociedad es una de las líneas de investigación para promover el uso de energía limpia. El índice de Wobbe (IW) se utiliza comúnmente en la industria de servicios públicos y transporte de gas para la intercambiabilidad de combustibles gaseosos en un quemador. Los sistemas de combustión generalmente están diseñados para funcionar con solo una pequeña modificación dentro de la misma categoría del IW del combustible. El hidrógeno tiene IW similar al metano, por lo que diversos estudios han reportado que el uso de H₂ y CH₄ en motores o turbinas de gas no requiere de modificaciones significativas. Es por ello que, H₂ es el elemento que se considera puede cumplir en las próximas décadas con una función similar a la que por mucho tiempo ha cumplido el petróleo según Marchenko y Solomin (2015). Las principales materias primas utilizadas para obtener hidrógeno se derivan de combustibles fósiles, como el gas natural, así como, carbón vegetal, el biogás, el agua, el etanol, el glicerol, entre otros reportado por Ahn et. al. (2018), Konnov (2008) y Lin y Benjamin (2018). Ya que muchas de las ventajas del uso del hidrógeno pueden quedar anuladas en función del procedimiento

empleado en su obtención es necesario que su producción sea sostenible y por ende debe partir de compuestos elementales y abundantes como el agua o el metano.

Por lo anterior, el considerar el agua como materia prima para obtener hidrógeno a través del proceso de electrólisis se convierte en una alternativa viable. Esta ruta se vuelve favorable, especialmente cuando se combina con otros procesos de generación de energía limpia, ya sea hidroeléctrica, solar o eólica según Kumat et. al. (2016), sin embargo su comportamiento intermitente resta estabilidad tanto en la producción como en el consumo de energía reportado por Soria Moratilla y Linares Hurtado (2007).

2.2 Generación de energía eléctrica

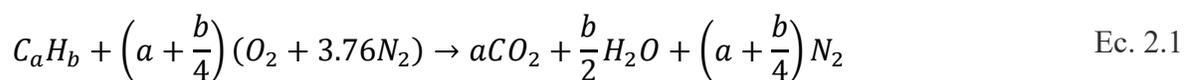
A nivel mundial se estima una producción anual de 23,617 TWh de energía eléctrica según reporta la CIA World Factbook (2018), siendo México el país que presenta la posición número 13 con una producción de 283 TWh y cuyo consumo bruto anual de energía eléctrica presenta un crecimiento de 2.6 %, basado en el comportamiento de los 10 años anteriores reportados por PRODESEN (2017).

La producción de energía eléctrica a partir de fuentes primarias se puede llevar a cabo mediante: (1) tecnologías no térmicas, como las hidroeléctrica o sistemas eólicos en donde los motores son impulsados por marea o viento respectivamente; (2) tecnologías térmicas, las cuales pueden o no presentar el uso de turbinas, motor stirling o los ciclos de potencia combinado respectivamente, en donde la electricidad es generada a partir de la combustión de combustibles fósiles como fuente de energía primaria de acuerdo a Kumar et. al. (2016).

En México, de la producción bruta total de energía eléctrica el 69.07% se obtiene principalmente en centrales termoeléctricas (177,792,629.303 MWh) siendo los ciclos combinados la tecnología mayormente empleada (SENER, 2017). En el 2017 Puebla presentó una producción de energía eléctrica de 4.38 TWh anual, lo que representa el 1.7 % a nivel nacional de acuerdo a lo reportado por SENER, lo que sitúa a la entidad federativa en el

puesto 19 en producción de electricidad. Así mismo, SENER reporta que en 2016 se destinaron para la generación de energía eléctrica aproximadamente 6 525 213 miles de litros de combustóleo, 473 000 miles de litros de Diesel, 16 233 545 toneladas de carbón y 16,016,786 miles de metros cúbicos de gas natural, es decir, un aproximado de 11 532 086 toneladas de combustible destinadas a la generación de electricidad mediante ciclos combinados.

Actualmente, en la producción de energía eléctrica la combustión desarrolla un rol indispensable por lo que su estudio es una de las líneas de investigación en la optimización de sistemas térmicos para la generación de energía reportado por Kumar, et al. (2016) y Giorio, et al. (2019) En estos sistemas, la combustión es el proceso en el que una mezcla de hidrocarburos al interactuar con un agente oxidante se desprende una gran cantidad de luz y calor, arrojando como productos principales CO, CO₂, H₂O; si el combustible contiene azufre se obtiene SO_x o si se desarrolla a temperaturas mayores a los 1700K NO_x, dichos productos forman parte de las gases de efecto invernadero (GEI). La reacción general de combustión completa se muestra a continuación en la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, según Heywood (1988).



Por lo que, uno de los objetivos en la búsqueda de minimizar la producción de GEI es la búsqueda de la descarbonización del combustible, con el fin de minimizar la producción de CO y CO₂.

2.3 Ciclo de potencia combinado

Debido a los progresivos esfuerzos por aumentar la eficiencia de los ciclos individuales se han desarrollado modificaciones importantes que proponen la implementación de un ciclo

de potencia de gas (Brayton) como primera etapa, que completa a un ciclo de potencia de vapor (Rankine) como segunda etapa, a esto se le llama ciclo combinado de gas y vapor, estas etapas se pueden observar en la Figura 2.2 *Ciclo de potencia combinado gas-vapor*.

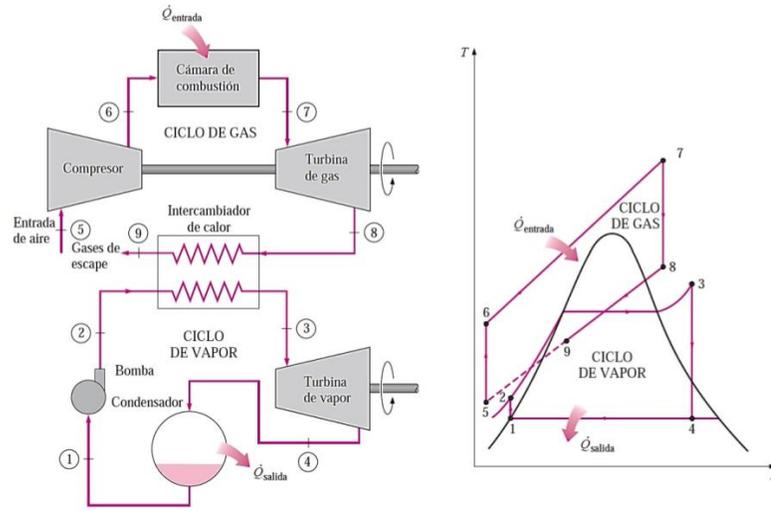


Figura 2.2 *Ciclo de potencia combinado gas-vapor*

Generalmente los ciclos se pueden clasificar como ciclos “topping” y “bottoming”. El ciclo topping hace referencia a la primera etapa del ciclo combinado en la cual se produce la mayor cantidad de carga térmica, el calor residual que se produce posteriormente se utiliza en una segunda etapa que opera a una menor temperatura y a esta parte del ciclo se le denomina bottoming. En donde la eficiencia del ciclo combinado puede ser calculada mediante la Ec. 2.2:

$$\eta_{th} = \frac{W_{turbina} - W_{compresor}}{Q_{entrada}} \tag{Ec. 2.2}$$

Para aumentar la eficiencia termodinámica de cualquiera de estos ciclos es necesario reducir las pérdidas de energía a lo largo del proceso y esto se puede lograr al aumentar la

temperatura máxima en el ciclo o bien liberando el calor residual a la temperatura más baja posible. El interés por los ciclos combinados surge de estas dos consideraciones ya que por su naturaleza ningún ciclo puede hacer ambas mejoras de forma individual por lo que al combinar ambos ciclos se obtiene un ciclo con altas temperaturas del proceso y el otro con temperaturas residuales bajas. El aprovechamiento energético de las corrientes de proceso para minimizar el uso de servicios auxiliares o iniciación de la ignición del combustible (integración energética), así como la combinación de combustibles (combustión asistida) es una de las técnicas de optimización de estos sistemas.

2.4 Tecnología de turbinas de gas para una combustión rica en hidrógeno

Recientemente, muchos fabricantes de turbinas de gas han propuesto soluciones para el uso de hidrógeno en sus productos en respuesta al creciente interés en este combustible. Un indicador común de las características del combustible y su capacidad de intercambio en el desarrollo de turbinas de gas y sistemas térmicos de energía, es el Índice de Wobbe (IW) según Taamallah, et al. (2015).

Los sistemas de combustión generalmente están diseñados para funcionar con solo una pequeña modificación dentro de la misma categoría o rango del Índice Wobbe del combustible (Ver Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Rangos del índice de Wobbe

Categoría del combustible	Rango del Índice Wobbe (MJ/Nm ³)
Gas de síntesis	24-29
Gas natural	48-53
Gas LP	72-87

Metano	47-53
Hidrogeno	40-48
Monóxido de carbono	13

La Tabla 2.1; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** muestra los valores de IW para combustibles puros como el hidrógeno, CO y CH₄. Como se observa el hidrógeno tiene IW similar al metano. Por lo que, estudios han reportado que la adición de hidrógeno al gas natural no requiere mayor modificaciones a la configuración de motores siempre que el Índice Wobbe esté dentro del rango 30–50 MJm⁻³ reportado por Taamallah, et al. (2015). Aunque el IW es ampliamente utilizado en el estudio y caracterización del desempeño de turbinas de gas al quemar combustibles en diferentes composiciones en la cámara de combustión, el índice de Wobbe no refleja los cambios en las velocidades de combustión y otras propiedades críticas del sistema, por lo que el continuo estudio de la fenomenología del sistema es indispensable.

2.5 Combustión asistida

En la combustión puede emplearse un agente externo para encender mezclas de combustible y aire, con la finalidad de disminuir la cantidad de energía necesaria para la ignición, lo dicho es conocido como combustión o ignición asistida. En particular es posible utilizar hidrógeno para este proceso debido a que la temperatura de combustión del hidrógeno es más alta en comparación con la de combustibles como metano y propano como se puede ver en las ecuaciones Ec. 2.3, Ec. 2.4 y Ec. 2.5 de la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Reacciones de combustión

Reacción	Calor de reacción	Calor por unidad de masa
----------	-------------------	--------------------------

	(KJ/mol)	(KJ/g)	
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow 1CO_2 + 2H_2O$	-801.9	-50.12	Ec. 2.3
$C_3H_8 + 5O_2 \rightarrow 3CO_2 + 4H_2O$	-2043.1	-46.33	Ec. 2.4
$H_2 + 0.5O_2 \rightarrow H_2O$	-241.6	-120.80	Ec. 2.5

Dentro de los diferentes procedimientos para llevar a cabo la ignición se distinguen principalmente dos mencionadas por Chen et. al. (2015):

1.- Alimentación conjunta: En este método la alimentación de hidrógeno, combustible y aire, sucede de manera simultánea hasta lograr el encendido del combustible, después de este punto el flujo de hidrógeno es suspendido mientras que los flujos de combustible y aire son aumentados hasta lograr una velocidad de flujo total constante.

2.- Modo de intercambio: En este método es precalentado el sistema de reacción usando la combustión del hidrógeno hasta alcanzar la temperatura de ignición del combustible momento en el cual es alimentado el combustible al proceso y se cierra la alimentación de hidrógeno. La alimentación del combustible puede ser aumentado hasta alcanzar un flujo constante deseado.

2.6 Modelación de sistemas térmicos con turbina para generación de electricidad

Los estudios basados en simulación o modelación de plantas de ciclos de potencia tienen como objetivos principales la evaluación de la eficiencia térmica de diferentes arreglos empleando como principal fuente energética el carbón, en donde factores como la temperatura del agua de entrada en el generador de vapor y variación de la presión en la cámara de combustión han sido analizados (Kumar, et al., 2016; Chaudhry, et al., 2018), así como también condiciones de operación de los componentes de la planta de energía, tamaño de la

instalación, composición en las alimentaciones frescas y potencia de salida (M, M, et al., 2016; Darabi, et al., 2015).

Algunos estudios han analizado las variaciones de generación eléctrica junto con el rendimiento térmico al utilizar diferentes fluidos de trabajo, como refrigerantes, dentro de un ciclo de potencia, he incluso se ha propuesto el empleo de gas natural descarburado como combustible en un ciclo de potencia donde se analiza la eficiencia energética alcanzada. Con el fin de evaluar la dinámica de una central eléctrica se han desarrollado modelos basados en Simulink para cada uno de los componentes individuales que intervienen en el ciclo de potencia, considerando el uso de gas natural como combustible, aproximando el comportamiento del combustor a las características que presenta un reactor de tanque completamente agitado (CSTR), en operación estable respecto al flujo másico de entrada y salida (iguales), considerando mezclado instantáneo en la alimentación al reactor (Rowshanaie, et al., 2015). Incluso, se ha realizado el análisis basado en simulación de tecnologías que se encuentra en estado emergente como ciclos basados en el uso de energía solar, se han dirigido al estudio de factores como área de contacto, flujo de energía solar y propiedades de fluidos de trabajo en relación a la eficiencia energética del proceso (Baral, et al., 2015; Spayde, et al., 2017).

En el trabajo desarrollado por Muñoz Cora, et al. (2018) se presenta el diseño preliminar de un ciclo de potencia híbrido para la generación de energía eléctrica a partir de la combustión asistida de CH_4 con H_2 en modo de intercambio (Figura 2.3). Su estudio se basó en el análisis por simulación de dos turbinas, en las cuales se usó hidrógeno y metano por separado, cada una de de las turbinas fue modelada en Aspen Plus y validada a partir de datos reportados en la literatura, con esto se estudia las temperaturas máximas y mínimas alcanzadas, determina la cantidad de NO_x producidos, analiza la potencia y el trabajo desarrollado. El trabajo concluye proponiendo el diagrama de un proceso de acoplamiento de estas dos turbinas para trabajar bajo el criterio de combustión asistida. El trabajo fue desarrollado bajo la consideración de flujo constante de hidrógeno en la alimentación fresca (HIDRÓGEN), empleando un modelo cinético simplificado para la combustión de H_2 ,

Capítulo 3

Metodología

3.1 Modelación ciclo de potencia sujeto a la combustión asistida de CH₄ con H₂, en modo de intercambio

Tomando como base el trabajo realizado por Muñoz Cora, et al. (2018) presentado en la Figura 2.3 Diagrama Figura 2.3 se realiza la simulación de ciclo de potencia utilizando los modelos cinéticos propuestos por el autor. La modelación del ciclo de potencia se realizó basado en el diseño conceptual de las etapas (1) Compresión, (2) Reacción, (3) Expansión e (4) Integración energética. En la primera etapa se realizó la modelación del sistema de reacción empleando modelos cinéticos del proceso de combustión de metano e hidrógeno reportados por la literatura. Para este trabajo de tesis se considera que el hidrógeno alimentado al proceso proviene de la producción de oxy-hidrógeno a partir de hidrólisis del agua. Para definir la proporción másica aire-combustible en la alimentación, se tomó como referencia la relación mínima aire-combustible determinada a partir de la proporción estequiométrica mostradas en la Ec. 3.1 (Muñoz Cora, et al. 2018)

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{S,CH_4} = \frac{(2-1.5f)4.76PM_{aire}}{(1-f)PM_{CH_4} + f(PM_{H_2})} \quad \text{Ec. 3.1}$$

En las ecuaciones Ec. 3.1, **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, PM_{aire} , PM_{CH_4} , y PM_{H_2} , corresponden al peso molecular de aire, metano e hidrógeno diatómico respectivamente y f es la fracción molar de H_2 en el combustible total alimentado al proceso.

Para llevar a cabo el ajuste de la proporción aire combustible, se programó un módulo de cálculo acoplado a un análisis de sensibilidad en función de la cantidad teórica de hidrógeno obtenido por la etapa de hidrólisis, la cual a su vez es función de la incidencia de radiación solar.

3.1.2 Modelación del sistema de reacción

Cinética de metano

Para la modelación del reactor en donde se lleva a cabo la combustión de metano se tomó como referencia el modelo cinético propuesto por Abbasi, et al. (2012) el cual se basa en la teoría de equilibrio molar, expresado en términos de fracción mol como se muestra en la Ec. 3.2:

$$-C_f U_s \frac{dY_{CH_4,f}}{dz} - \eta(1 - \varepsilon_{bed})(-R_{CH_4}) = 0 \quad \text{Ec. 3.2}$$

En donde $Y_{CH_4,f}$ es la fracción mol de metano en la fase gas, C_f es la concentración total de fluido, U_s es la velocidad superficial molar promedio, ε_{bed} es la fracción de vacío de lecho catalítico, R_{CH_4} es la velocidad de reacción y η es el factor de efectividad. La velocidad de reacción R_{CH_4} se muestra en la Ec. 3.3, la cual describe la combustión de metano sobre catalizador de Pt-Pd tratado con vapor (Abbasi, et al., 2012).

$$-R_{CH_4} = \frac{k_{0,CH_4} \cdot e^{-E/RT} \cdot C_{CH_4}}{1 + K_{0,H_2O} \cdot e^{\Delta H_{ads}/RT} \cdot C_{H_2O}} \quad \text{Ec. 3.3}$$

Tabla 3.1.-Valores optimizados de los parámetros cinéticos para el catalizador de Pt-Pd fresco y tratado con vapor, Abbasi, et al. (2012)

Región de baja temp. (debajo de 545 °C)		
	$A_{CH_4}(s^{-1})$	E(kJ/mol)
Catalizador de Pt-Pd tratado con vapor	$1.81 \times 10^6(10^{-2} - 10^9)$	72.6 (20 – 180)
Constantes de Adsorción		
	$A_{H_2O}(m^3/mol)$	$\Delta H_{ads}(kJ/mol)$
Catalizador de Pt-Pd tratado con vapor	$0.0527(10^{-4} - 10^9)$	24.1 (10 – 60)

Nota: Los valores entre paréntesis indican los límites inferior y superior del rango de parámetros obtenidos por Abbasi, et al. (2012)

El valor de los parámetros del catalizador empleado para la modelación de reactor en este trabajo de tesis, se presentan en la Tabla 3.2, Abbasi, et al. (2012).

Tabla 3.2.- Parámetros del catalizador (Abbasi, et al., 2012)

Variable	Valor
Diámetro del poro (d_p), nm	10
Factor de tortuosidad (τ)	2
Porosidad del catalizador (ϵ_{cat})	0.5
Diámetro de la partícula (D_p), micrones	360
Fracción de vacío del lecho catalítico (ϵ_{bed})	0.35

Cinética de Hidrógeno

Para la simulación de la combustión de hidrogeno se utilizó el modelo cinético presentado por Marinov et. al. (1995). En donde el modelo cinético es de tipo “Ley de potencias” homogéneo y $k_{0,H_2} = 1.8 \times 10^{13} mol^{-0.5} cm^{1.5} s^{-1}$ además, $E = 146.4 kJ mol^{-1} s^{-1}$. El modelo cinético reportado por Marinov se muestra en la Ec. 3.4.

$$-R_{H_2} = k_{0,H_2} C_{H_2} C_{O_2}^{0.5} exp(-E/RT) \quad \text{Ec. 3.4}$$

3.1.4 Modelación de etapa de expansión y compresión

Para la modelación de estas etapas se tomó como referencia el sistema de estudio reportado por Kato y Nomura (1997) el cual consiste en un turbocompresor, modificado para funcionar con hidrógeno, conformado por una turbina y un compresor ambos de flujo radial-axial, conectados en un solo eje. En donde el movimiento rotacional de la turbina es generado por los gases provenientes del combustor en donde se lleva a cabo la reacción química entre el combustible y el oxidante (aire ambiente y aire seco), cuya regulación se lleva a cabo mediante la variación de flujos en la alimentación.

Los parámetros de diseño preliminar incluyen el empleo de compresor y turbina con eficiencia adiabática (proceso isoentrópico). Asimismo, se considera que para evitar o reducir la presencia de dos fases (líquido-vapor) en la turbina la corriente de descarga del reactor deberá de corresponder a la temperatura de un vapor sobrecalentado ($TRX2 > T_b$) para evitar la carga de impacto fluctuante en las paletas del impulsor erosionando la superficie y dañando la maquinaria. En la práctica dentro de las especificaciones de diseño se establece que, no es aconsejable que la cantidad de vapor en la turbina sea menor del 90 %. En el

dimensionamiento de estos equipos se contemplarán capacidades máximas de diseño basado en restricciones de viabilidad técnica (Muñoz Cora, et al., 2018).

A partir de los datos de Potencia ($L_{\text{exp Kato}}$) vs. Flujo másico (Flujo total) del fluido de trabajo proporcionados por Kato y Nomura (1997) se generó la curva de rendimiento del turbocompresor, obteniendo una ecuación polinomial de tercer orden (Figura 3.1).

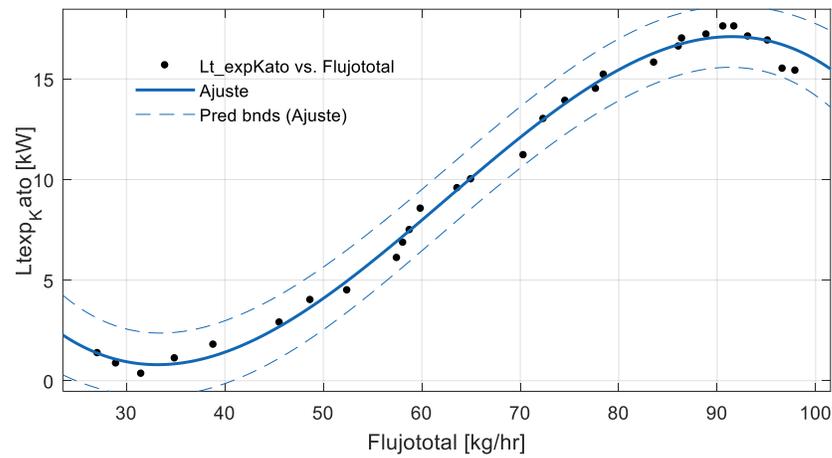


Figura 3.1 Secuencia de cálculo para la relación aire-combustible

Empleando la nomenclatura de Aspen Plus en el apartado de “Curve Data”, el polinomio resultante, empleado para la simulación del turbocompresor se muestra en la Ec. 3.5.

$$Power = 22.58 - 1.494 * Flow + 0.03071 + Flow^2 - 1.642 \cdot 10^{-4} \cdot Flow \quad \text{Ec. 3.5}$$

3.2 Modelación la producción de Hidrógeno Solar y acoplar el modelo al ciclo de potencia.

Para modelar la producción de H_2 a partir de la electrólisis de agua, se tomó como base el funcionamiento de una celda de electrólisis alcalina representada por las reacciones químicas mostradas en las Ec. 3.6, Ec. 3.7 y Ec. 3.8 (Ursúa, et al., 2012).



Empleando el concepto de equilibrio fisicoquímico se desarrolló una secuencia de cálculo para modelar el flujo de hidrógeno producido a partir del trabajo termodinámico del proceso de hidrólisis mediante el principio de minimización de la energía libre de Gibbs y la aplicación de la ecuación Nernst (Ec. 3.9).

$$P_{H_2} = \left\{ \frac{n_{H_2O}}{2} \cdot \exp[z \cdot F \cdot (-V - V_{ref}^o) / (R \cdot T)] \right\}^a \quad \text{Ec. 3.9}$$

En donde, \dot{w}_{H_2O} es el molar de agua en el reactor, z es el número de moles de electrones intercambiados para producir un mol de hidrógeno ($z=2$), F es la constante de Faraday, que representa la carga eléctrica por mol de electrones ($96,485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$), V y V son el voltaje de trabajo del reactor y V_{ref} el voltaje reversible, $8.314 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$, $a=1.5$.

A partir de la ecuación de Gases ideales, se obtiene el flujo de hidrógeno producido (Ec. 3.10).

$$\dot{n}_{H_2} = \frac{P_{H_2} \cdot v_o}{R \cdot T} \quad \text{Ec. 3.10}$$

En donde v_o , es el flujo volumétrico del fluido de proceso, R la constante de los gases ideales y T la temperatura de operación.

La secuencia de cálculo para la modelación se programó en ASPEN PLUS V8.8, con el fin de simular la producción de un reactor electrolítico acoplado al ciclo de potencia para la producción hidrógeno solar. En la modelación del sistema electrolítico, se considera que la fuente de energía para la hidrólisis de la molécula de H_2O proviene de la energía solar lo que implica un comportamiento oscilatorio en la producción de H_2 , por lo que, mediante el empleo de un módulo de cálculo acoplado a análisis de sensibilidad se integrará la secuencia de cálculo para simular la variación de la incidencia de radiación solar y producción energética que alimenta al electrolizador para la producción de H_2 .

3.2.2 Modelación de la operación del panel fotovoltaico

En una celda fotovoltaica la salida de la fuente de corriente es directamente proporcional a la luz que incide sobre la celda (fotocorriente I_{ph}). Durante la oscuridad, la celda solar no es un dispositivo activo por lo que no produce ni corriente ni voltaje, es por ello que para modelar el comportamiento operacional de panel solar se recopilaron datos de radiación solar de la estación de monitoreo ubicada en el estado de Puebla del Sistema de Información y Visualización de Estaciones Automáticas (SIVEA).

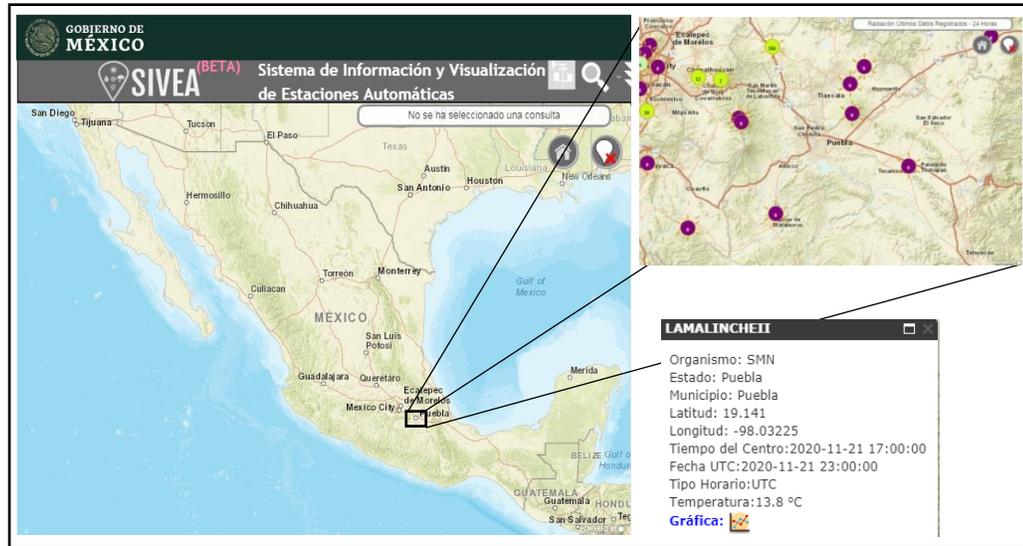


Figura 3.2 Ubicación de la estación de monitoreo de SIVEA.

A partir de la base de datos se generaron archivos del promedio de cada 10 minutos de las variables: presión atmosférica, temperatura, humedad relativa, y radiación solar global. El tratamiento de los datos recopilados consistió de obtener el comportamiento promedio de 139 días.

Para modelar el comportamiento de la radiación solar global, la humedad en el aire y la temperatura del ambiente en función de la hora del día, los datos registrados se ajustaron a una función sinusoidal con un $R^2 \geq 90\%$ de confiabilidad para posteriormente introducir las ecuaciones de ajuste a Aspen Plus.

Para modelar la curva características de corriente-voltaje de un diodo se empleó la ecuación del diodo de Shockley mostrada en la Ec. 3.11 y la potencia del panel solar se calculó empleando la Ec. 3.12.

$$I = I_{ph} - I_d - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \tag{Ec. 3.11}$$

$$P_{pv} = V \cdot I \quad \text{Ec. 3.12}$$

En donde, I_{ph} es la corriente o fotocorriente generada por luz, I_d es la corriente del diodo calculado con la ecuación Ec. 3.13.

$$I_d = I_r \left(\exp \left(\frac{V_c + I \cdot R_s}{V_t} - 1 \right) \right) \quad \text{Ec. 3.13}$$

En donde, $V_t = k \cdot T / q$, q es la carga de electrones ($1.6 \times 10^{-19} \text{C}$), k es la constante de Boltzmann ($1.38 \times 10^{-23} \text{J} \cdot \text{K}^{-1}$), R_s es una resistencia en serie, I_r es la corriente oscura de saturación de la celda.

La fotocorriente depende principalmente de la insolación solar, λ , y la temperatura de trabajo de la celda, T_{cell} , para su cálculo se emplea la ecuación Ec. 3.14.

$$I_{ph} = I_{sc} \cdot \lambda \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T_{cell} - T_{ref}) \right) \quad \text{Ec. 3.14}$$

En donde

$$\alpha = \frac{(I_{sc,T_{cell}} - I_{sc,T_{ref}})}{I_{sc,T_{ref}}} \cdot (T_{cell} - T_{ref}) \quad \text{Ec. 3.15}$$

$I_{sc,T_{cell}}$ es la corriente de cortocircuito de la celda a 25°C y $1 \text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$, α es el coeficiente de temperatura de la corriente de cortocircuito de la celda, T_{Ref} es la temperatura de referencia de la celda y λ es la insolación solar en $\text{kW} \cdot \text{m}^{-2}$.

La corriente de saturación de la celda, I_r , varía con la temperatura de la celda, que se describe como:

$$I_r = I_{r,Tcell} \cdot \left(\frac{T_{cell}}{T_{ref}}\right)^{3/A} \exp\left(\frac{V_g \cdot q}{A \cdot k} \cdot \left(\frac{1}{T_{cell}} - \frac{1}{T_{ref}}\right)\right) \quad \text{Ec. 3.16}$$

En donde, donde $I_{r,Tcell}$ es la corriente de saturación inversa de la celda a una temperatura de referencia y una radiación solar, V_g es la energía de explosión del semiconductor utilizado en la celda. El factor ideal A depende de la tecnología fotovoltaica (para este trabajo se emplea el valor de 1.2). $I_{r,Tcell}$ se calcula a mediante la ecuación Ec. 3.17.

$$I_{r,Tcell} = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{N_s \cdot k \cdot A \cdot T_c}\right)} \quad \text{Ec. 3.17}$$

En donde I_{sc} y V_{oc} son los parámetros más importantes que se utilizan ampliamente para describir el rendimiento eléctrico de la celda son el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) y la corriente de cortocircuito I_{sc} , para este trabajo se tomó como valor de referencia $I_{sc,Tcell}=3.8$, $V_{oc,Tcell}=31.05/N_s$. En donde N_s es el número de celdas.

3.3 Cálculo de la eficiencia del proceso

En Aspen plus las simulaciones se realizan en estado estacionario, se introdujeron los modelos matemáticos obtenidos del ajuste correspondiente al comportamiento de la radiación y temperatura ambiente de la ciudad de Puebla en un calculador en Aspen Plus en el cual se creó un parámetro de usuario que representara la hora del día. La temperatura ambiente fue utilizada para el comportamiento de las alimentaciones frescas y la temperatura.

Ante el comportamiento oscilatorio en la producción de hidrógeno solar, se evalúa la dinámica de variación de la eficiencia termodinámica (Ec. 3.18) del con base al principio de estados cuasi-estacionarios realizado mediante análisis de sensibilidad, empleando

preliminarmente la variación de: (1) proporción H₂-CH₄-aire alimentado al sistema, (2) temperatura de alimentación al reactor de combustión de metano e hidrógeno, (3) presión del sistema de reacción y (4) contenido de humedad en la alimentación al sistema de reacción. La estabilidad en la eficiencia termodinámica de turbina de gas será evaluada para cada variación en el proceso.

$$\eta_{th} = \frac{W_{turbina} - W_{compresor}}{Q_{Reactor}} \tag{Ec. 3.18}$$

En la **¡Error! La autoreferencia al marcador no es válida.** se describe la secuencia de los módulos de cálculo empleados para la evaluación de la variación de la eficiencia como función de la producción de H₂ solar.

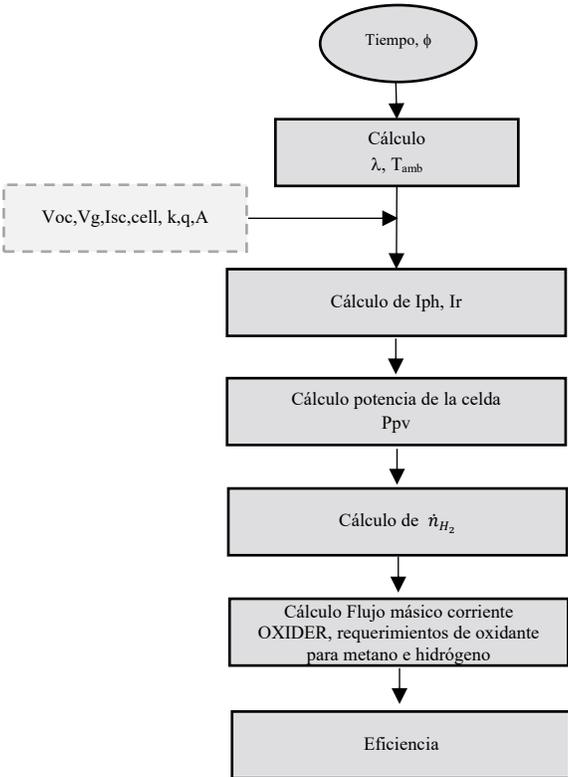


Figura 3.3 Diagrama de Flujo de la secuencia de cálculo.

Capítulo 4

Resultados

4.1 Modelación ciclo de potencia sujeto a la combustión asistida de CH₄ con H₂, en modo de intercambio

En la Figura 4.1 se muestra el diagrama de proceso empleado en este trabajo de tesis, en este diagrama el flujo másico del fluido de trabajo de la corriente HIDROGENO es otorgado por el reactor REAC-H₂O. Ya que el objetivo de este trabajo es evaluar el efecto de la oscilación que presenta la alimentación del hidrógeno al proceso se consideró alimentar solo el hidrógeno producto de la hidrólisis, alimentar el oxígeno implicaría que el flujo de oxidante al proceso de combustión implicaría también una perturbación oscilatoria al proceso para evitar este fenómeno el oxígeno producido en la hidrólisis no es alimentado al proceso.

El proceso está conformado por el acoplamiento de dos ciclos, un ciclo de potencia que emplea hidrógeno como combustible al cual denominaremos Ciclo de Hidrógeno, y un ciclo de potencia que emplea metano como combustible al cual denominaremos Ciclo de Metano. El proceso global presenta tres alimentaciones frescas: METANO, OXIDANTE e HIDRÓGENO, por donde se suministra CH₄, aire y H₂ respectivamente. El CH₄ alimentado a es mezclado con aire en el MIX-2 mientras que el H₂ es mezclado con aire en MIX-1, el flujo de aire total entra al separador SEP-1 en donde mediante un calculador de calcula el flujo másico de la corriente OX-CH₄ y OX-H₂ empleando la ecuación Ec. 3.1. La mezcla CH₄-aire entra al compresor C-2 que opera con una eficiencia isoentrópica del 90% con una presión de descarga de 23 MPa, estas mismas condiciones son empleadas para el compresor C-1. La descarga de los compresores C-1 y C-2 (C1-2 y C2-2 respectivamente) es enviada a intercambiadores de calor que permite el ajuste térmico de la corriente de proceso para facilitar su combustión en el reactor. La corriente C1-2 es enviada al intercambiador de calor EX-1 el cual emplea para u operación servicio auxiliar dando como resultado la corriente IN-PFR, mientras que la corriente C2-2 se envía al intercambiador de calor EX-2 el cual emplea recuperación energética de la corriente de proceso S1 (descarga del reactor de hidrogeno REAC-H₂), dado como resultado la corriente RX1. Investigaciones anteriores han demostrado que los quemadores de hidrógeno de llama abierta sin combustión catalítica producen más

óxidos de nitrógeno (NO_x) que los quemadores de gas natural, debido a su alta temperatura de combustión (DE WFRTH DW., 1975; Frassoldati, et al., 2006). Por lo que en El reactor REAC-H₂ representa una cámara de combustión cuya hidrodinámica es representada con un bloque CSTR, en él se lleva a cabo la reacción de combustión del hidrógeno limitada por la cinética (Ec. 3.4) y la reacción de formación de NO₂ considerando que esta está limitada por el equilibrio termodinámico desarrollándose a temperaturas por arriba de 1500K. El reactor REA_CH₄ es un reactor empacado cuya hidrodinámica es representada por un bloque PFR en él se lleva a cabo la combustión de metano limitada por la cinética (Ec. 3.3) y la formación de NO₂ con limitada por el equilibrio termodinámico. La descarga del reactor REAC-H₂ es enviada a los intercambiadores de calor EX-4 y EX-2 para el pre-acondicionamiento térmico de las corrientes SAL-PFR y IN-PFR respectivamente, dando origen a la corriente IN-TH₂ la cual es el fluido de trabajo de la turbina H₂-T del ciclo de hidrógeno. La corriente SAL-PFR producto del reactor REAC-PFR es enviada como fluido de trabajo a la turbina CH₄-T del ciclo de metano. Las turbinas son modeladas introduciendo la curva de desempeño dada en la ecuación Ec. 3.5. Las corrientes descargas de las turbinas H₂-T y CH₄-T son S-TH₂ y S-TCH₄ respectivamente.

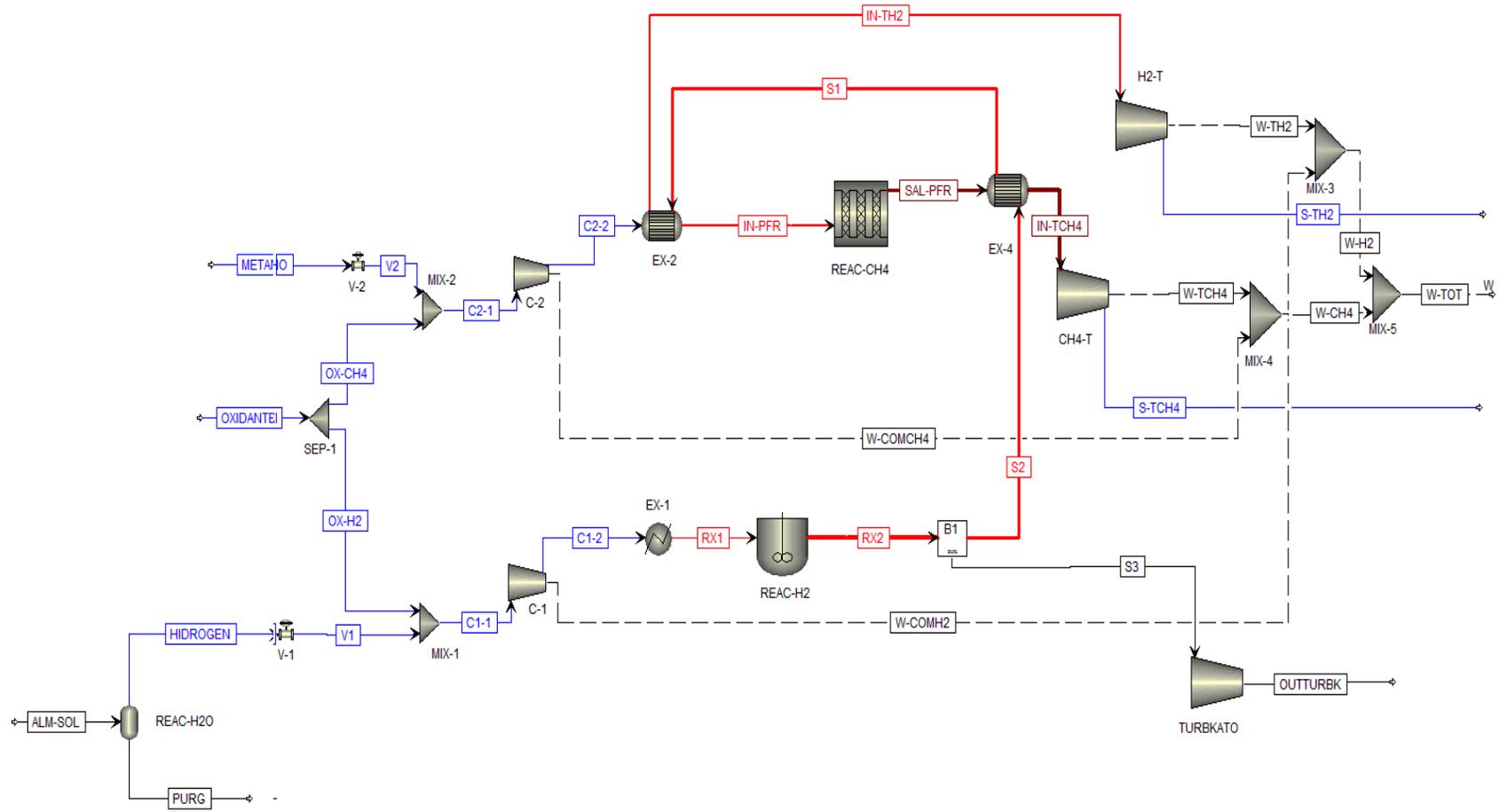


Figura 4.1 Diagrama de flujo del Ciclo de Potencia

Con el fin de validar el modelo del ciclo de potencia se realizó una simulación introduciendo las condiciones de operación reportados por Kato, et al., (1997) con el fin de simular el comportamiento del ciclo si este funciona sólo con hidrógeno. En la Figura 4.2 se muestra la comparación del resultado obtenido por Muñoz Cora, et al. (2020) y el obtenido en este trabajo de tesis en donde se puede observar que nuestros resultados presenta una mejor reproducción de los datos reportados por Kato, et al., (1997) logrando un $R^2=98\%$.

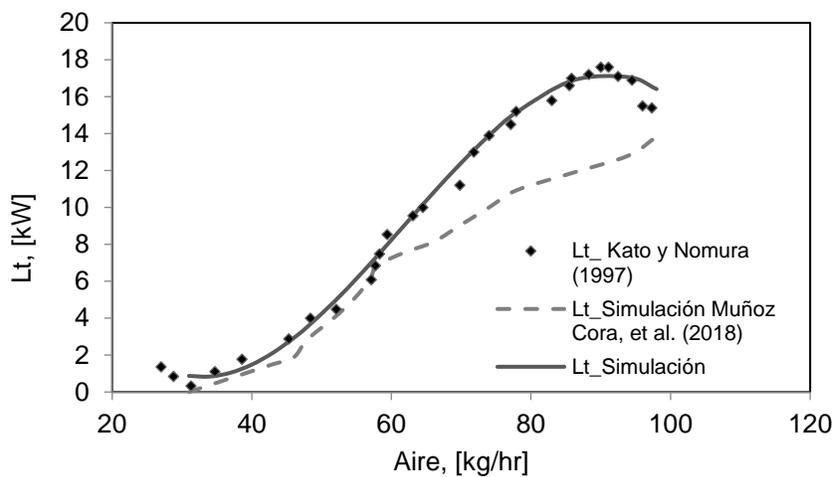


Figura 4.2 Validación de la simulación

4.2 Secuencia de cálculo para la modelación de la Producción de Hidrógeno Solar teórico

A partir de la información reportada por el Servicio Meteorológico Nacional ubicada en el municipio de Puebla (EMA's, 2020), se generó la base de datos mostrada en el Apéndice A. En la Figura 4.3 se muestra el diagrama de caja de la radiación solar por día durante el periodo muestreado (4 meses), como se observa el rango y la media de radiación solar captada en la zona metropolitana es variable, es debido a las variaciones en las condiciones

climatológicas durante el periodo muestreado lo que indica que es recomendable realizar la simulación de estas variables en periodos de tiempo más cortos. Tomando un periodo de 7 días muestréales, se desarrolló la modelación de las variables meteorológicas, para ello se emplea una función sinusoidal de tres términos. En las Figuras 4.4-4.6 se muestra el resultado de la modelación de la radiación solar para tres semanas muestra de meses diferentes (abril y octubre del 2019 y abril del 2020); como se observa la aplicación de un mismo modelo a los tres escenarios no asegura la proyección teórica de la variable, esto mismo se observa con la modelación de la variable Temperatura (Figuras 4.7-4.9). Esta condición es debida a la variabilidad de las condiciones climatológicas en el periodo muestreado, por lo que los parámetros Amplitud y Frecuencia de la función sinusoidal son dependientes de variables como el tiempo, nubosidad e inclusive incidencia de radiación solar promedio.

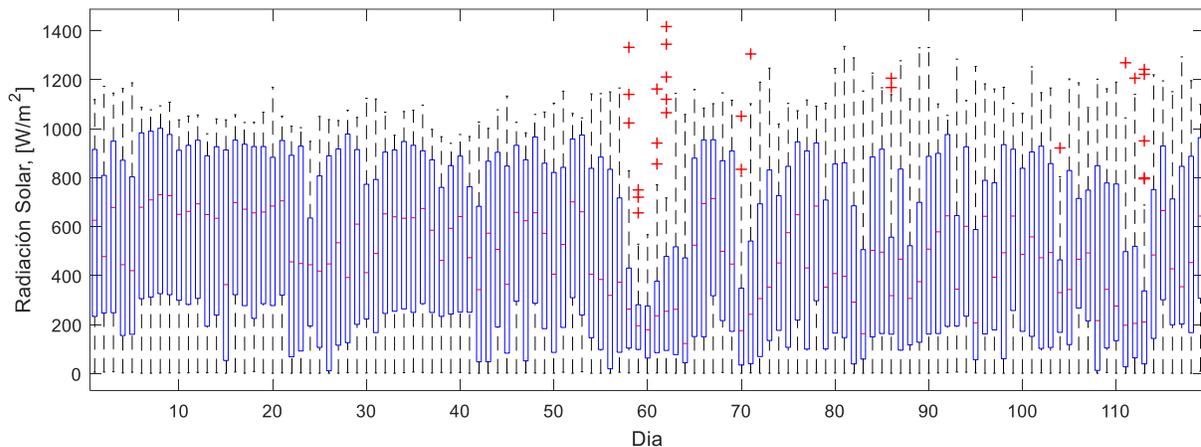


Figura 4.3. Rango de variación y media por día durante el periodo muestreado

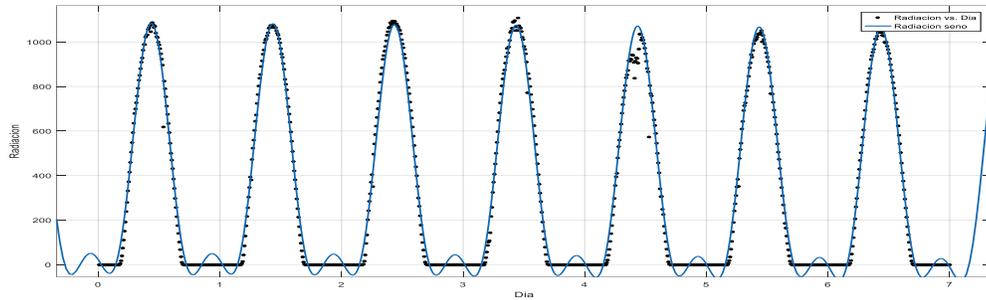


Figura 4.4 Comportamiento de la radiación en la 1^o semana de abril 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos

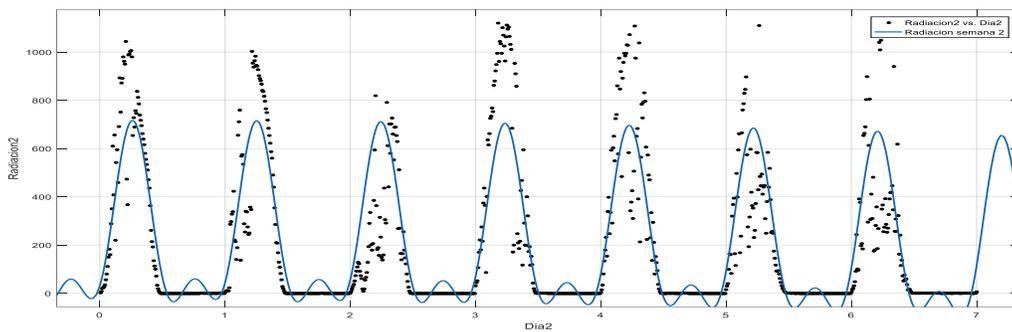


Figura 4.5 Comportamiento de la radiación en la 3^o semana de octubre 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos

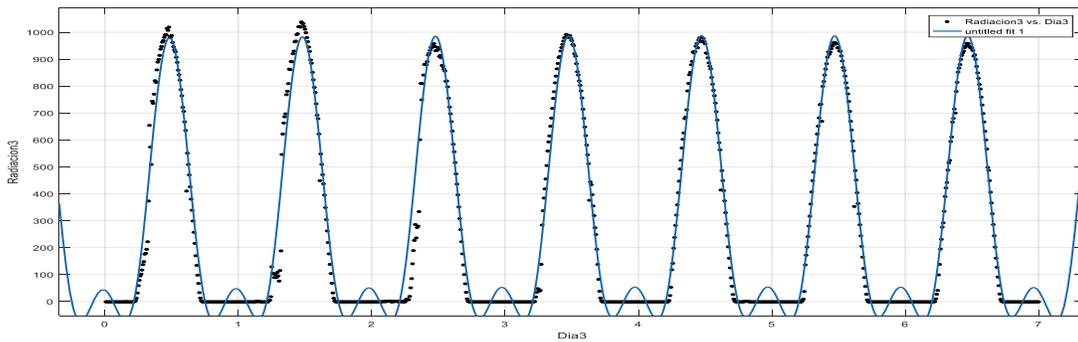


Figura 4.6 Comportamiento de la radiación en la 1^o semana de abril 2020 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos

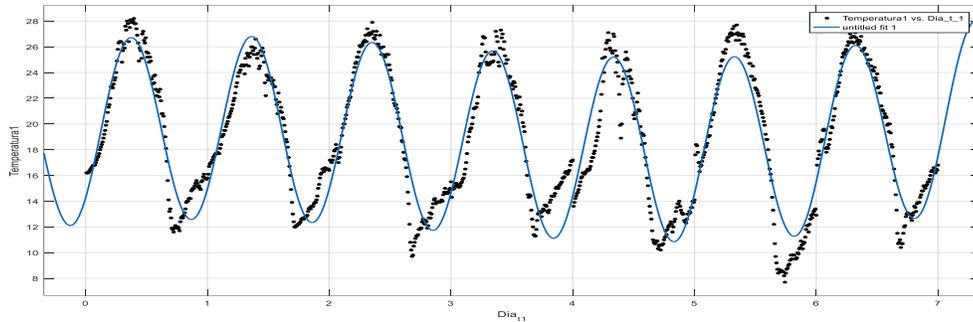


Figura 4.7 Comportamiento de la temperatura en la 1° semana de abril 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos

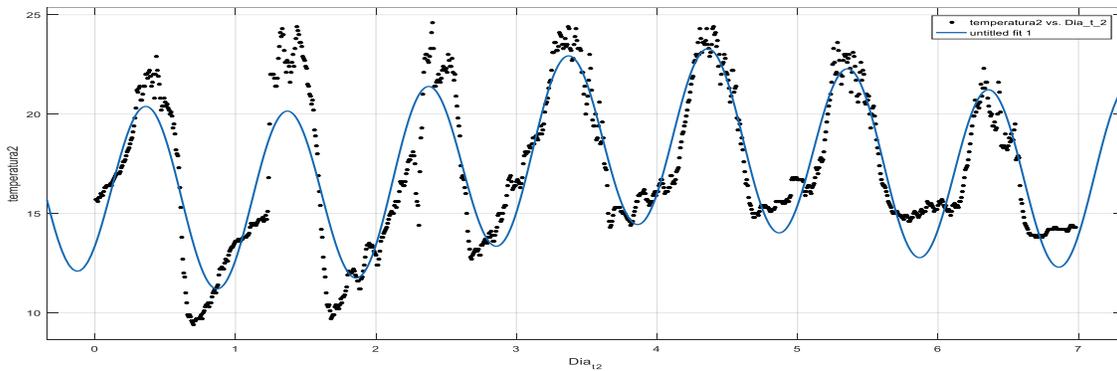


Figura 4.8 Comportamiento de la temperatura en la 3° semana de octubre 2019 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos

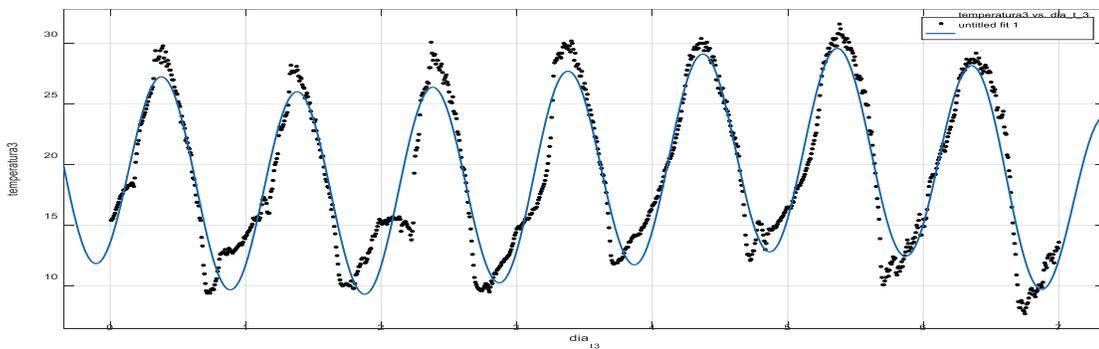


Figura 4.9 Comportamiento de la temperatura en la 1° semana de abril 2020 y su ajuste con una función de suma de senos 3 términos

Como se puede apreciar, los valores de energía solar son altamente dependientes de las condiciones climáticas, las fluctuaciones de la energía suministrada a un electrolizador pueden ocasionar problemas como: generación de mezclas explosivas, corrosión de materiales, caídas de presión y disminución de la eficiencia (Amores, et al.,2014; Mohammad, et.al., 2018). Para minimizar escenarios en donde estos problemas puedan presentarse se modeló el electrolizador tomando periodos de operación de 24 horas.

Los datos de Radiación Solar en un periodo de 24 horas se muestran en la Figura 4.10 en donde alrededor de las 10 hrs se obtiene el máximo de la incidencia de radiación solar y los mínimos se encuentran alrededor de las 5 hr y 18 hr.

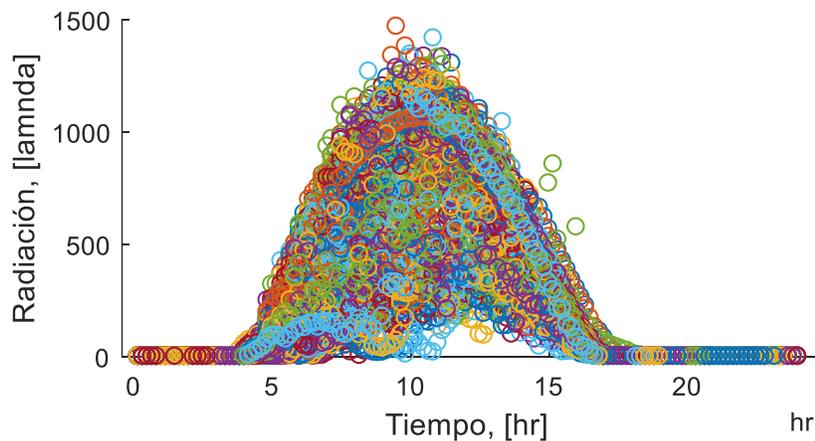


Figura 4.10 Datos de radiación solar compilados de 170 días

Empleando una ecuación de un término sinusoidal se modela las variables Temperatura y Radiación Solar (Ec. 4.1, Ec. 4.2). En las Figuras 4.11-4.13 se muestra la

modelación de tres días muestra En la Tabla 4.1 se muestras los valores de los parámetros del modelo obtenido para los tres días.

Modelo Incidencia de Radiación Solar:

$$\lambda = A \cdot \text{sen}(\theta \cdot t + \phi) \tag{Ec. 4.1}$$

En donde A es la amplitud de la radiación, θ es la frecuencia de la oscilación y ϕ es la fase.

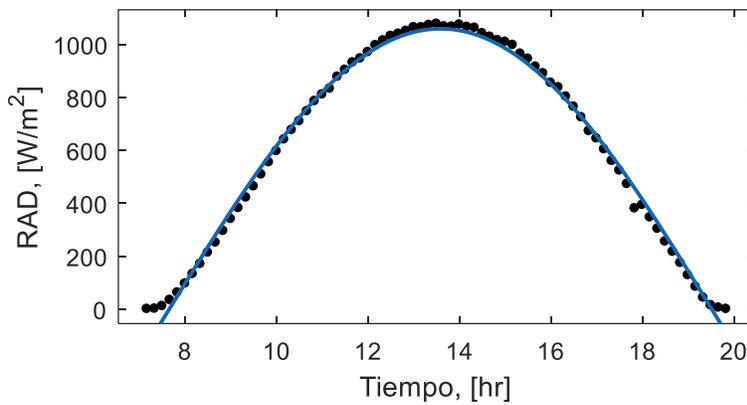


Figura 4.11 Ajuste de Radiación solar del 11 de abril de 2019.

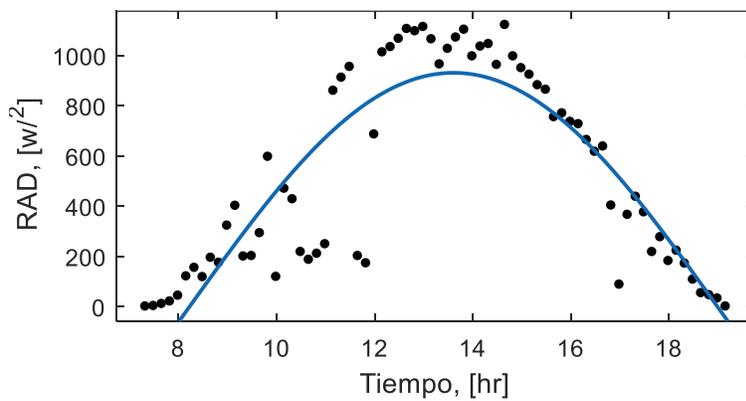


Figura 4.12 Ajuste de Radiación Solar del 21 de octubre de 2019.

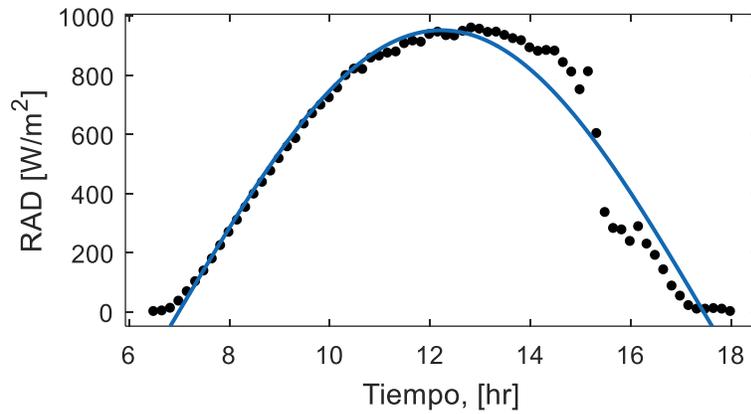


Figura 4.13 Ajuste de Radiación solar del 16 de abril de 2020.

Tabla 4.1 Parámetros de ajuste de la Radiación Solar, la media y la desviación estándar.

	11/04/19	21/10/19	16/04/20	Media	Desviación
A	1059	931	951.9	980.6333	68.6673
θ	0.2647	0.2918	0.3004	0.2856	0.0186
ϕ	-2.023	-2.4	-2.1	-2.1743	0.1991

Modelo de la Temperatura:

$$T = A_T \cdot \text{sen}(\theta_T \cdot t + \phi_T) \quad \text{Ec. 4.2}$$

En donde A es la amplitud de la radiación, θ es la frecuencia de la oscilación y ϕ es la fase. Como se observa en los perfiles de temperatura ambiente la variación térmica no supera el 20%, esto es un dato importante para establecer la temperatura de operación de la celda fotovoltaica.

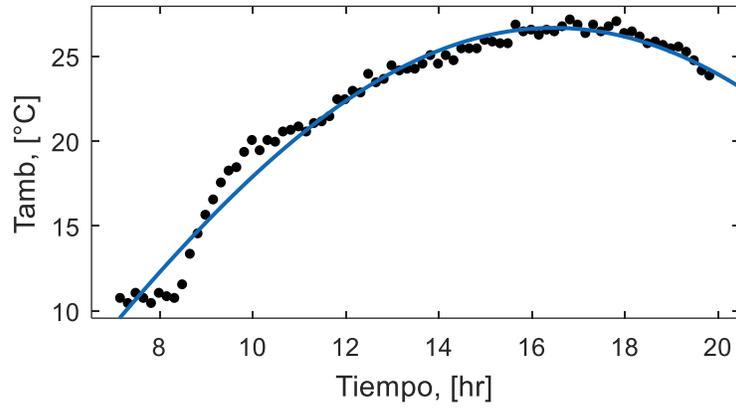


Figura 4.14 Ajuste de la Temperatura ambiente del 11 de abril de 2019.

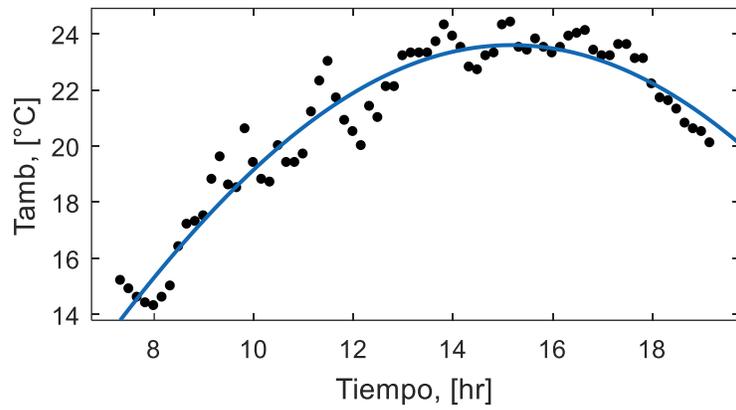


Figura 4.15 Ajuste de la Temperatura ambiente del 21 de octubre de 2019.

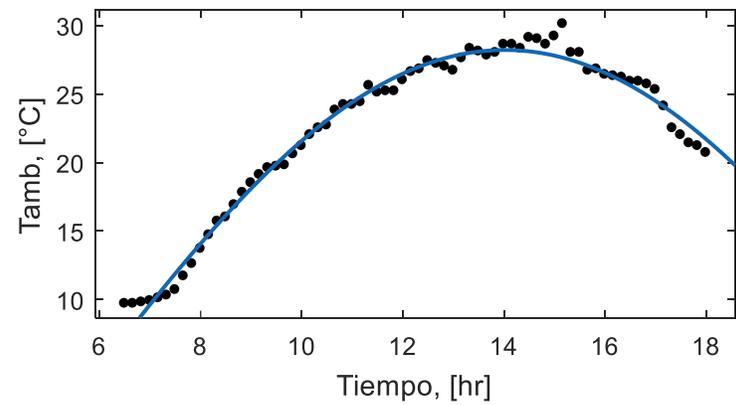


Figura 4.16 Ajuste de la Temperatura ambiente del 16 de abril de 2020.

Tabla 4.2 Parámetros de ajuste de la Temperatura, media y la desviación estándar

	11/04/19	21/10/19	16/04/20	Media	Desviación
A	26.66	23.6	28.21	26.1566	2.3458
θ	0.1291	0.1205	0.1741	0.1412	0.0287
α	-0.5544	-0.2574	-0.8697	-0.5605	0.3061

4.3 Modelación celda fotovoltaica

Las celdas conectadas en paralelo aumentan la corriente y las celdas conectadas en serie proporcionan mayores voltajes de salida. Los arreglos prácticos se componen de varias células fotovoltaicas conectadas y la observación de las características en los terminales del arreglo fotovoltaico requiere la inclusión de parámetros a la ecuación básica. La secuencia de cálculo se muestra en Figura 4.17. Empleando los valores mostrados en la tabla se obtienen las curvas I-V y P-V.

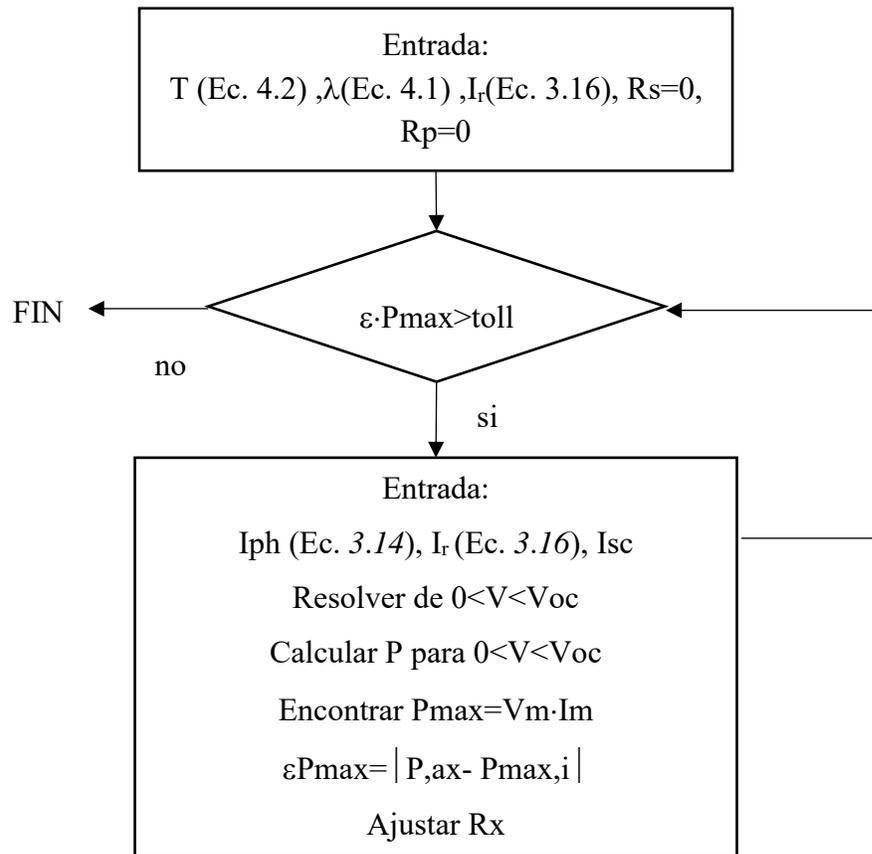


Figura 4.17 Algoritmo de solución para el cálculo de I-V de la fotocelda

Tabla 4.3 Valores empleados para la modelación de las curvas I-V y P-V

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
k	1.38e-23	Isc_T1	3.80
q	1.6e-19	T2	273+75
A	1.2	Voc_T2	17.05/Ns
Vg	1.12	Isc_T2	3.92
Ns	2	Tark	273+TaC
T1	273+20	Tref	273+25

Voc_T1	21.06/Ns
--------	----------

El valor de la corriente se obtiene resolviendo numéricamente la ecuación Ec. 3.11. Para cada valor de incidencia de radiación solar se obtiene valor de V con el cual se obtiene un I correspondiente. En la Figura 4.18 se muestra la modelación de la curva I-V, P-V indicando los puntos correspondientes a la potencia máxima del sistema fotovoltaico empleando todos los valores de λ registrado para un día promedio del mes de abril.

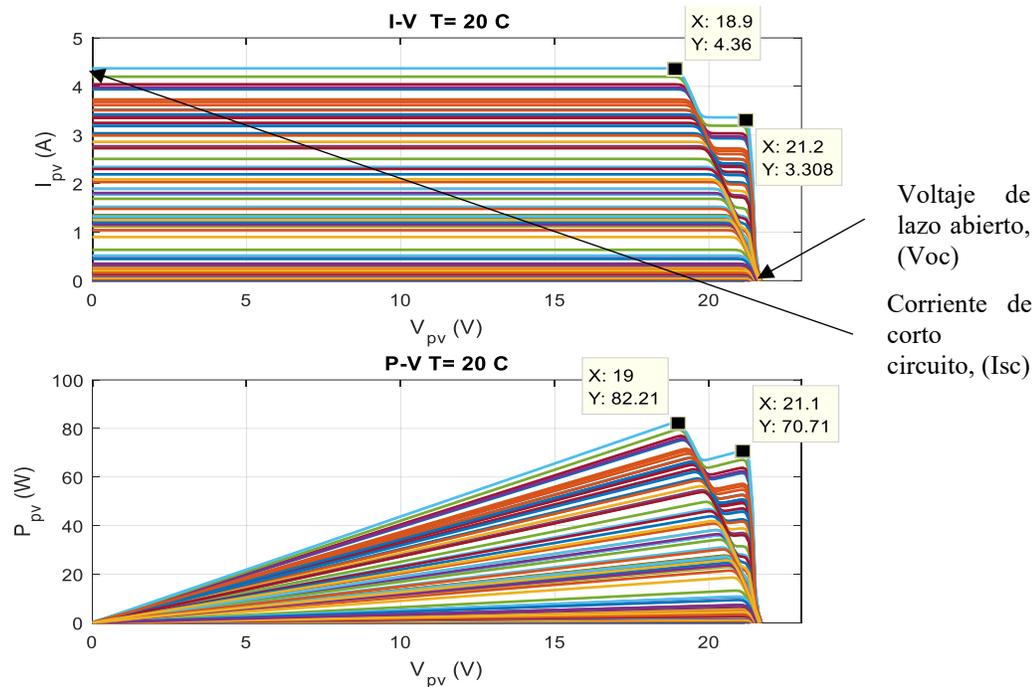


Figura 4.18 Curva del modelo I-V y P-V de un sistema de fotoceldas prueba

La curva Corriente vs. Voltaje se llama curva características I-V. La potencia máxima fotovoltaica se obtiene del área bajo la curva. Cuando los voltajes de las celdas solares aumentan, el área disminuye, mostrando una relación inversa, Diantoro, y otros, (2018). Esto se puede observar claramente en las curvas I-V mostradas en la Figura 4.19, las cuales corresponden a las incidencias de radiación solar mostradas en la

Tabla 4.4, , la variación de la irradiación es debida a los cambios en las condiciones ambientales (radiación solar, nubosidad y temperatura) en un periodo de 24 hrs, por lo que el

punto máximo de la curva de potencia también cambió (Hamoodi, et al., 2018; Alsayid, 2012), siendo evidente la influencia de la irradiación en el punto de máxima potencia, cuanto mayor sea la irradiación, mayor será el punto de máxima potencia. Para la modelación se consideró que el panel cuenta con 10 celdas y mantiene una temperatura de operación constante de 25 ° C. También se puede observar claramente que la corriente generada por la luz incidente depende de la irradiación, cuanto mayor es la irradiación, mayor es la corriente.

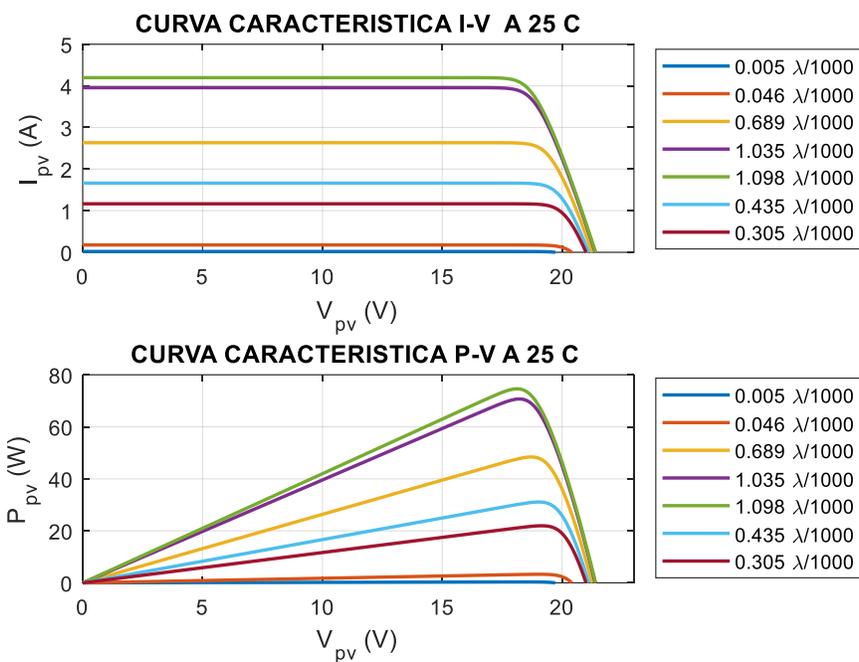


Figura 4.19 Curva I-V de un día promedio

Tabla 4.4 Datos de Incidencia de radiación solar empleado para la curva I-V de la Figura 4.19.

Hora	23:50	18:40	18:00	16:00	14:30	12:00	10:00	8:00	6:00	0:00
W/m ²	0	5	46	689	1035	1098	435	305	0	0

4.4 Simulación del ciclo de potencia.

Empleando el valor promedio de los parámetros de las ecuaciones Ec. 4.1 y Ec. 4.2 se realizó la programación de las variables en Aspen Plus, para un día promedio el efecto de la radiación solar en la producción de hidrógeno se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** En la Figura 4.20 se grafica la relación directa entre la incidencia de radiación solar y la producción directa de hidrógeno, Figura 4.3 se puede observar que el valor máximo de la radiación solar está ubicado a las 13:22 hrs, sin embargo la relación Hidrógeno/Hidrógeno_Max teórico alcanza un rango máximo entre las 11:00 a 15:00 hrs aproximadamente, este comportamiento se da si no se considera las restricciones operacionales del reactor electrolítico.

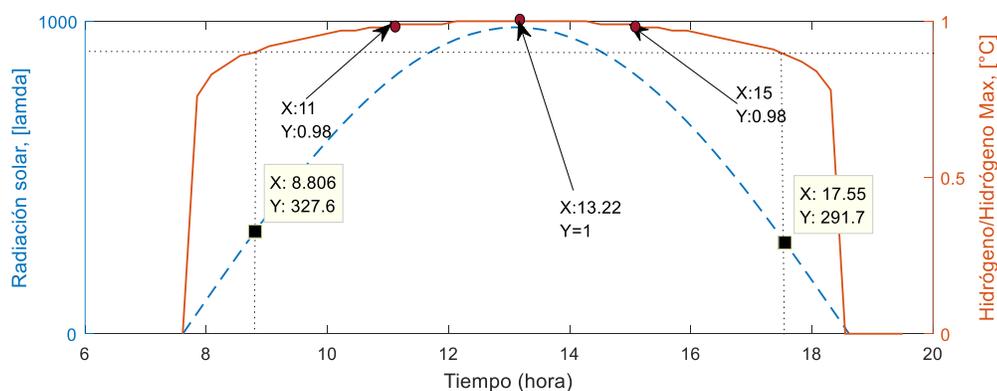


Figura 4.20 Comportamiento de la radiación e hidrógeno generado en un día promedio

Conocer el valor máximo de la incidencia de radiación solar es un parámetro importante para la simulación de una celda electrolítica ya que con base a la simulación se puede determinar el caudal másico máximo de gas producido en el reactor electrolítico o receptor solar, parámetro importante para determinar el tamaño del almacenamiento o demanda de H_2 (Mohammad, et al., 2018). Si se introduce el modelo de la curva de desempeño

(curva I-V) del reactor electrolítico se obtiene la Figura 4.21. En la Figura 4.22 se muestra los resultados en Aspen Plus de la producción de H₂ en el reactor electrolítico ante la incidencia de radiación solar introduciendo al modelo del reactor electrolítico la curva de desempeño (Ec. 4.3) propuesta por Pletcher, et al. (2011), como se observa hay un desfase mayor entre la curva de incidencia de radiación solar y la producción de hidrogeno en relación a lo observado en la Figura 4.20, esto debido al comportamiento del voltaje disponible del electrolizador dado por su curva de desempeño. La Figura 4.21, muestra la producción de hidrógeno empleando un panel solar cuyos parámetros se muestran en la Tabla 4.5 y un electrolizador alcalino para producción de hidrógeno cuyos parámetros se muestra en la Tabla 4.5.

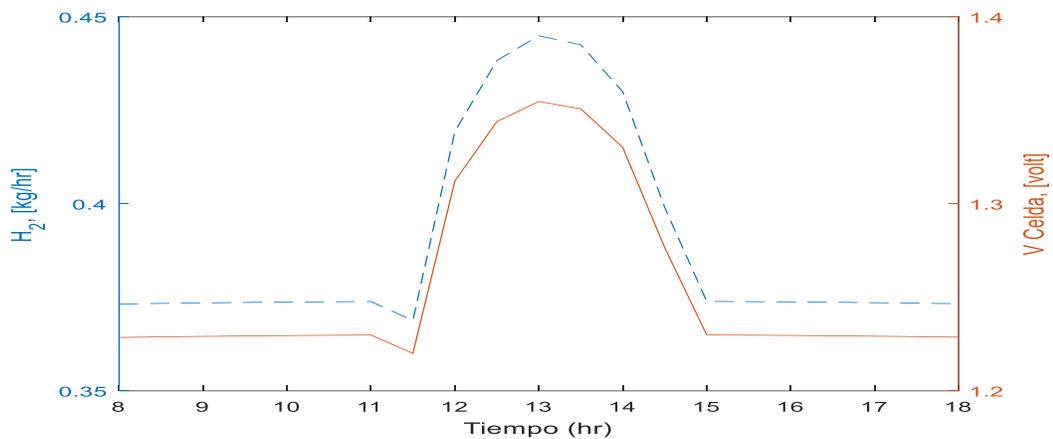


Figura 4.21 Comportamiento de la radiación e hidrógeno generado en un día promedio

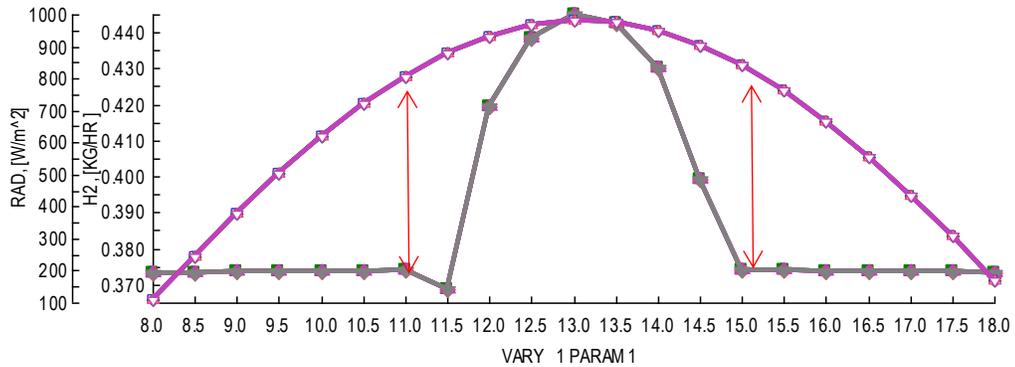


Figura 4.22 Incidencia de radiación solar y producción de hidrógeno sujeto a la curva de desempeño I-V del reactor electrolítico.

$$V = V_{rev} + r \cdot i + s \cdot \log(t \cdot i + 1) \tag{Ec. 4.3}$$

Tabla 4.5 Parámetros del Panel Solar y del reactor electrolítico

Parámetros panel solar	Parámetros reactor electrolítico
Isc = 7.84	$r_1=3.53588e-4$
Voc = 36.3	$r_2=-3.0215e-6$
Ns = 60	$s=2.2396e-1$
Kv = -0.361	$t_1=5.13093$
Ki = 0.102	$t_2=-2.40447e2$
A = 0.981	$t_3=5.99576e3$
Rs = 0.393	$r = r_1 + r_2 \cdot T$
Rsh = 313.4	$t = t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^2}$
G = RAD	
TCel = 25	
Gref = 1000	
q = 1.6e-19	
k = 1.38e-23	

Empleando un ϕ_{CH_4} (PHI_CH4) de 0.2 a 0.4 en incrementos de 0.05 y un ϕ_{H_2} (PHI_H2) de 0.06, sin intercambio térmico en EX-4 se obtiene la Figura 4.23, en la que se puede observar la eficiencia tiene a incrementar al inicio cuando incrementa la producción de hidrogeno (11:15 hr) sin embargo este incremento sufre un decaimiento súbito esto debido al efecto de la condición térmica alcanzada en los gases de combustión del reactor REAC-H2 sobre los gases de la corriente IN-PFR, el intercambio térmico llevado a cabo en el intercambiador EX-2 produce el aumento de la temperatura alcanzada en los gases de combustión del reactor REAC-CH4, limitando la operación de la turbina del ciclo de metano.

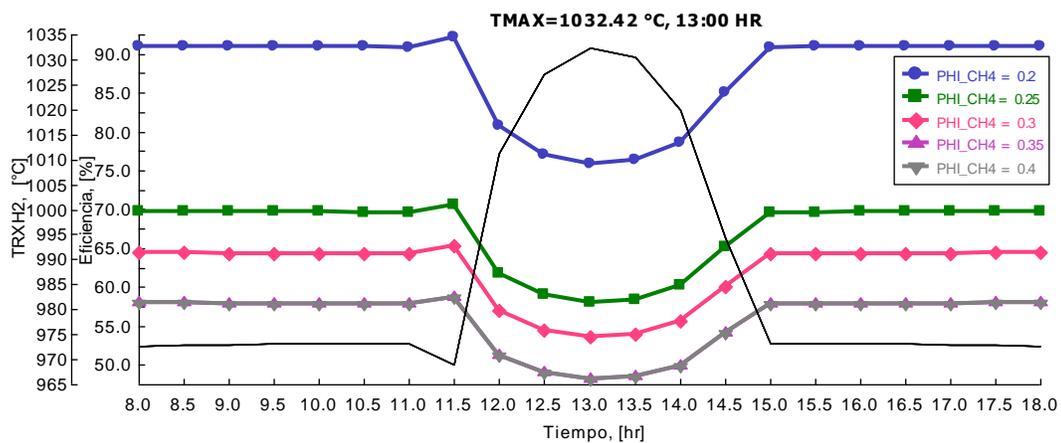


Figura 4.23 Temperatura de la corriente producto del reactor de REAC-H2 y Eficiencia del ciclo a ϕ_{CH_4} de 0.2 a 0.4 en incrementos de 0.05 y un ϕ_{H_2} de 0.06.

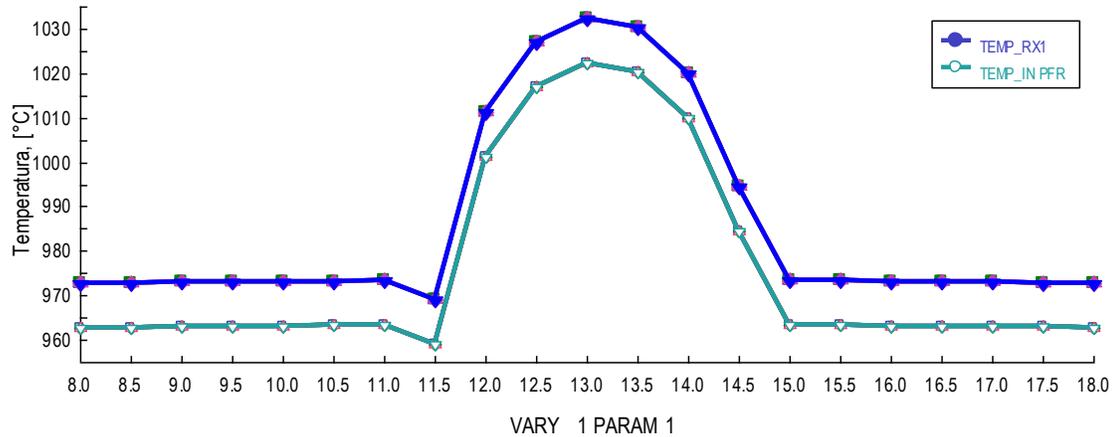


Figura 4.24 Temperatura de las corrientes productos de los reactores un ϕ_{CH_4} de 0.2 a 0.4 en incrementos de 0.05 y un ϕ_{H_2} de 0.06.

Está claro que la utilización de H_2 produce altos niveles de temperatura pudiéndose alcanzar condiciones térmicas técnicamente no viables, en este trabajo de tesis se considera como límite térmico de operación un valor de 2026.85 °C (2300 K) ya que es el máximo valor térmico para cumplir con estándares de operación razonable en quemadores de difusión, (Chiesa, et al., 2005). En comparación con el gas natural, la combustión de hidrógeno conduce a un menor caudal másico y a una diferente composición de los gases del producto, con un mayor contenido de agua que a su vez influye en el peso molecular y el calor específico de la mezcla. Los efectos más relevantes sobre el funcionamiento de una turbina de gas son: 1) una variación de la caída de entalpía en la expansión, 2) una variación del caudal en la entrada de la turbina que, a su vez, afecta la adaptación turbina / compresor, 3) una variación del coeficiente de transferencia de calor en el lado exterior de las palas de la turbina, que afecta el rendimiento del sistema de refrigeración (Chiesa, et al., 2005). El efecto de la corriente S1 (corriente que proviene del reactor REAC- H_2 y que se emplea para precalentar la corriente de entrada del reactor REAC- CH_4) sobre el cambio de la entalpía en la turbina de metano es significativa, esto se puede observar ya que la variación de entalpía de la corriente

de proceso es más significativo entre las 11:00 y 15:00 hrs, periodo dentro del cual se lleva a cabo la máxima producción de hidrógeno, y por consiguiente hay más disponibilidad de energía en el proceso.

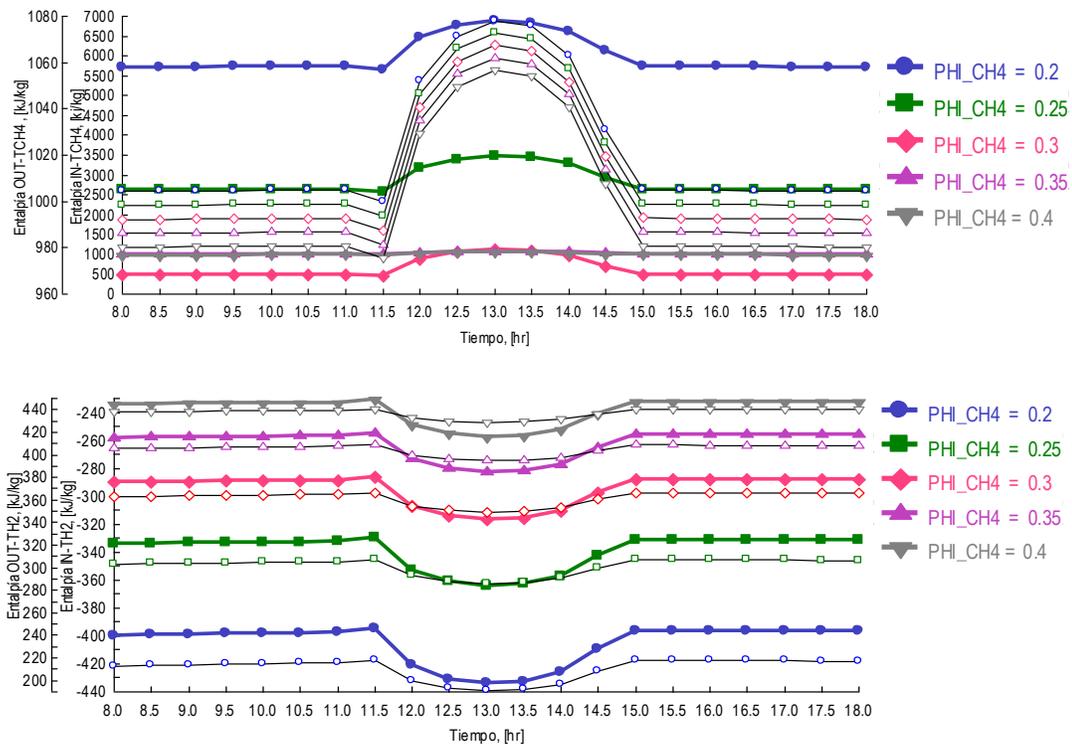


Figura 4.25 Entalpía de las corrientes de entrada y salida en turbinas TCH4 y TH2.

El efecto de la temperatura de trabajo de la celda es también un factor importante en la estabilidad del ciclo de potencia. Cuando la temperatura de la celda es variable la producción de hidrógeno presenta una mayor variabilidad afectando la eficiencia del proceso, observándose picos localizados promoviendo inestabilidad en la eficiencia del proceso así como su disminución. Esto se puede observar en Figura 4.26. La variación de en producción de hidrogeno se ve reflejado en los requerimientos de oxidante, el cual debe ser ajustado a cada variación en la producción de hidrógeno como se observa en Figura 4.27.

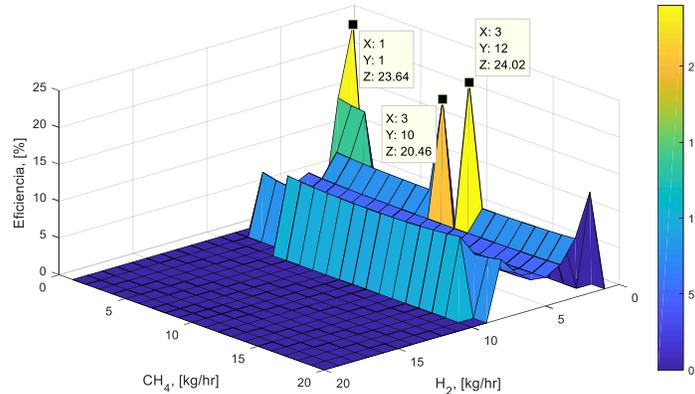


Figura 4.26 Eficiencia del proceso a temperatura variable en la operación de la celda electrolítica.

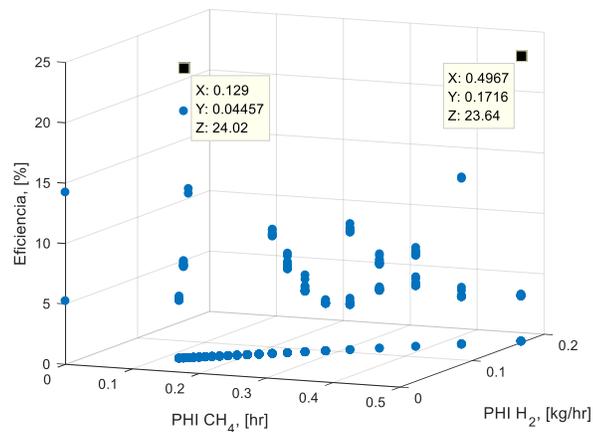


Figura 4.27 Eficiencia vs ϕ_{H_2} , ϕ_{CH_4} , del proceso a temperatura variable en la operación de la celda electrolítica.

El efecto de la relación aire-hidrógeno sobre la eficiencia del proceso es más significativa en comparación con la relación aire-metano como se puede observar en la Figura 4.28, por lo que se realiza el análisis de la estabilidad del sistema para tres diferentes condiciones de la variable aire-hidrogeno.

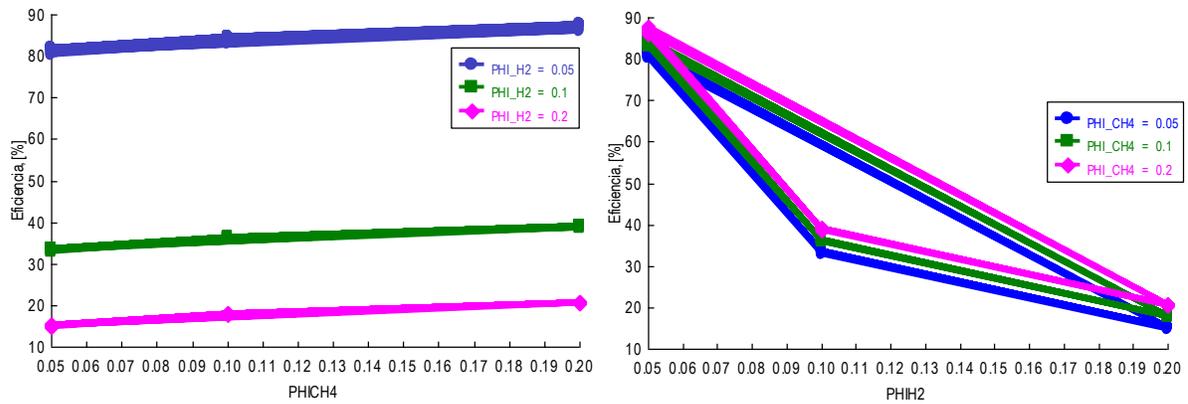


Figura 4.28 Eficiencia vs ϕ_{H_2} , ϕ_{CH_4} , del proceso a temperatura variable en la operación de la celda electrolítica.

4.5 Análisis de estabilidad

Un sistema se puede clasificar basado en la estabilidad de la siguiente manera: Sistema absolutamente estable, Sistema condicionalmente estable y Sistema marginalmente estable. Un sistema marginalmente estable, es estable al producir una señal de salida con amplitud constante y frecuencia constante de oscilaciones para entrada acotada. El sistema de control de bucle abierto es marginalmente estable si dos polos cualesquiera de la función de transferencia de bucle abierto están presentes en el eje imaginario. De manera similar, el sistema de control de bucle cerrado es marginalmente estable si dos polos cualesquiera de la función de transferencia de bucle cerrado están presentes en el eje imaginario. A partir de la simulación de un día promedio, para tres condiciones críticas aire-combustible se analizó la tendencia del proceso a presentar características de un sistema marginalmente estable a temperatura de la celda constante (25°C). Las curvas de respuesta de: Radiación, Corriente disponible en la celda, H₂ producido se muestran en la Figura 4.29.

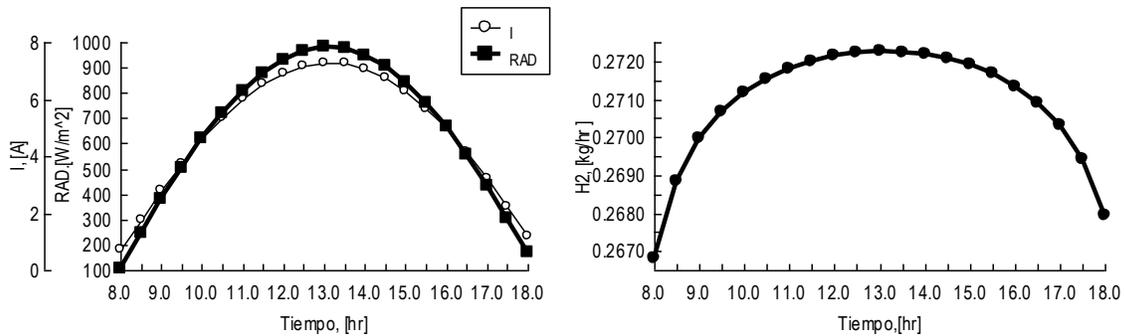


Figura 4.29 Curvas de respuesta de Radiación (RAD), Corriente de la celda (I), Hidrógeno producido (H2).

En la Tabla 4.6 se muestran los resultados de las curvas de respuesta del ciclo de potencia para $\phi_{H2} = 0.06, 0.1, 0.2$ y $\phi_{CH4} = 0.05, \phi_{H2} = 0.1$ y $\phi_{CH4} = 0.2$. Los resultados del análisis de estabilidad se muestran en las Tablas 4.6-4.10.

Tabla 4.6 Curvas de respuesta de la eficiencia, en operación a altas temperaturas.

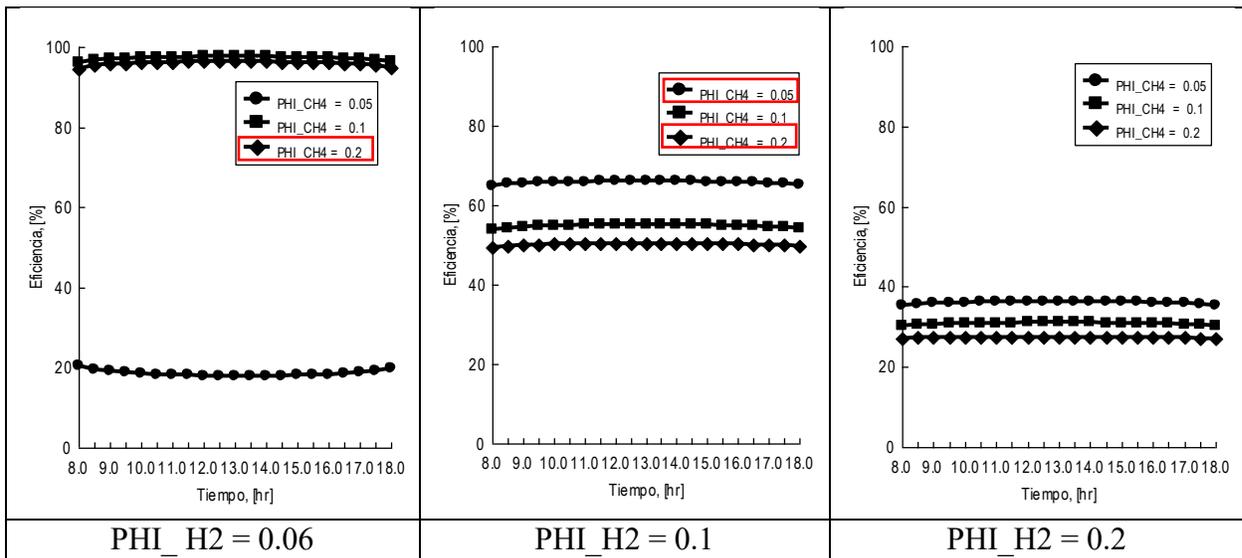
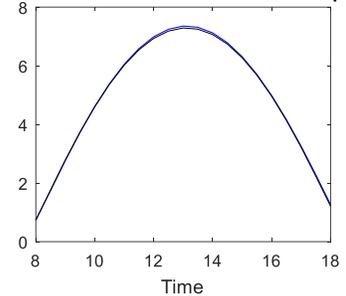
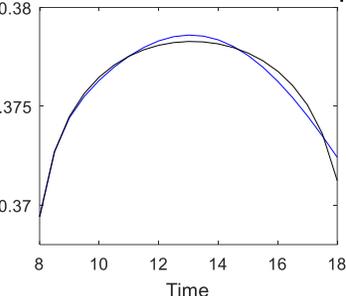
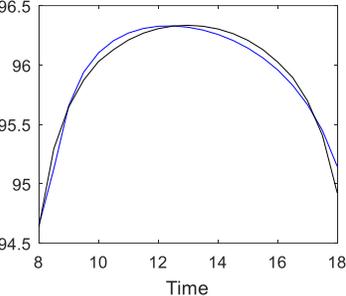
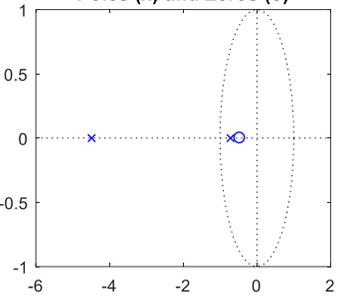
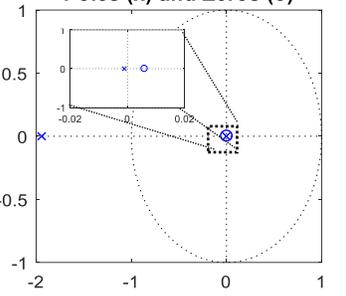
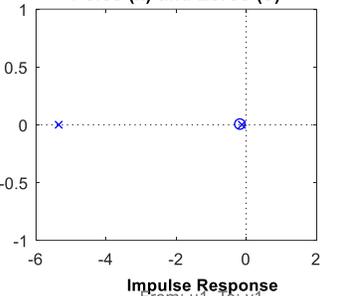
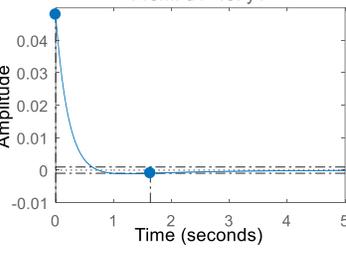
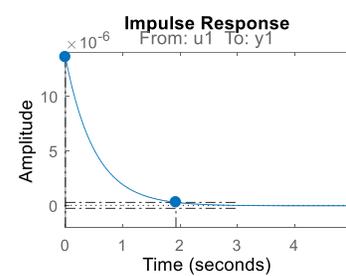
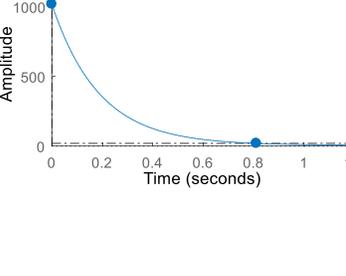


Tabla 4.7 Análisis de la curva de respuesta $\phi_{H2}=0.1$, $\phi_{CH4}=0.05$

A	B	C
Input= RAD , output=I Fit to estimation= 98.04% Sistema estable	Input= RAD , output=Eficiencia Fit to estimation= 84.79% Sistema criticamente estable	Input= FH2 , output=Eficiencia Fit to estimation= 83.62.% Sistema estable con tendencia marginalmente estable
Measured and simulated model output 	Measured and simulated model output 	Measured and simulated model output 
Poles (x) and Zeros (o) 	Poles (x) and Zeros (o) 	Poles (x) and Zeros (o) 
Impulse Response From: u1 To: y1 	Impulse Response From: u1 To: y1 	Impulse Response From: u1 To: y1 
$\frac{0.04793 s + 0.02222}{s^2 + 5.2 s + 3.206}$	$\frac{1.357e-05 s - 8.03e-08}{s^2 + 1.944 s + 0.002203}$	$\frac{1020 s + 166.4}{s^2 + 5.469 s + 0.6576}$

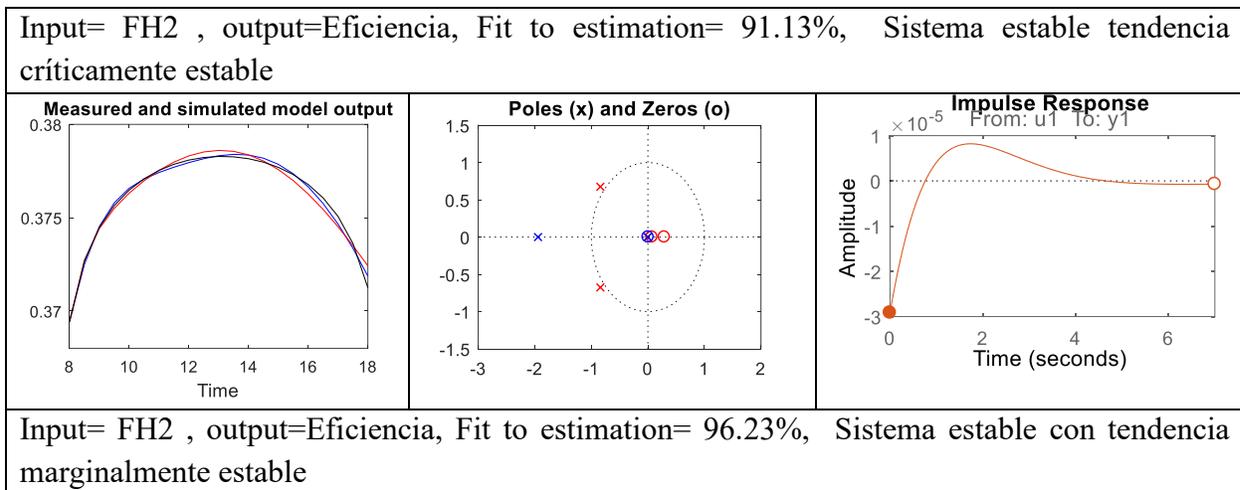
Se puede observar que la función de transferencia I/RAD obtenida en los casos mostrados en las Tablas 4.7, 4.9 y 4.10 es la misma en todos los escenarios, esto es debido a que en todas las simulaciones se emplearon los datos de radiación correspondiente a el mismo día promedio, por lo que esta no sufrió cambios, no así las demás funciones de transferencias.

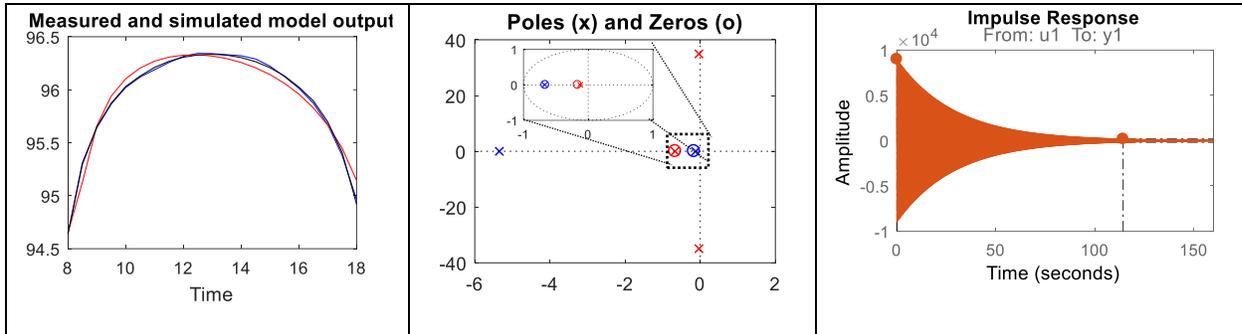
Realizando un segundo ajuste empleando un orden superior de la función de transferencia que representa el sistema de la columna B y C de la

Tabla 4.7 se observa que el factor de correlación es mejor y se hace más evidente el estado críticamente estable del sistema.

$$\frac{-2.915e-05 s^2 + 1.065e-05 s - 6.215e-07}{s^3 + 1.686 s^2 + 1.172 s + 0.006499} \quad \frac{3.147e05 s + 2.088e05}{s^3 + 0.7404 s^2 + 1221 s + 820.2}$$

Tabla 4.8 Análisis de la relación Eficiencia/FH2 para la condición $\phi_{H2}=0.1$, $\phi_{CH4}=0.05$





Los resultados mostrados en la columna B de la Tabla 4.9 y la Tabla 4.10 se consideran característicos de un sistema críticamente estable ya que hay un polo en el origen y los demás polos en el semiplano negativo. El caso de la columna C de la Tabla 4.9 se considera como estable con tendencia a marginalmente estable.

Tabla 4.9 Análisis de la curva de respuesta $\phi_{H2}=0.1$, $\phi_{CH4}=0.2$

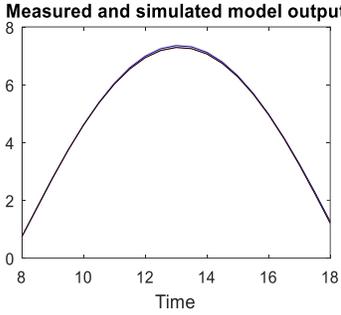
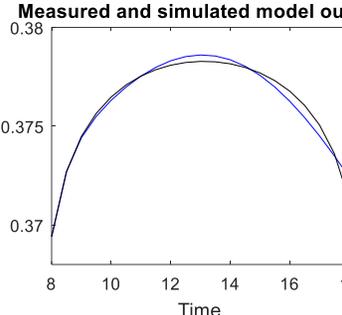
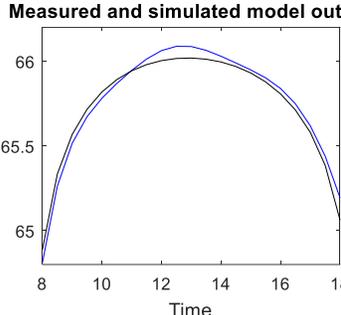
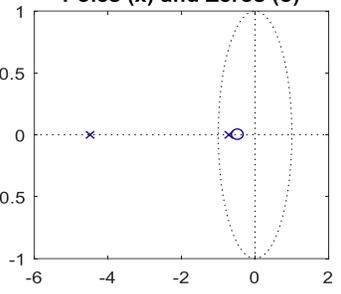
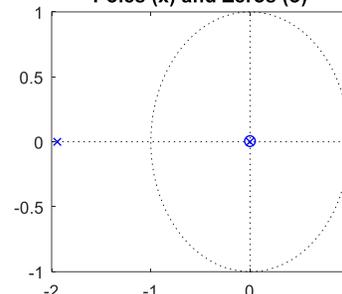
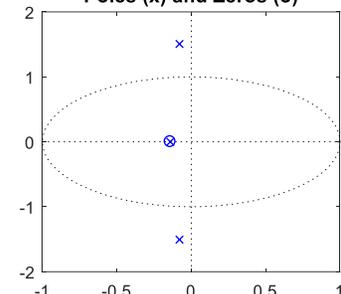
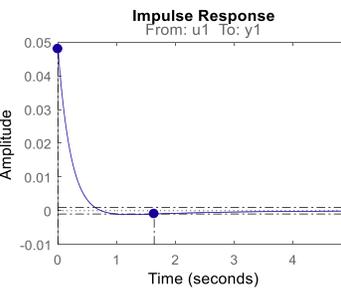
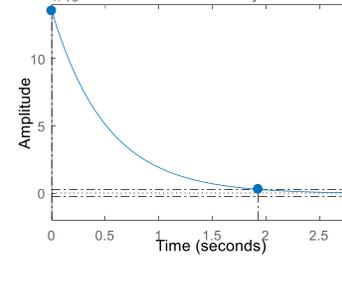
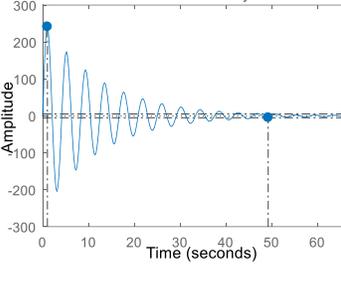
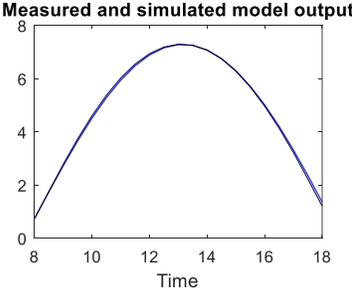
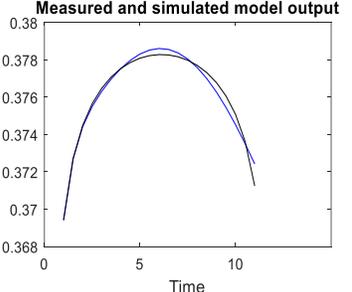
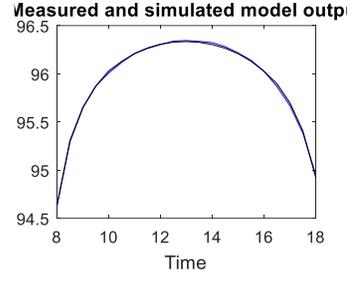
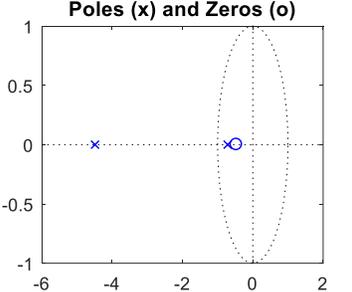
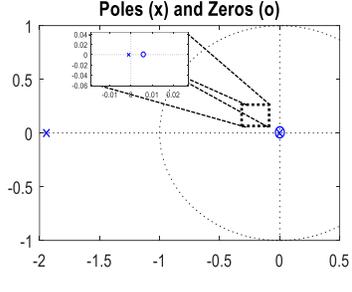
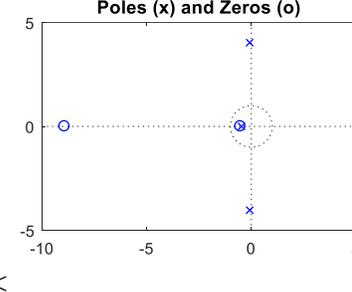
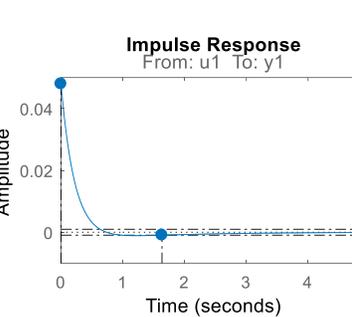
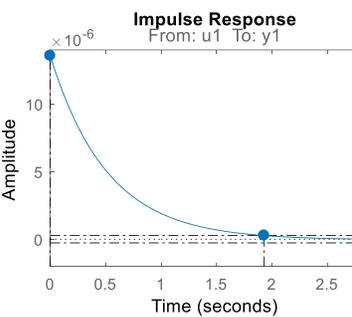
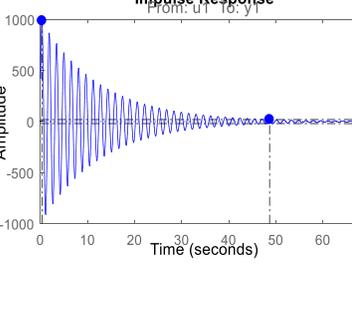
A	B	C
Input= RAD , output=I Fit to estimation= 98.04% Sistema estable	Input= RAD , output=Eficiencia Fit to estimation= 84.79% Sistema criticamente estable	Input= FH2 , output=Eficiencia Fit to estimation= 83.07% Sistema estable tendencia marginalmente estable
<p>Measured and simulated model output</p> 	<p>Measured and simulated model output</p> 	<p>Measured and simulated model output</p> 
<p>Poles (x) and Zeros (o)</p> 	<p>Poles (x) and Zeros (o)</p> 	<p>Poles (x) and Zeros (o)</p> 
<p>Impulse Response</p> 	<p>Impulse Response</p> 	<p>Impulse Response</p> 
$\frac{0.04793 s + 0.02222}{s^2 + 5.2 s + 3.206}$	$\frac{1.357e-05 s - 8.03e-08}{s^2 + 1.944 s + 0.002203}$	$\frac{394.5 s + 55.76}{s^3 + 0.2988 s^2 + 2.298 s + 0.3201}$

Tabla 4.10 Análisis de la curva de respuesta $\phi_{H2}=0.06$, $\phi_{CH4}=0.2$

A	B	C
Input= RAD , output=I Fit to estimation= 96.71% Sistema estable	Input= RAD , output=Eficiencia Fit to estimation= 84.79% Sistema estable con tendencia a críticamente estable	Input= FH2 , output=Eficiencia Fit to estimation= 96.74.% Sistema críticamente estable con tendencia a marginalmente estable
		
		
		
$\frac{0.04793 s + 0.02222}{s^2 + 5.2 s + 3.206}$	$\frac{1.357e-05 s - 8.03e-08}{s^2 + 1.944 s + 0.002203}$	$\frac{417.4 s^2 + 3941 s + 1942}{s^3 + 0.6293 s^2 + 16.34 s + 7.629}$

En la Tabla 4.10 podemos observar que, cuando la función relaciona las variables RAD(input)/ I(output) mostrada en la columna A y RAD(input)/ Eficiencia(output) mostrada en la columna B, se presenta un cero en el semiplano derecho, en estos casos nuestro sistema **NO es inestable**, sin embargo la respuesta del proceso tendrá un determinado comportamiento en su respuesta dinámica. Los coeficientes de una (Ec. 4.4) son aportados por los ceros, estos ponderan los términos que están relacionados con la dinámica del sistema (términos exponenciales, α_i).

$$f(t) = c_1 e^{\alpha_1 t} + c_2 e^{\alpha_2 t} + \dots + c_n e^{\alpha_n t} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Por lo que entendiendo esto, el cero de dicha función hace que la función de CERO y el polo de la función hace que de INFINITO. Sin embargo, el CERO en una función de transferencia puede ser interpretado como una “**transferencia nula**” entre la entrada y la salida del sistema en la frecuencia del propio cero. Esto quiere decir que si perturbamos el sistema justo en la frecuencia del cero (valor), esta no se verá reflejada en la respuesta del sistema. Cuando el cero está **lejos del eje imaginario**, implica la presencia de una pequeña derivada (pendiente) en el sistema, por otro lado, **si el cero está cerca del eje imaginario**, dicho cero va a colocar una derivada muy grande, creando un mayor efecto en la respuesta del sistema, creando un **sobreimpulso**. De la misma forma, entre más cerca el cero se encuentre del eje imaginario, mayor será su efecto sobre la respuesta del sistema como se observa en la respuesta a una señal impulso de la primera y segunda columna en la Tabla 4.10 mismas que se pueden comparar con la primera y segunda columna de la Tabla 4.9.

A partir del análisis de las respuestas del proceso ante las perturbaciones en la temperatura de trabajo de la celda electrolítica, flujo y composición de las corrientes de entrada al proceso se puede concluir que la relación equivalente combustible/aire (ϕ) es un factor que impacta significativamente en la eficiencia y estabilidad del sistema ya que esta

determina la temperatura alcanzada en el combustión, en donde ϕ_{H_2} tiene un mayor efecto que ϕ_{CH_4} como se observa en la Figura 4.30 y Figura 4.31. Evitando el sobrecalentamiento de la corriente SAL-PFR en el punto de intercambio después del reactor REAC-CH4 (intercambiador EX4).

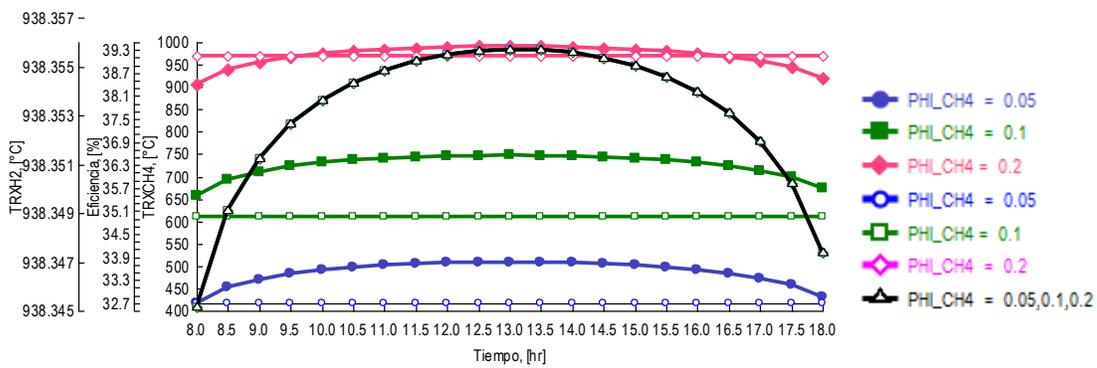


Figura 4.30 Efecto de $\phi_{CH_4}=0.05, 0.1, 0.2$ y $\phi_{CH_2}=0.1$ en la eficiencia y temperatura del sistema de reacción.

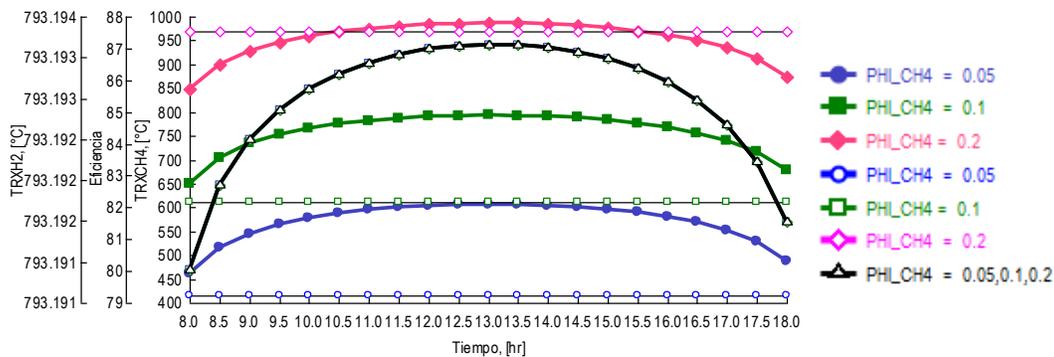
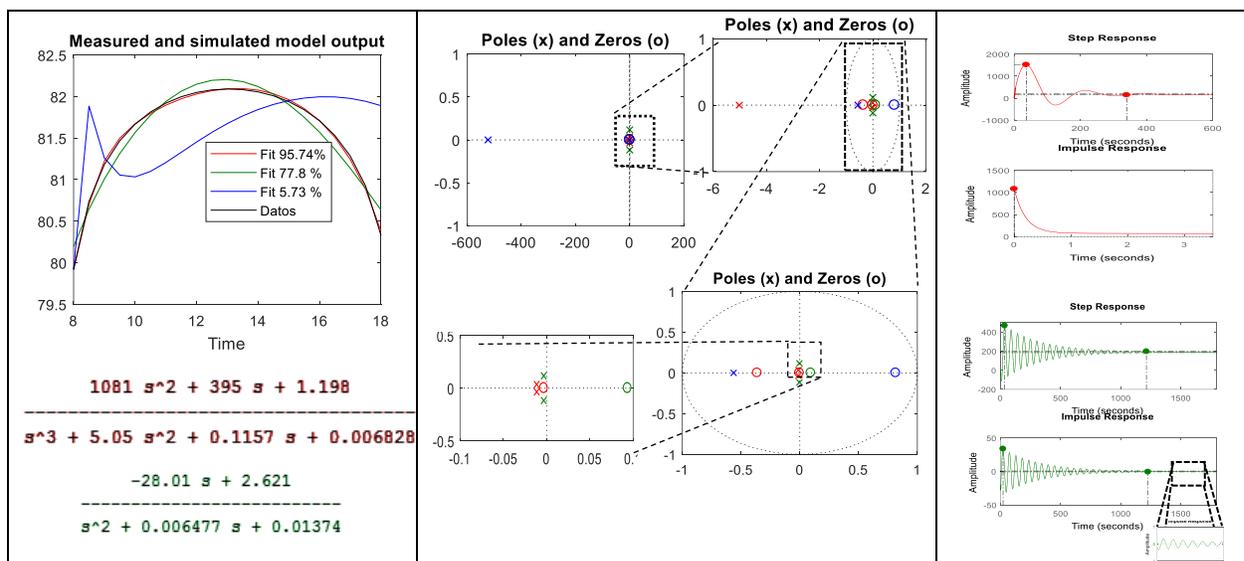


Figura 4.31 Efecto de $\phi_{CH_4}=0.05, 0.1, 0.2$ y $\phi_{CH_2}=0.05$ en la eficiencia y temperatura del sistema de reacción.

Si bien se observa que la Figura 4.30 y Figura 4.31 que la eficiencia es estable esta presenta una variación debida a la fluctuación que presenta la producción de hidrógeno, esto

se ve reflejado en modelo Eficiencia/FH2, como se observa en los resultados de la Tabla 4.11, en donde en la tercera columna se puede observar que si bien el sistema alcanza la estabilidad esta mantiene una oscilación constante, por lo que la señal presenta la característica de marginalmente estable. Existen dos factores para que este comportamiento se presente: (1) el modelo de ajuste es determinante, si bien es cierto que los modelos que tuvieron un mejor ajuste presentaban de forma evidente la característica de marginalmente estable o críticamente estable, aquello con un mejor factor de correlación otorgaban información que permitía clasificar al sistema como “estable con tendencia a marginalmente estable”: (2) relación equivalente combustible/aire (ϕ), siendo la eficiencia más sensible a las variaciones que se presentan en ϕ_{H2} .

Tabla 4.11 Análisis de la relación de señales Input= FH2, output=Eficiencia para el sistema $\phi_{CH4}=0.05$, $\phi_{CH2}=0.06$.



Ante los resultados presentados podemos concluir que valores altos de ϕ , permiten: (1) conversiones altas en el proceso de combustión y (2) amortiguamiento térmico ante los picos

térmicos por sobrecalentamiento. En este sentido el aire en exceso (y la humedad en la corriente de aire) es empleado como inerte para amortiguar cambios bruscos de temperatura no afectando la operación de la turbina. La relación aire/combustible en las corrientes de entrada al proceso tiene un efecto combinado por lo que presentan puntos de inflexión en las curvas de respuesta del sistema.

Capítulo 5
Conclusiones

Conclusiones

- 5.1 El modelo de simulación presenta una mejor reproducción del escenario experimental reportada por Kato, et al. (1997), esta mejora se logro introduciendo la curva de desempeño del turbocompresor con lo que se logro incluir las restricciones mecánicas y termodinámicas del equipo en el desempeño del ciclo de potencia.
- 5.2 Un modelo sinusoidal de un solo término reproduce el comportamiento de las variables meteorológicas para periodos de 24 hr.
- 5.3 La consideración de temperatura constante en la operación de la celda fotovoltaica es más viable en periodos en donde el día tiene una variación térmica de $\pm 20\%$ lo cual satisface la mayor parte del año.
- 5.4 Entre las 11:00 y las 15:00 hr se presenta la principal perturbación en el proceso, este lapso de tiempo coincide con la región de máxima producción de hidrogeno, por lo que es evidente que a mayo oscilación en la radiación solar mayor oscilación en la producción de hidrógeno y por consiguiente en la estabilidad del ciclo de potencia.
- 5.5 La combustión de hidrógeno genera mayor cantidad de energía que la combustión de metano por unidad de masa, por lo que la relación aire-combustible es un factor importante en el control de temperaturas alcanzadas en las corrientes de proceso, siendo la eficiencia del ciclo de potencia más sensible las variaciones en la relación aire-combustible del ciclo de hidrógeno, debido al efecto térmico sobre el cambio de entalpia logrado (o requerido) en las turbinas.
- 5.6 La tendencia del sistema a presentar un comportamiento marginalmente estable es más evidente a bajos valores de ϕ , esto debido a que a estas condiciones es posible lograr conversiones altas en la combustión, sin embargo, también se presenta un

efecto secundario en el exceso de aire al actuar este como amortiguador del sobrecalentamiento.

- 5.7 El diseño preliminar de un lazo de control de este tipo de sistema debe ir dirigido a ajuste de la relación aire combustible en el ciclo de hidrógeno teniendo como variable de control la temperatura de la corriente de entrada del reactor REAC-CH₄.

Bibliografía

-
- Abbasi, R., Wu. L., S.E. Wanke, y R.E. Hayes. «Kinetics of methane combustion over Pt and Pt–Pd catalysts.» *Chemical Engineering Research and Design* 90, n° 11 (2012): 1930-1942.
- Ahn, Yun-Ho, y otros. «Clathrate nanocage reactor for the decomposition of greenhouse gas.» *Chemical Engineering Journal* 359 (2019): 1629-1634.
- Alsaid, B. «Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell Module Array with Two-Diode Model.» *International Journal of Computer Technology and Electronics Engineering* 1, n° 3 (2012): 6-11.
- Amores, Ernesto , Jesus Rodríguez, y Christian Carreras. «Influence of operation parameters in the modeling of alkaline water electrolyzers for hydrogen production.» *International journal of hydrogen energy* 39, n° 25 (2014): 13063-13078.
- Banco Mundial. «Emisiones de CO₂ (toneladas métricas per cápita) - Latin America & Caribbean.» 2014.
https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC?locations=ZJ&name_desc=false. (último acceso: 2019).
- Baral, Suresh, y Kyung Chun Kim. «Simulation, Validation and Economic Analysis of Solar Powered Organic Rankine Cycle for Electricity Generation.» *Journal of Clean Energy Technologies* 3, n° 1 (2015): 62-67.
- Chen, Junjie, Longfei Yan, y Wenya Song. «Hydrogen-assisted catalytic ignition characteristics of propane–air with a chemical kinetic model in a Pt/γ-Al₂O₃ micro-combustor in different feeding modes.» *RSC Advances* 5, n° 19 (2015): 14720-14734.
- Chiesa, Paolo , Giovanni Lozza, y Luigi Mazzocchi. «Using Hydrogen as Gas Turbine Fuel.» *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power* 127, n° 1 (2005): 73-80.
- Darabi, Mohsen, Mohammad Mohammadiun, Hamid Mohammadiun, y Saeed Mortazavi. «Simulation and optimization integrated gasification combined cycle by used aspen

-
- hysys and aspen plus.» *International Journal of Scientific World* 3, nº 1 (2015): 178-186.
- Davis, F, P Seamus, and J Higson. "Biofuel cells—recent advances and applications." *Biosens Bioelectron* 22 (2007).
- DE WFRTH DW. «Flue gas analysis of gas-fired appliances.» *Appliance.*, nº 32 (1975): 72–7.
- Diantoro, Markus , Thathit Suprayogi, Arif Hidayat, Ahmad Taufiq, Abdulloh Fuad, y Risa Suryana. «Shockley's Equation Fit Analyses for Solar Cell Parameters from I-V Curves.» *International Journal of Photoenergy*, 2018.
- EMA's, Estaciones Meteorológicas Automáticas. *Sistema de Información y Visualización de Estaciones Automáticas (SIEVA)*. 2020. <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>.
- Frassoldati , A, T Faravelli, y E Ranzi. «A wide range modeling study of formation and.» *Int J Hydrogen Energy* 31, nº 15 (2006): 2310–28.
- Giori, Chiara, y otros. «Sustainability of using vineyard pruning residues as an energy source: Combustion performances and environmental impact.» *Fuel* 243, nº 1 (2019): 371-380.
- Hamoodi, Ali H, Safwan A Hamoodi, y Rasha A Mohammed. «Characteristics, Photovoltaic Modeling and Effecting of Temperature and Irradiation on I-V and P-V.» *International Journal of Applied Engineering Research* 13, nº 5 (2018): 3123-3127.
- Hara, I. «Current status of H2 and fuel cell programs of Japan.» 2013. http://www.iphe.net/docs/HomePage_RecentInfo/IPHE%20Presentation%20to%20Ministries%20of%20the%20Govt%20of%20Canada%20June%202017.pdf (último acceso: 2018).
- Heywood, John B. *Internal combustion engine fundamentals*. Estados Unidos: McGraw-Hill Education, 1988.

-
- Hong, Jongsup, Gunaranjan Chaudhry, J.G. Brisson, Randall Field, Marco Gazzino, y Ahmed F. Ghoniem. «Analysis of oxy-fuel combustion power cycle utilizing a pressurized coal combustor.» *Energy* 34, n° 9 (2009): 1332-1340.
- International Energy Agency. *IEA - Data and statistics*. 2012. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tables/?country=WORLD&year=2017&energy=Balances> (último acceso: 2019).
- Kato, S, y N Nomura. «Hydrogen gas-turbine characteristics and hydrogen energy system schemes.» *Energy Conversion and Management* 38, n° 10-13 (1997): 1319-1326.
- Konnov, Alexander A. «Remaining uncertainties in the kinetic mechanism of hydrogen combustion.» *Combustion and Flame* 152, n° 4 (2008): 507-528.
- Kumar, P. Ravindra, V. Ramachandra Raju, y N. Ravi Kumar. «Simulation and parametric optimisation of thermal power plant cycles.» *Perspectives in Science* 8, n° 1 (2016): 304-306.
- Kyriakopoulos, Grigorios L., y Garyfallos Arabatzis. «Electrical energy storage systems in electricity generation: Energy policies, innovative technologies, and regulatory regimes.» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 56, n° 1 (2016): 1044-1067.
- Lilik, Gregory K., Hedan Zhang, José Martin Herreros, Daniel C. Haworth, y André L. Boehman. «Hydrogen assisted diesel combustion.» *International Journal of Hydrogen Energy* 35, n° 9 (2010): 4382-4398.
- Lin, Boqiang, y I. Nelson Benjamin. «Causal relationships between energy consumption, foreign direct investment and economic growth for MINT: Evidence from panel dynamic ordinary least square models.» *Journal of Cleaner Production* 197, n° 1 (2018): 708-720.
- Marchenko, O.V., y S.V. Solomin. «The future energy: Hydrogen versus electricity.» *International Journal of Hydrogen Energy* 40, n° 10 (2015): 3801-3805.

-
- Marinov, N. M., C. K. Westbrook, y W. J. Pitz. «Detailed and global chemical kinetics model for hydrogen.» *8th International Symposium on Transport Properties*. Estados Unidos, 1995.
- Martínez, Isidoro. *Termodinámica básica y aplicada*. DOSSAT, 1992.
- Mohammad, H. Ahmadi, Alhuyi Nazari Mohammad, Ghasempour Roghayeh, Pourfayaz Fathollah, Rahimzadeh Mohammad, y Ming Tingzhen. «A review on solar-assisted.» *Energy Science and Engineering* 6, n° 1 (2018): 658–674.
- Mokhtar. M, AbdAllah, Mohammed Elayeb. M, y Tawfiag Ahmed. J. «Thermodynamics Optimization of GARRI (1) Combined Cycle Power Plant by Using ASPEN HYSYS Simulation.» *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication* 4, n° 1 (2016): 69 -78.
- Moratilla Soria, Beatriz Yolanda, y José Ignacio Linares Hurtado. *El hidrógeno y la energía*. España: Universidad Pontificia Comillas, 2007.
- Muñoz Cora, Angel Israel, Mayra Ruiz Reyes, y Francisco Manuel Pacheco Aguirre. *Síntesis de un ciclo de potencia para la producción de electricidad a partir de la combustión de hidrógeno*. 2020.
- Pletcher, Derek, y Xiaohong L. «Prospects for alkaline zero gap water electrolyzers for hydrogen production.» *International Journal of Hydrogen Energy* 36, n° 23 (2011): 15089-15104.
- Rowshanaie, Omid, Saari Mustapha, Kamarul Arifin Ahmad, y Hooman Rowshanaie. «Simulation of organic rankine cycle through fluegas to large scale electricity generation purpose.» *Jurnal Teknologi* 77, n° 27 (2015): 9-18.
- Ruiz Reyes, Mayra, Diana G. Ávila, M. Auxilio Osorio Lama, y Francisco M. Pacheco Aguirre. «(2014). Developmet of a preliminary model for the kinetic behavior of main

- pollutants in the city of Puebla.» *Revista Latinoamericana el Ambiente y las Ciencias* 5, n° 9 (2014): 1-13.
- SEGOB. «Programa Especial para el Aprovechamiento de Energías Renovables.» *Diario Oficial de la Federación*. 06 de 08 de 2009. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5101826&fecha=06/08/2009 (último acceso: Febrero de 2019).
- SEMARNAT, SPPA, and DGPC. *ESTRATEGIA NACIONAL VISIÓN 10-20-40 DE CAMBIO CLIMÁTICO*. 2013. www.gob.mx/inecc/documentos/estrategia-nacional-de-cambio-climatico-vision-10-20-40. (accessed 2018).
- SENER. *Diario Oficial de la Federación*. 2009. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5101826&fecha=06/08/2009 (último acceso: 2018).
- Smirnov, N.N., y V.F. Nikitin. «Modeling and simulation of hydrogen combustion in engines.» *International Journal of Hydrogen Energy* 39, n° 2 (2014): 1122-1136.
- Spayde, Emily, Pedro J. Mago, y Heejin Cho. «Performance Evaluation of a Solar-Powered Regenerative Organic Rankine Cycle in Different Climate Conditions.» *Energies* 10, n° 1 (2017): 94.
- Taamallah, S., K. Vogiatzaki, F.M. Alzahrani, E.M.A. Mokheimer, M.A. Habib, y A.F. Ghoniem. «Fuel flexibility, stability and emissions in premixed hydrogen-rich gas turbine combustion: Technology, fundamentals, and numerical simulations.» *Applied Energy* 154, n° 15 (2015): 1020-1047.
- U.S. Energy Information Administration. *International Energy Outlook 2017*. 2017. <https://www.eia.gov> (accessed Febrero 2019).

- Uddin, M.N., J. Taweekun, K. Techato, M.A. Rahman, M. Mofijur, y M.G. Rasul. «Sustainable Biomass as an Alternative Energy Source: Bangladesh Perspective.» *Energy Procedia* 160, nº 1 (2019): 648-654.
- Ursúa, Alfredo, and Pablo Sanchis. "Statedynamic modelling of the electrical behaviour of a commercial advanced alkaline water electrolyser." *International journal of hydrogen energy* 37, no. 1 (2012): 18598-18614.
- Venkata, M, Y Bhaskar, and P Sarma. "Biohydrogen production from chemical wastewater treatment by selectively enriched anaerobic mixed consortia in biofilm configured reactor operated in periodic discontinuous batch mode." *Waer Res* 41 (2007): 2652-2664.