



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“APLICACIÓN DEL EFECTO DE CENTRIFUGACIÓN POR CAMPOS
ELECTROMAGNÉTICOS PARA OPTIMIZAR EL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL
SYNGAS”**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO EN SISTEMAS ENERGÉTICOS SUSTENTABLES

P R E S E N T A:

LUIS JOSIMAR VENCES REYNOSO

ASESORA:

DRA. ELENA COLÍN OROZCO

COASESOR (ININ):

DR. RICARDO VALDIVIA BARRIENTOS

Toluca, Estado de México, Abril 2018



C. LUIS JOSIMAR VENCES REYNOSO
PASANTE DE INGENIERÍA EN SISTEMAS ENERGÉTICOS SUSTENTABLES
P R E S E N T E.

En respuesta a su solicitud, a continuación transcribo el tema aprobado por esta Dirección, que propuso el **DRA. ELENA COLÍN OROZCO**, con el fin de que lo desarrolle en la modalidad de **TESIS**, le informo que se autoriza la **impresión de su trabajo** para presentar su Evaluación Profesional.

"APLICACIÓN DEL EFECTO DE CENTRIFUGACIÓN POR CAMPOS ELECTROMAGNÉTICOS PARA OPTIMIZAR EL RENDIMIENTO ENERGÉTICO DEL SYNGAS."

	ÍNDICE
	RESUMEN
CAPITULO 1.	FUNDAMENTOS
CAPITULO 2.	FUENTE DE ALIMENTACIÓN
CAPITULO 3.	MONTAJE Y EXPERIMENTACIÓN
CAPITULO 4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS
CAPITULO 5.	CONCLUSIONES
	ANEXOS

Ruego a usted tomar nota de que en cumplimiento a lo especificado por la Ley de Profesiones, deberá prestar Servicio Social durante un tiempo mínimo de seis meses, como requisito indispensable para sustentar su Evaluación Profesional.

Así mismo, para la elaboración de la **TESIS** y demás trámites, deberá sujetarse a la reglamentación respectiva de esta Universidad.

ATENTAMENTE
PATRIA, CIENCIA Y TRABAJO

"2018, Año del 190 Aniversario de la Universidad Autónoma del Estado de México"

DRA. MARÍA DOLORES DURÁN GARCÍA
DIRECTORA DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

**/Saha.



Toluca, México a 16 de Agosto de 2018

Espacio Académico, Subdirector Académico, Coordinador de Programa
Presente

Carta de autorización para publicación en el RI

Declaración de autoría original, libre de embargo, susceptible de ser depositado en el Repositorio Institucional y solicitud de evaluación de grado.

Quien firma al calce, declaro bajo protesta de decir verdad que soy el(la) autor(a) de la obra (tipo de obra) Tesis titulada (título de la obra) Aplicación del Efecto de contrafugación por campos electro-magnéticos para optimizar el rendimiento energético del silyngas y estoy de acuerdo con la totalidad de su contenido, manifiesto mi conformidad y mi autorización para que se publique en Repositorio Institucional de la Universidad Autónoma del Estado de México, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto, en los términos del Reglamento de Acceso Abierto, la Normatividad vigente emitida por la Institución y las legislaciones aplicables en la materia.

Así mismo, declaro que responderé de la autoría y originalidad de la obra de mérito y del ejercicio pacífico de los derechos que autorizo en este acto, manifiesto que no existe otra persona física o moral a la que pertenezca; por lo cual libero de toda responsabilidad a la Universidad Autónoma del Estado de México de cualquier demanda o reclamación que llegara a formular alguna persona física o moral que se considere con derecho sobre la obra, asumiendo todas las consecuencias legales y económicas a que hubiera lugar.

De igual forma permito que la Oficina de Conocimiento Abierto perteneciente a esta Máxima Casa de Estudios, realice lo propio para el almacenamiento, preservación y difusión de la obra, con fines académicos y culturales en formato de acceso abierto y sin fines de lucro.

Firmo de conformidad y bajo protesta de decir verdad

Nombre y firma Luis Josimar Venes Reynoso
No de cuenta: 0912380



Agradecimiento

Al CONACYT por el apoyo económico otorgado durante todo este periodo de proyecto permitiéndome realizar la tesis de licenciatura y al ININ por permitirme el acceso a la infraestructura y equipo necesario para la realización de esta tesis.

A todo el equipo que conforma el Laboratorio de Aplicaciones del Plasma del ININ a quienes me recibieron con una gran calidez y me han hecho sentir como si estuviera en una gran familia.

Gracias al Dr. Ricardo Valdivia Barrientos por compartir sus conocimientos, el aceptarme a formar parte del proyecto de reformado de gases de efecto invernadero y por sus invaluable consejos.

Gracias a la Dra. Elena Colín Orozco por brindarme su apoyo y guía en la elaboración de esta tesis.

Gracias a mí madre, Carolina Reynoso que me han dado todo, sin pedir nada, quien con muchos sacrificios me apoyado para la culminación de esta tesis y hacer de mi lo que ahora soy.

Gracias a mi hermano, Manuel Vences por enseñarme a nunca desistir de mi objetivo y a quien dedico este trabajo.



Resumen

Los Gases de Efecto Invernadero (GEI) representan un problema que tiene una repercusión negativa de forma directa en el cambio climático, por ello se ha optado en utilizar tecnología de vanguardia basada en una descarga de plasma tibio, es decir un plasma de arco deslizante que tiene propiedades del plasma térmico y el plasma frío, además de que tiene la capacidad de tratar grandes flujos de manera continua a presión atmosférica, con un consumo de potencia no mayor a los 700W, sin la producción de elementos tóxicos no deseados como NO_x .

El presente documento de tesis de licenciatura es una investigación que parte del reformado de GEI por medio de descargas de plasma y está enfocada a la recuperación de energía, mediante el enriquecimiento del gas altamente energético como lo es el gas sintético (mezcla de hidrógeno y monóxido de carbono principalmente), a partir de la implementación de campos magnéticos por medio de una bobina donde se diseña y construye una fuente impulsional para el suministro de la intensidad de corriente eléctrica que genera los campos magnéticos, donde a partir de los resultados se opta por la implementación de una fuente de alta potencia para alcanzar un mayor amperaje y así generar un campo magnético más fuerte.

Los resultados mostrados se fundamentan en una serie de análisis como la espectroscopía de masas, simulaciones de flujo de gases, cálculos y experimentaciones, con los que se realiza un análisis del efecto del campo magnético aplicado para acelerar las partículas del plasma y su acción directa en la separación de especies por aceleración centrífuga.

Por último se realiza un estudio energético del reformado, concluyendo y realizando recomendaciones de modificaciones a futuro para el enriquecimiento del syngas.



ÍNDICE

Resumen	I
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VIII
Capítulo 1 Fundamentos	2
1.1 Introducción.....	3
1.2 Antecedentes.....	3
1.3 Plasma.....	6
1.3.1 Tipos de plasmas	6
1.4 Ionización y conductividad eléctrica	11
1.5 Separación de especies por centrifugación	12
1.6 Centrífugas de Plasma Parcialmente Ionizadas	12
1.7 Objetivo General:.....	14
1.7.1 Objetivos Particulares:.....	14
Hipótesis	15
1.8 Referencias	16
Capítulo 2 Fuente de alimentación	18
2.1 Introducción.....	19
2.2 Inversor de descarga.....	19
2.2.1 Inversor resonante serie de puente completo	19
2.3 Fuente de alimentación impulsional	21
2.4 Diseño de una fuente de alimentación impulsional.....	22
2.5 Implementación del efecto de centrifugación	23
2.5.1 Efecto Electromagnético.....	23
2.5.2 Centrífuga de plasma	24
2.6 Referencias.....	27
Capítulo 3 Montaje y Experimentación	28
3.1 Introducción.....	29
3.2 Instrumentación	29
3.3 Diseño del Reactor	30
3.4 Reformado por sincronización de fuentes.....	31
3.5 Reformado por implementación de fuente de alta potencia.....	34
3.5.1 Caso 1 reactor con partículas de hollín.....	35
3.5.2 Caso 2 reactor sin partículas de hollín	36



3.6 Diagnóstico eléctrico del deslizamiento de la descarga de plasma	37
3.7 Velocidad rotacional del plasma.....	38
3.8 Fuerza centrífuga de las especies	39
3.9 Balance Energético.	40
3.10 Referencias.	43
Capítulo 4 Análisis de Resultados	44
4.1 Introducción.	45
4.2 Análisis del diagnóstico eléctrico del plasma	45
4.3 Análisis de la velocidad rotacional del plasma.....	48
4.4 Evaluación de concentración de gases	50
4.4.1 Análisis de resultados de sincronización de fuentes.....	50
4.4.2 Análisis del Caso 1 con partículas de hollín.....	52
4.4.3 Análisis del Caso 2 sin partículas de hollín:	55
4.5 Análisis de la fuerza centrífuga de las especies	60
4.6 Balance Energético.	64
4.7 Poder Calorífico.....	73
4.8 Referencias.	85
Capítulo 5 Conclusiones	86
Conclusiones	87
Trabajo Futuro	88



ANEXOS	89
Anexo A	90
<i>Tabla A.1.- Características de la descarga de plasma tibio con la implementación de las dos fuentes</i>	90
<i>Tabla A.2.- Características de la experimentación con la implementación de la fuente de alta potencia, toma de la salida tangente.</i>	90
<i>Tabla A.3.- Características de la experimentación con la fuente de alta potencia conectada a la bobina, toma de la salida centro.</i>	91
<i>Tabla A.4.- Características de la experimentación a una potencia más elevada (650W) toma de la salida Tangente después de la limpieza del reactor.</i>	91
<i>Tabla A.5.- Características de la experimentación a una potencia más elevada toma de la salida centro después de la limpieza del reactor.</i>	91
Anexo B	92
<i>Tabla B.1. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor con carbono sólido.</i>	92
<i>Tabla B.2. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor limpio.</i>	94
Anexo C	96
<i>Tabla C.1. Cálculos del caso 1, para obtener la fuerza resultante de Lorentz</i>	96
<i>Tabla C.2 Aceleración de las especies antes de activar el campo magnético.</i>	96
<i>Tabla C.3. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0168 T.</i>	96
<i>Tabla C.4. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0289 T.</i>	97
<i>Tabla C.5. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0424 T.</i>	97
<i>Tabla C.6. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0568 T.</i>	97
<i>Tabla C.7. Cálculos del caso 2, para obtener la fuerza resultante de Lorentz.</i>	98
<i>Tabla C.8. Aceleración de las especies antes de activar el campo magnético.</i>	98
<i>Tabla C.9. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0168 T.</i>	98
<i>Tabla C.10. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0289 T.</i>	99
<i>Tabla C.11. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0424 T.</i>	99
<i>Tabla C.12. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0568 T.</i>	99
Anexo D	100
<i>Tabla D.1. Flujo promedio en (mol/s) del H₂ del caso 1</i>	100
<i>Tabla D.2. Flujo promedio en (mol/s) del CO del caso 1.</i>	100
<i>Tabla D.3. Flujo promedio en (mol/s) del CH₄ del caso 1.</i>	100
<i>Tabla D.4. Flujo promedio en (mol/s) del C₂H₂ del caso 1.</i>	100
<i>Tabla D.5. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 1.</i>	101



<i>Tabla D.6. Flujo promedio en (mol/s) del H₂ del caso 2 en el punto de muestreo tangente. ..</i>	<i>101</i>
<i>Tabla D.7. Flujo promedio en (mol/s) del CO del caso 2 en el punto de muestreo tangente. .</i>	<i>101</i>
<i>Tabla D.8. Flujo promedio en (mol/s) del CH₄ del caso 2 en el punto de muestreo tangente. 101</i>	<i>101</i>
<i>Tabla D.9. Flujo promedio en (mol/s) del C₂H₂ del caso 2 en el punto de muestreo tangente. 102</i>	<i>102</i>
<i>Tabla D.10. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 2, del muestreo tangencial.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla D.11. Flujo promedio en (mol/s) del H₂ del caso 2 en el punto de muestreo.....</i>	<i>102</i>
<i>centro.</i>	<i>102</i>
<i>Tabla D.12. Flujo promedio en (mol/s) del CO del caso 2 en el punto de muestreo centro. ...</i>	<i>102</i>
<i>Tabla D.13. Flujo promedio en (mol/s) del CH₄ del caso 2 en el punto de muestreo centro. ...</i>	<i>103</i>
<i>Tabla D.14. Flujo promedio en (mol/s) del C₂H₂ del caso 2 en el punto de muestreo centro..</i>	<i>103</i>
<i>Tabla D.15. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 2, del muestreo centro.....</i>	<i>103</i>



ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1 Fundamentos	2
<i>Figura 1.1 Característica de corriente de tensión de un tubo de descarga eléctrica en modo DC [10].</i>	7
<i>Figura 1.2. Comportamiento del reformado en temperaturas bajas [14].</i>	10
<i>Figura 1.3 Comportamiento del reformado en temperaturas altas [14].</i>	10
Capítulo 2 Fuente	18
<i>Figura 2.1 Diagrama del inversor resonante serie con transformador de alto voltaje [7].</i>	21
<i>Figura 2.2. Etapa de aislamiento de la fuente pulsante</i>	22
<i>Figura 2.3. Etapa de potencia</i>	23
<i>Figura 2.4 Efecto de un campo magnético y eléctrico en una partícula con carga.</i>	24
Capítulo 3 Montaje y experimentación	28
<i>Figura 3.1 Diseño del Reactor.</i>	30
<i>Figura 3.2 Montaje experimental del reformado de los GEI, por centrifuga con sincronía de fuentes.</i>	32
<i>Figura 3.3 Montaje experimental del reformado de los GEI, por centrifuga con la fuente de alta potencia.</i>	35
<i>Figura 3.4. Simulación de velocidad del gas en el interior del reactor de plasma tibio sin efecto de campo magnético.</i>	38
Capítulo 4 Análisis de Resultados	44
<i>Figura 4.1. Formas de onda de una descarga de plasma tibio a 100 kHz y efecto de modulación por el deslizamiento de la descarga dentro del reactor.</i>	45
<i>Figura 4.2. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor con carbono sólido.</i>	46
<i>Figura 4.3. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor limpio.</i>	47
<i>Fig. 4.4. Efecto del campo magnético en el tiempo de desplazamiento de las descargas de plasmas.</i>	48
<i>Fig. 4.5. Efecto del campo magnético en la velocidad de las descargas de plasmas</i>	49
<i>Figura 4.6.- Reformado de GEI, utilizando ambas fuentes en sincronía.</i>	51
<i>Figura 4.7.- Porcentaje de los productos del reformado a 400W.</i>	53
<i>Figura 4.8.- Porcentaje de los productos del reformado a 430W.</i>	55
<i>Figura 4.9.- Porcentaje de los productos del reformado a 650W, medición tangente.</i>	56



<i>Figura 4.10.- Porcentaje de los productos del reformado a 700W, medición Centro.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 4.11. Relación del campo magnético con la fuerza de Lorentz generada del caso 1.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 4.12. Relación del campo magnético con la aceleración de las especies del caso 1.</i>	<i>62</i>
<i>Figura 4.13. Relación del campo magnético con la fuerza de Lorentz generada del caso. 2.</i>	<i>63</i>
<i>Figura 4.14. Relación del campo magnético con la aceleración de las especies del caso 2.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 4.15. Comparación de flujo, potencia, SE y ECE del caso 1 con otros autores.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 4.16. Comparación de porcentaje de conversión de los GEI (CO₂ y CH₄) y del rendimiento del syngas (CO y H₂) del caso 1 con otros autores</i>	<i>69</i>
<i>Figura 4.17. Comparación de flujo, potencia, SE y ECE del caso 2 con otros autores.....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.18. Comparación de porcentaje de conversión de los GEI (CO₂ y CH₄) y del rendimiento del syngas (CO y H₂) del caso 2 con otros autores</i>	<i>72</i>
<i>Figura 4.19. Flujos molares de cada especie con respecto al campo magnético del caso1</i>	<i>74</i>
<i>Figura 4.20. Poder Calorífico kJ/s de las especies del caso 1.....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 4.21. Aporte del poder calorífico en kJ/s de cada una de las especies después del reformado por plasma tibio, caso 1.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 4.22. Flujos molares de cada especie con respecto al campo magnético del caso 2, punto de muestreo tangencial.</i>	<i>77</i>
<i>Figura 4.23. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 2.</i>	<i>78</i>
<i>Figura 4.24. Aporte del poder calorífico en kJ/s de cada una de las especies después del reformado por plasma tibio caso 2, muestreo tangencial.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 4.25. Flujos molares de cada especie con respecto al campo magnético del caso 2, punto de muestreo centro.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 4.26. Poder Calorífico kJ/s de las especies del caso 2, punto de muestreo centro.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 4.27. Aporte del poder calorífico en kJ/s de cada una de las especies después del reformado por plasma tibio caso 2, muestreo Centro.</i>	<i>82</i>



ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 4 Análisis de Resultados.....	40
<i>Tabla 4.1. Velocidad del plasma para los resultados de los caso 1 y 2 (Tablas B.9 y B.10). ...</i>	<i>48</i>
<i>Tabla 4.2.- Relación de la Intensidad de Corriente con el Campo Magnético generado por la bobina.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 4.3.- Porcentaje de los productos del reformado por plasma tibio en las salidas centro y tangente del caso 1 y 2.</i>	<i>59</i>
<i>Tabla 4.4. Porcentajes de los gases de salida después del reformado, caso 1.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.5. Comparación energética de diferentes autores con este trabajo</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 4.6. Porcentajes del syngas y de los gases de efecto invernadero en el reformado de plasma tibio caso 2</i>	<i>70</i>
<i>Tabla 4.7. Comparación energética de diferentes autores con este trabajo para el caso 2</i>	<i>71</i>



Capítulo 1

Fundamentos



1.1 Introducción.

Debido a la problemática ambiental, mucha de la investigación que se realiza a nivel mundial gira en torno a la aplicación de descargas de plasma para la reconversión de gases de efecto invernadero, tales como dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4) para su posible reutilización como gas sintético (syngas). Dicho lo anterior, se les considera energéticos debido a la alta concentración de hidrógeno (H_2) y monóxido de carbono (CO) en dicho subproducto, como se observa en la reacción química (1.1) [1].



Para entender la aplicación del reformado por plasma tibio de los gases de efecto invernadero, se hablara del plasma, los tipos que existen y su aplicación para descomponer los gases de efecto invernadero (GEI) para la generación de un nuevo gas energético llamado syngas.

Por lo tanto al realizar el reformado de GEI se implementara una separación de los productos por diferencia de masa, a través de la centrifugación por un campo magnético generado por una bobina donde se explicara más adelante el proceso y la física aplicada en ello.

1.2 Antecedentes.

Bajo este esquema, se han realizado estudios sobre el reformado de gases de efecto invernadero en el Laboratorio de Aplicaciones de Plasma (LAP) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ) por plasma tibio variando la proporción de entrada de N_2 , CO_2 y CH_4 con el 6%, 44% y 50%, respectivamente y con un valor de potencia aplicada de 175 W.

Al realizar el análisis por espectrometría de masas se encontró un reformado de las especies de entrada obteniéndose un 24% de CO, 20% de CO_2 , 26% de CH_4 , 24% de H_2 y 6% de N_2 [2]. Demostrando que en la reacción de CH_4 y CO_2 con plasma tibio se



obtienen como producto gas de síntesis, lo cual se corrobora con la estequiometría de la reacción (1.1). De acuerdo a lo anterior, se muestra que al introducir CH_4 y CO_2 en el reactor y generar plasma tibio es posible reformar combustibles de hidrocarburos pesados con un alto rendimiento de conversión, además de que una de las ventajas que se tienen, es la no generación de moléculas de NO_x .

Otra de las alternativas que se tienen en el procesamiento eficaz de sustancias gaseosas altamente estables son los sistemas híbridos, que consisten en la activación del plasma con los reactivos y la acción de catalizadores sólidos. Sin embargo, una de las condiciones que se deben establecer, es el sitio del catalizador dentro o cerca del volumen de plasma para alcanzar una alta eficiencia de la reacción catalítica sin embargo el inconveniente que se tiene es el incremento en el costo de la producción de syngas por el uso de catalizadores. Otra de las desventajas que se tienen son los depósitos de carbono en el catalizador que provocan una disminución de la eficiencia. Dicho lo anterior, existen algunas ventajas en el reformado de CO_2 y CH_4 por plasma tibio, ya que disminuye la demanda de energía y los costos [3-4]. En este sentido, se ha demostrado que con el uso de plasma tibio se mejora la eficiencia de conversión comparado con el plasma térmico que se llegan obtener productos no deseados [5].

Por otra parte en la década de los 60's, y 70's se demostró que con las fuerzas de Lorentz generadas por interacción del campo eléctrico (E) y un campo magnético (B) se podía hacer rotar las partículas elementales con carga de un plasma ionizado provocado por la interacción entre una corriente eléctrica que fluye a través del gas y el campo magnético transversal.

En este sentido, el mecanismo que ocurre en una centrífuga mecánica el contenedor se somete a esfuerzos centrífugos y, considerando la resistencia del material, la máxima velocidad periférica tiene que estar limitada a unos 400 m/s, es posible separar las especies (H_2 , CO , CO_2 , CH_4). Por otro lado, las centrifugas de plasma al no incorporar partes estructurales móviles pueden alcanzar aceleraciones altas de hasta $5 \times 10^{10} \text{ m/s}^2$



siendo posible una separación mayor de las especies, para el enriquecimiento del hidrógeno [6], lo cual favorece la separación de átomos e isótopos generando así una alternativa de mecanismos convencionales de centrífugas.

Siguiendo la misma línea de investigación, O. Okada y colaboradores [7] estudiaron la interacción entre un campo magnético y eléctrico para la aceleración de las partículas ionizadas a alta frecuencia, observaron que el gas parcialmente ionizado puede alcanzar velocidades de rotación de hasta 2,5 km/s. Mientras que con una corriente eléctrica de 1.5 kA y un campo magnético externo de 200 gauss, se obtiene un coeficiente de separación de equilibrio de 1.25, que es más alto que el realizable en la centrífuga mecánica.

A partir de ahí, mucha de la investigación que se realiza se enfoca al estudio de la separación de iones en plasmas centrífugos, demostrando la viabilidad de separar partículas ligeras de partículas pesadas aprovechando la aceleración centrífuga generada por las fuerzas de Lorentz obtenidas, donde la relación de concentración entre las especies involucradas respecto al radio de giro dependerá directamente de la diferencia entre sus masas y de la frecuencia de rotación del plasma [6-9].



1.3 Plasma

El plasma es un gas parcial o totalmente ionizado compuesto por moléculas, átomos, iones positivos y electrones donde la alta densidad de energía y la baja inercia del plasma son usadas para romper los enlaces moleculares de los gases en cuestión, obteniendo como producto final partículas constitutivas y gases energéticos con alto valor agregado, como el H_2 y CO (syngas).

1.3.1 Tipos de plasmas

De los diferentes tipos de plasmas, los térmicos proporcionan niveles de energía altos, pero carecen de selectividad química por lo que se tiene muy poco control sobre las reacciones en el plasma, por lo tanto su alta temperatura se ve reflejada en un alto consumo de potencia, en cambio los plasmas fríos ofrecen alta selectividad química y rendimiento energético, por lo tanto mantiene niveles de energía con problemas de uniformidad de la descarga a presiones atmosféricas [9].

Sin embargo, hay una tercera categoría de plasma que tiene características tanto del plasma frío como del plasma térmico, el plasma tibio que se localiza entre las descargas de plasma luminiscentes (plasma frío) y las de tipo arco eléctrico (plasma térmico) dentro de la gráfica universal de voltaje corriente. Éste tiene una temperatura promedio de 800 a 3000 K, como se observa en la Fig.1.1.

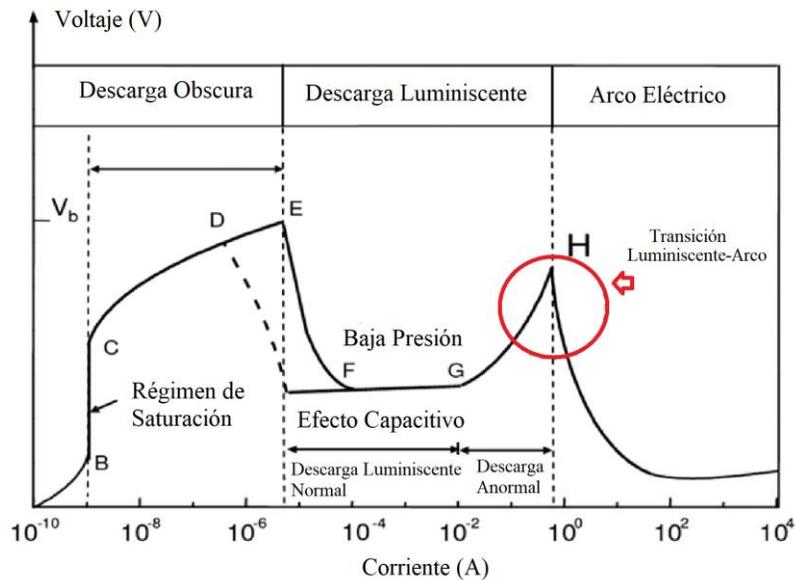


Figura 1.1 Característica de corriente de tensión de un tubo de descarga eléctrica en modo DC [10].

Como se puede observar en la figura 1.1, el plasma puede situarse en diferentes regiones de acuerdo a sus características de voltaje-corriente, siendo estas la Descarga Oscura, Luminiscente y Arco Eléctrico:

Descarga oscura:

En la zona de descarga oscura la excitación del gas es tan pequeña que no se percibe emisión de luz, la corriente de descarga crece con el voltaje hasta que la tensión adquiere un valor de saturación (Punto B-C), a partir del cual el gas comienza a conducir corriente en el rango de 10^{-10} Amperes debido a que el tiempo de tránsito de cargas es menor que el tiempo de creación de dichas carga. Para voltajes superiores a la de saturación, la descarga se desarrolla con emisión de electrones por parte del cátodo denominada “zona de descarga Townsend”, que es una región de descarga oscura, es decir no emite ninguna emisión de radiación lumínica y se da en corrientes débiles (Punto C-D).

Descarga Luminiscente:

En esta región de descarga se genera una emisión de luz como resultado de la excitación del gas y su posterior des-excitación, donde a partir del punto D y hasta al punto H, se



pueden establecer dos condiciones importantes: un régimen a bajas presiones y otro régimen a presión atmosférica. En el régimen a baja presión, en el punto D comienza una zona denominada descarga luminiscente, que opera a bajas corrientes (10^{-2} A). En esta zona las descargas luminiscentes están débilmente ionizadas y en un estado de no equilibrio, físicamente es visible como una columna brillante. En la transición D – F, se genera una distribución de campo eléctrico elevado en el cátodo, que origina la multiplicación electrónica necesaria para mantenerse, ya que el cátodo no es capaz de generar suficiente corriente eléctrica.

En esta zona se genera una columna positiva, que es un plasma en no equilibrio térmico, pero a su vez casi neutro eléctricamente. En la zona F – G, la tensión de la descarga es constante. La intensidad varía gracias a que el área transversal en la cual se manifiesta la descarga va creciendo. A la zona D – G, se le conoce como régimen de descarga luminiscente normal.

Sin embargo, en el punto G, comienza una zona denominada descarga luminiscente anormal (zona G – H), en el que la descarga luminiscente ha agotado su capacidad de crecer en intensidad aumentando el área y comienza a requerir más tensión para la multiplicación de electrones, invadiendo toda la zona del cátodo que le es accesible. En lo que concierne al régimen de presión atmosférica, comprendida desde el punto D hasta el punto H, se inicia una descarga denominada corona. La descarga corona es una descarga de baja corriente (10^{-6} A) a presión atmosférica que se desarrolla localmente en campos eléctricos no uniformes.

Descarga de arco:

En el punto H, se produce la descarga de chispa (spark discharge), que es un régimen transitorio, en el que se crea un canal ionizado que une ambos electrodos, cuya creación es resultado de varias fases, que incluye el mecanismo de canal débilmente ionizado, formado por una intensa avalancha primaria de electrones. Tanto en el régimen de baja presión como el régimen de presión atmosférica, en el punto común H, la corriente es tan



intensa que es capaz de calentar el cátodo hasta la incandescencia, produciendo intensa emisión termoiónica y dando lugar a un arco eléctrico, pasando por una transición inestable, denominada transición luminiscencia-arco.

El presente trabajo está enfocado a operar en una región específica, el umbral de transición entre la descarga luminiscente y la descarga arco (corriente entre 0.01 a 1 A), ya que en esta zona se lleva a cabo una descarga de plasma tibio que comparte características tanto del plasma frío como plasma térmico lo cual lo hace un fenómeno de estudio para esta aplicación.

El plasma tibio opera con una densidad de potencia moderada tan solo de algunas decenas de W/m^3 lo que hace a este tipo de plasma una herramienta que presenta las ventajas del plasma térmico con un consumo energético mucho menor [11]. Las descargas de plasma tibio tienen ventajas significativas por ejemplo: no requieren de grandes sistemas de enfriamiento ya que este plasma funciona con reducidos flujos de corriente y altos voltajes que a su vez permite diseños de reactores con materiales cerámicos que tengan electrodos metálicos sin sufrir severas erosiones [12-13].

En la figura 1.2 se muestra una relación entre fracción molar y temperatura donde se puede observar como en el rango de temperatura del plasma tibio (800-3000 K) se realiza la conversión de los gases de efecto invernadero en syngas, donde se observa la disminución del CO_2 y CH_4 y el aumento del CO y H_2 , donde la producción de dichos elementos comienza en los 500 K llegando a su punto máximo en los 1100 K.

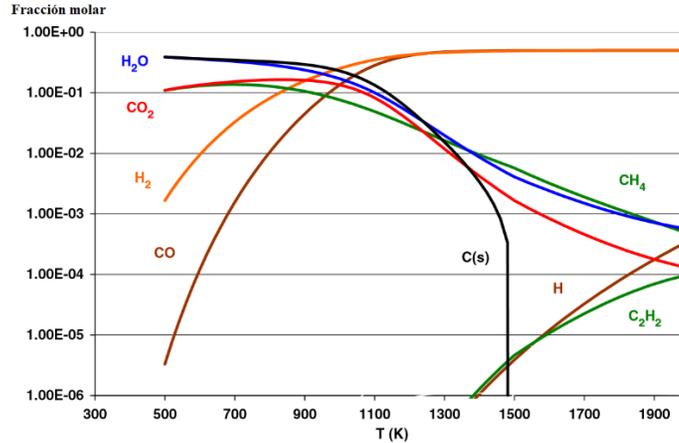


Figura 1.2. Comportamiento del reformado en temperaturas bajas [14].

Una de las desventajas que tiene el plasma tibio, es la inestabilidad de la descarga, es por ello que se requiere mantener los parámetros adecuados en un rango determinado que permita prevenir transiciones al régimen de arco, sin embargo con un sistema de alimentación activo para el control de la descarga se puede dar solución a este problema. En la Fig. 1.3 se muestra la fracción molar en función de la temperatura. Se observa que cuando se alcanzan temperaturas mayores a los 3000 K se genera el plasma térmico, lo que ocasiona una reconversión de los elementos formados en el régimen del plasma tibio y se recombinan o reaccionan nuevamente a temperaturas más altas para la generación de iones que provocan la formación de compuestos no tóxicos.

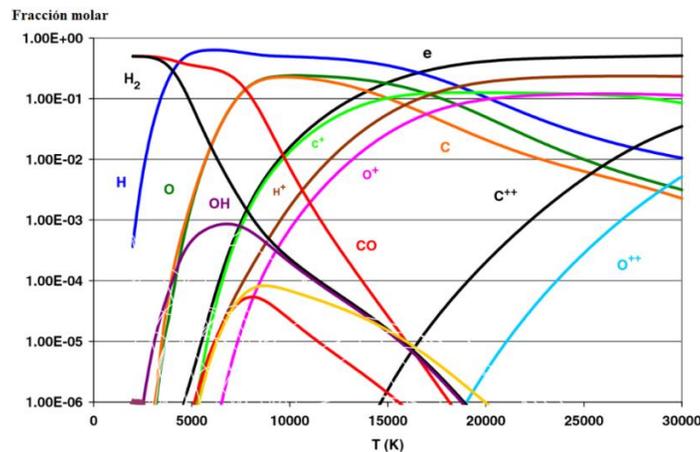


Figura 1.3 Comportamiento del reformado en temperaturas altas [14].



En particular, la región del plasma tibio es un punto de trabajo que proporciona niveles de potencia elevados y alta selectividad en la reacción y no es posible generar especies tóxicas como los NO_x , tal y como ocurre en el plasma térmico, al igual que se trabaja a presión atmosférica sin la necesidad de otros elementos como bombas para vacío, siendo posible el diseño del reactor de tal forma que se puede implementar una pos-cámara para la implementación de campos magnéticos que proporcionen un vector fuerza, generando así la centrifugación del plasma.

1.4 Ionización y conductividad eléctrica

La conducción eléctrica a través de este gas ionizado no sigue la ley de Ohm, sino que se rige por los procesos físicos elementales que se dan entre las partículas cargadas (electrones, iones, átomos y moléculas excitadas) transportadas en el gas ionizado producidas y absorbidas en los electrodos. Las descargas eléctricas en gases se clasifican genéricamente, atendiendo a dos criterios: la fuente de ionización y la ruptura del gas.

Una descarga, es un flujo de corriente eléctrica en un gas ionizado debido al campo eléctrico aplicado, así como el mantenimiento de la capacidad de conducir electricidad y absorber radiación electromagnética. El gas se ha clasificado eléctricamente como un dieléctrico, ya que normalmente no conduce la electricidad, pero lo es debido a la ionización de sus átomos, como consecuencia de la interacción de una diferencia de potencial (voltaje) entre los electrodos.

En una fuente de ionización, las descargas se clasifican en: auto y no sostenida. En la auto-sostenida, la conductividad eléctrica se mantiene por la propia descarga, y no participa una fuente exterior de calor o radiación. Por otro lado, en ambas descargas se presentan procesos de termo-ionización (calentamiento del gas produciendo moléculas ionizadas y con energía bastante elevada) y fotoionización (efecto de una radiación, de “arrancar” electrones de un átomo o de una molécula neutra). De acuerdo a lo anterior,



en este trabajo se usará o aplicará la descarga auto-sostenida para la ionización de los gases de efecto invernadero.

1.5 Separación de especies por centrifugación

Desde los años 60 las centrifugadoras de plasma se han investigado como un posible método para separar isótopos o elementos químicamente similares. En estos equipos, las velocidades de rotación son altas y se consiguen utilizando fuerzas electromagnéticas para acelerar el gas ionizado [15]. Dado que las paredes de confinamiento no giran, no existen limitaciones de resistencia de material asociadas tales como las existentes en una centrífuga mecánica convencional.

Estos dispositivos pueden agruparse en dos categorías generales: las centrífugas de arco de vacío completamente ionizadas y de plasma parcialmente ionizadas. Las centrífugas de arco de vacío, son dispositivos que funcionan con una presión de base de 10^{-5} Pa y en un modo pulsado durante varios kW de potencia y se disipan durante unos pocos milisegundos. Por el contrario, las centrífugas de plasma parcialmente ionizadas tienen un relleno de gas (10^2 Pa) y un rango de baja potencia (10^2 W). Éste tipo de equipos funcionan de manera continua durante períodos de tiempo de hasta 10 s [16-17].

1.6 Centrífugas de Plasma Parcialmente Ionizadas

Las centrífugas de plasma parcialmente ionizadas son para los isótopos de los gases con masa atómica baja. Sin embargo, una centrífuga de plasma con una columna de arco débilmente ionizado tiene una desventaja en la velocidad debido a la fricción que ocurre entre los gases ionizados influyendo diferentes variables como es la densidad y la geometría del reactor, sin embargo puede alcanzar una velocidad de rotación más rápida que una centrífuga mecánica convencional. Este tipo de centrífugas no requiere de dispositivos costosos, tales como láseres y sistemas de alto vacío y puede ser rentable en la separación de isótopos gaseosos [18]; por lo tanto, el rendimiento de una centrífuga



de plasma débilmente ionizada puede predecirse fácilmente para diversos tipos de estructuras de descarga o geometría de electrodos.

Por otra parte, las centrífugas de plasma en comparación con las mecánicas, no tienen partes móviles excepto la columna de arco, que gira por la fuerza de Lorentz en una cámara de descarga estacionaria. Ésta puede ser amplificada por el campo magnético aplicado sobre la corriente de arco, y es posible conseguir velocidades de rotación extremadamente altas que llegan hasta los 2.5 km/s sin involucrar partes móviles. En consecuencia, la separación en masa de mezclas gaseosas o isótopos de elementos químicos se puede llevar a cabo de manera eficiente en una columna de arco débilmente ionizado [18].

Por otro lado, mediante una descarga eléctrica a través del campo magnético en un plasma parcialmente ionizado, los iones y electrones ejercerán una fuerza de volumen sobre el gas neutro, poniéndolo en rotación de una manera más eficiente comparado con las fuerzas de cizallamiento viscoso de un rotor mecánico. De esta manera, es posible mantener la rotación a bajos grados de ionización y con una entrada de energía eléctrica limitada. Esto hace posible el manejo de la velocidad de rotación a través de la intensidad de corriente suministrada para generar el campo magnético, el cual puede controlarse mediante una fuente impulsora, logrando que la velocidad se mantenga estable en un mismo sentido, estando en sincronía con la fuente resonante de puente completo que genera la descarga.

De acuerdo a los antecedentes mencionados, a continuación se mencionan los objetivos que se plantearon para realizar el siguiente trabajo:



1.7 **O**bjetivo General:

Aplicar el efecto de centrifugación por campos electromagnéticos para optimizar el rendimiento energético del syngas.

1.7.1 **O**bjetivos Particulares:

- 1.7.1.1 Desarrollar y diagnosticar una fuente de poder con dispositivos semiconductores de alta potencia que fungirá como fuente de alimentación de campos magnéticos. Dicha fuente deberá estar en sincronía con la fuente de alimentación de plasma tibio actualmente en funcionamiento.
- 1.7.1.2 Evaluar el campo magnético obtenido y su relación con el campo eléctrico de la fuente de plasma.
- 1.7.1.3 Realizar descargas de plasma con la interacción de campos magnéticos para comprobar la rotación del plasma durante tratamiento de gases de efecto invernadero.
- 1.7.1.4 Determinar los niveles de concentración de gases a la salida del sistema de reformado de gases de efecto invernadero por descargas de plasma para evaluar el grado de separación de gases por medio de fuerzas centrífugas.
- 1.7.1.5 Realizar el análisis de los datos y emitir valores de concentración del gas sintético de salida y con ello determinar su poder energético.



Hipótesis

Con la implementación de campos electromagnéticos transversos a una descarga de plasma es posible optimizar el rendimiento energético del syngas al centrifugar las especies por medio de la fuerza de Lorentz aumentando la proporción de hidrógeno respecto a la de monóxido de carbono mediante la aceleración centrífuga de dichos gases que se obtienen a la salida del reactor de plasma.



1.8 Referencias

- [1] X. Xumei, F. Qi, Y. Yin, X. Dai, “*CO₂ reforming of CH₄ by combination of thermal plasma and catalyst*”, International Journal of Hydrogen Energy, 33, (2008), 1262-1265.
- [2] J. Pacheco, G. Soria, M. Pacheco, R. Valdivia, F. Ramos, H. Frías, M. Duran, M. Hidalgo, “*Greenhouse gas treatment and H₂ production, by warm plasma reforming*”, International journal of hydrogen energy, 40, (2015), 17165-17171.
- [3] A. J. Zhang, A. M. Zhu, J. Guo, Y. Xu, C. Shi, “*Conversion of greenhouse gases into syngas via combined effects of discharge activation and catalysis*”, Chemical Engineering Journal, 156, (2010), 601-606.
- [4] K. S. Szałowski, K. Krawczyk, J. Sentek, B. Ulejczyk, A. Gorska, M. Młotek, “*Hybrid plasma-catalytic systems for converting substances of high stability, greenhouse gases and VOC*”, Chemical Engineering Research and Design, 89, (2011), 2643–2651.
- [5] J Aubreton¹, M-F Elchinger¹, A Hacala² and U Michon², “*Transport coefficients of typical biomass equimolar CO–H₂ plasma*”, Journal of Physics D: Applied Physics, 42 (2009), 095206 (13pp)
- [6] B. Bonnevier, B. Lehnert, “*Experimental evidence of element and isotope separation in a rotating plasma*”, Arkiv för Fysik, 16, (1959), 231.
- [7] O. Okada, T. Dodo, “*Separation of uranium isotope by plasma centrifuge*”, Journal of Nuclear Science and Technology, 10, (1973), 626-631.
- [8] W. James, S.W. Simpson, “*Isotope separation in the plasma centrifuge*”, Plasma Physics, 18, (1976) 289-300.
- [9] J. V. Whichello, P. J. Evans and S. W. Simpson, “*A review of recent plasma centrifuge and vacuum arc centrifuge development*” Proc. Of the 4th Workshop on Separation Phenomena in Liquids and Gases (Beijing), Ed. By C. Ying, Tsinghua University, Beijing (1994).



- [10] A Risacher, S Larigaldie “*Active stabilization of low-current arc discharges in atmospheric-pressure air*”, plasma source Sci Technol. 16, Institute of physics publishing, (2007), pp. 200-209.
- [11] R Xiang Li, Xu Liao, Xuzao Ren “*Carbon Dioxide Reforming of Methane to Syngas by Warm Plasma: Low Energy Consumption*”, College of Science Southwest University of Science and Technology, (2010).
- [12] Andreas Schutze, James Y. Jeong, “*The Atmospheric-Pressure Plasma Jet: A Review and Comparison to other Plasma Sources*”, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 26, No. 6, December (1998).
- [13] M hur, K T Kim and Y H Song, “*Ac-driven plasma torch with a well-type cathode working in air and CO₂*”, Journal of Physics D: Applied Physics, 43, IOP Publishing, (2010), pp. 8.
- [14] M. Krishnan, M. Geva, and J. L. Hirshfield, “*Plasma centrifuge*”, Physical Review Letters, vol. 46, (1981), pp. 36-38.
- [15] P. J. Evans, F. J. Paoloni, J. T. Noorman, and J. V. Whichello, “*Measurements of mass separation in a vacuum arc centrifuge*”, Journal of Applied Physics, vol. 66, (1989), pp. 115-118.
- [16] E. D. Bosco, S. W. Simpson, R. S. Dallaqua, and A. Montes, “*Speed of rotation in a vacuum arc centrifuge*”, Journal of Physics D: Applied Physics, vol. 24, (1991), pp. 2008-2013.
- [17] B. Lehnert, “*The Partially Ionized Plasma Centrifuge*”, Physica Scripta 7 (1973), 102.
- [18] J. Slepian, “*Hydromagnetic Equations for Two Isotopes in a Completely Ionized Gas*”, Physical Review, 112 (1958), 1441.



Capítulo 2

Fuente de alimentación



2.1 Introducción.

Uno de los elementos importantes para generar una descarga de plasma es la fuente de alimentación eléctrica, que se basa principalmente en circuitos inversores [1], resonantes [2] y de estado sólido [3], por otra parte también se usan fuentes de alimentación electrónicas [4] que se han desarrollado para generar descargas luminiscentes en corriente directa (CD), radiofrecuencia (RF) y microondas, sin embargo la desventaja que presentan es que requieren sistemas de control complejos, además de funcionar a elevadas potencias provocando que aumente su costo energético.

Considerando lo anterior en este trabajo se propone el uso de fuentes resonantes de puente completo e impulsionales, ya que la ventaja que presentan es que se pueden contrarrestar los esfuerzos debido al alto voltaje y pérdidas de potencia que presentan las fuentes antes mencionadas. Por lo que se describe a continuación el diseño de los inversores y fuentes de alimentación que se utilizaron, comenzando por la descripción de los componentes, desempeño en cada función tanto en la descarga de plasma tibio como la generación del campo magnético para la centrifugación.

2.2 Inversor de descarga

A los convertidores de corriente directa (CD) a corriente alterna (CA) se les conoce como inversores. La función de un inversor consiste en cambiar el voltaje de entrada en CD a un voltaje simétrico de salida en CA, con la magnitud y frecuencia establecida, tanto el voltaje de salida como la frecuencia pueden ser fijos o variables. Esto por lo general, se hace controlando la modulación del ancho de pulso (PWM) dentro del inversor, por lo que la ganancia se puede definir como la relación entre el voltaje de salida en CA y el voltaje de entrada en CD.

2.2.1 Inversor resonante serie de puente completo

Los convertidores resonantes pueden clasificarse en diferentes tipos como puede ser resonante paralelo, serie-paralelo, con alimentación por corriente, clase E, siendo de



importancia para este trabajo el inversor resonante en serie adecuado para aplicaciones de alto voltaje y baja corriente, donde la salida máxima se presenta a la frecuencia de resonancia [5].

Los inversores resonantes en serie se basan en la oscilación resonante de la corriente para una frecuencia de salida en el rango de 200 Hz hasta 100 kHz. Su operación consiste en que los componentes y dispositivo de conmutación se colocan en serie con la carga, a fin de formar un circuito sub-amortiguado.

La corriente a través de los dispositivos de conmutación se abate hasta cero, debido a las características naturales del circuito. Existen dos topologías de inversores resonantes en serie: la de medio y puente completo. El primero, se encuentra limitado por el voltaje de salida, mientras que el de puente completo puede operar a frecuencias que llegan hasta los 100 kHz presentando mayor eficiencia [6]. De acuerdo a lo anterior, el de puente completo es el que se usa en este trabajo.

En la Fig. 2.1 se presenta el diagrama de un inversor resonante en serie de puente completo de 4 interruptores (M_1 , M_2 , M_3 y M_4). En la figura se observa el inductor del circuito resonante conocido como devanado primario (L_p) de un transformador elevador con una relación 1:100. Posteriormente, el transformador de acoplamiento (T_x) se usa para generar un voltaje elevado en el devanado secundario (L_s), lo que servirá para generar la ignición y sostenimiento de la descarga de plasma.

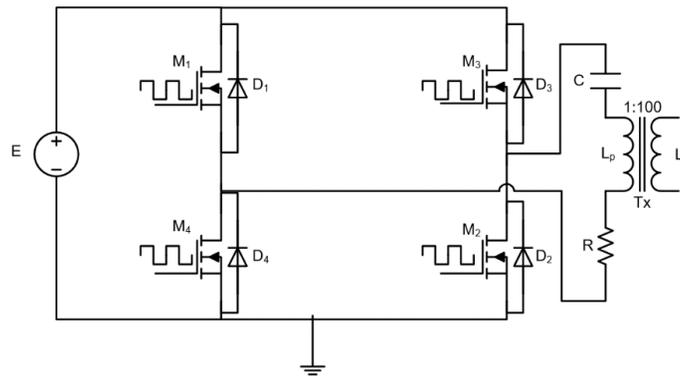


Figura 2.1 Diagrama del inversor resonante serie con transformador de alto voltaje [7].

Finalmente, el capacitor (C) se conecta en serie con el devanado primario del transformador para filtrar la componente de corriente directa protegiendo los interruptores y la fuente de alimentación del inversor, ya que en el caso de existir un corto circuito el capacitor impide el flujo de una corriente excesiva en los elementos de conmutación y en su defecto evita que la fuente tenga una mayor exigencia de corriente de la que puede proporcionar. Además, la conjugación del valor de C y L_p determina la frecuencia de resonancia f_r del convertidor mediante la relación de la ecuación 2.1.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_p C}} \quad (2.1)$$

2.3 Fuente de alimentación impulsional

El principio de funcionamiento, se basa en suministrar impulsiones de alta corriente hacia una bobina mediante transistores bipolares de compuerta aislada (IGBTs). Esta puede trabajar a frecuencias de operación de entre 5 a 150 kHz, ya que libera rápido la energía almacenada en forma de impulsos eléctricos. A esta estrategia se le denomina potencia pulsada ya que entrega grandes cantidades de potencia en un periodo de tiempo corto [8]. Este efecto ayuda a minimizar las pérdidas de potencia que se presentan por conducción y conmutación en los transistores y así obtener la máxima transferencia de energía [5].



Dicha fuente impulsional para alimentación del campo magnético debe tener sincronización con la fuente resonante serie de puente completo que se encarga de proveer el campo eléctrico para generar la descarga de plasma tibio, ya que al tener una sincronización los vectores del campo eléctrico y campo magnético provocan que los productos del reformado del plasma que tienen una carga eléctrica (q), tiendan a centrifugar en un solo sentido, lo que proporciona una mayor eficiencia en la separación por diferencia de masa.

2.4 Diseño de una fuente de alimentación impulsional

El diseño de una fuente impulsional consta de varias partes fundamentales donde se tiene una etapa de *aislamiento* que está constituida por un optoacoplador (CI TLP250) y un *controlador de compuerta o Drivers* (CI TC4422A).

Para la etapa de aislamiento, el optoacoplador cumple la función de separar la tierra digital de la etapa de potencia para eliminar el ruido electrónico, mientras que los drivers aseguran y refuerzan la corriente requerida para los pulsos de compuerta, además de forzar su aterrizamiento para que no exista un flujo de corriente, ver Fig. 2.2.

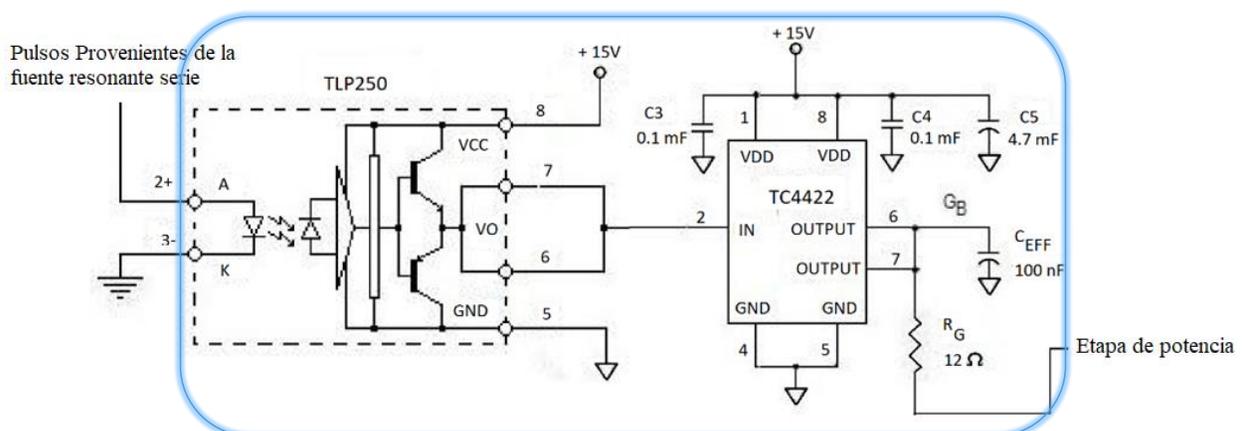


Figura 2.2. Etapa de aislamiento de la fuente pulsante

Por otro lado, la etapa de potencia se conforma de un transistor bipolar de puerta aislada (IGBT) y un una bobina que se conecta en configuración de emisor común donde está constituida por las partes de aislamiento y de potencia, para que de manera efectiva se pueda disminuir el $\frac{dV}{dt}$ mediante un arreglo de elementos pasivos o circuitos utilizados específicamente para proteger a los dispositivos de los esfuerzos eléctricos transitorios y repetitivos que comúnmente se les conoce como: arreglos Snubber. El objetivo de estos es hacer que la trayectoria de conmutación sea cerrada y de esa forma evitar los picos de tensión, además de disminuir la potencia disipada, absorbiendo la energía atrapada en el lazo o bucle, como se muestra en la Fig. 2.3.

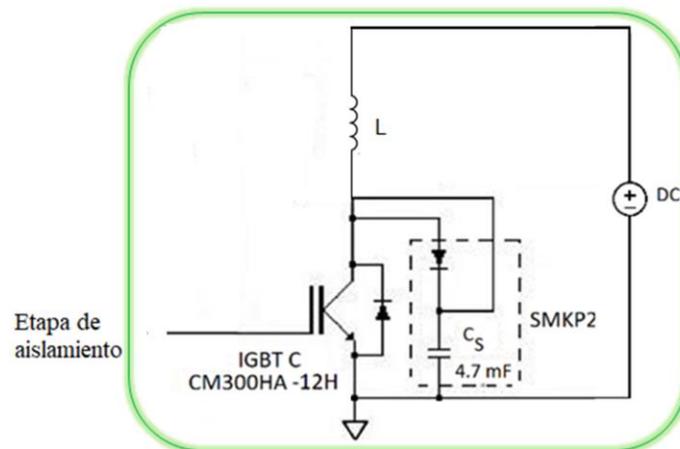


Figura 2.3. Etapa de potencia

2.5 Implementación del efecto de centrifugación

2.5.1 Efecto Electromagnético

El efecto electromagnético consiste en la conjugación de un campo magnético (\vec{B}) y uno eléctrico (\vec{E}) que interactúan con una partícula en movimiento con una carga, provocando la formación de un vector fuerza, conocida como fuerza de Lorentz, ver ecuación 2.2, como se muestra Fig. 2.4.

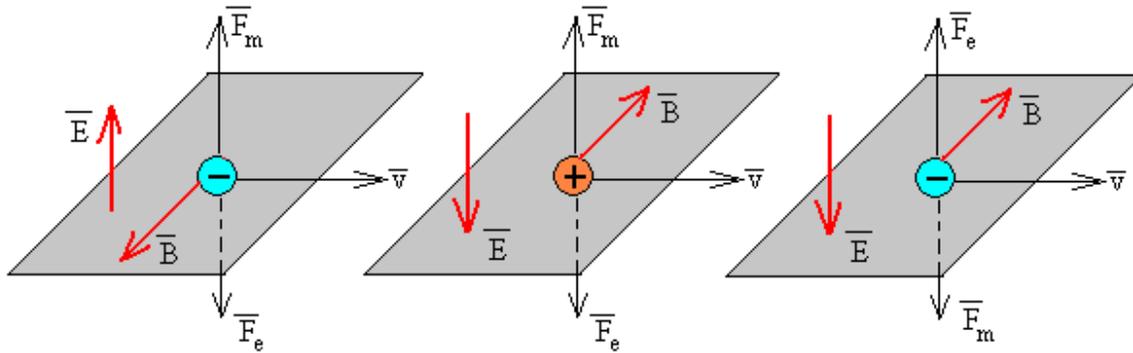


Figura 2.4 Efecto de un campo magnético y eléctrico en una partícula con carga.

$$m \frac{d^2r}{dt^2} = qE + qv \times B \quad (2.2)$$

Donde E es el campo eléctrico el cual se define como la fuerza eléctrica por unidad de carga. Lo que indica que el campo eléctrico está dirigido radialmente hacia fuera de una carga positiva y radialmente hacia dentro de una carga puntual negativa, la fuerza F_e que ejerce el campo eléctrico E sobre una carga q es descrita en la ecuación (2.3):

$$F_e = q \cdot E \quad (2.3)$$

Por otro lado, la fuerza F_m que ejerce el campo magnético se describe en la ecuación (2.4) donde B es el campo magnético que genera la fuerza sobre una partícula de carga q cuya velocidad es v :

$$F_m = q \cdot v \times B \quad (2.4)$$

2.5.2 Centrífuga de plasma

En la década de los 60's, y 70's se demostró que las fuerzas de Lorentz podían hacer rotar las partículas individuales con carga de un plasma totalmente ionizado. Sin embargo, años después se reportó que no sólo se podían hacer girar, sino que también se alcanzaban velocidades altas (aproximadamente alrededor de km/s), ya que el plasma



ionizado se vuelve conductor e interacciona con el campo magnético. Posterior a esto, una parte de las sustancias ionizadas se separan por la fuerza centrífuga resultante debido a la rotación del plasma. De acuerdo a lo anterior, la separación por diferentes pesos atómicos se vuelve un tema de investigación de gran interés.

Por otro lado, en un plasma centrífugo, las especies de mayor peso atómico son empujadas a radios externos, produciendo separación por diferencia de masa, las velocidades de rotación alcanzables en las centrífugas electromagnéticas son 10^4 m/s, mientras que las velocidades en las centrífugas mecánicas son de 300 m/s [9].

Por lo tanto, las centrifugadoras de plasma se clasifican en baja y alta potencia. La primera, se usa en experimentos con un plasma parcialmente ionizados con densidades relativamente altas. La segunda, se usa en experimentos con un plasma de baja densidad y completamente ionizados. En particular, en este trabajo se usarán potencias bajas donde se obtiene un gas parcialmente ionizado a presión atmosférica para generar un plasma tibio.

De acuerdo a lo anterior, a través de un proceso de disociación debido al impacto de electrones se transfiere su energía a las moléculas de gas tras una colisión inelástica, produciendo radicales libres, iones y especies excitadas que provocan que los átomos que conforman el gas presente carga y que a una determinada velocidad hace que interaccionan con los campos generados por la bobina electrificada, ocasionando que por el efecto magnético el plasma comience a girar [10].

Una vez que se obtiene el plasma girando, el proceso de centrifugación ocurre en un solo sentido teniendo sincronía con los pulsos, así como la frecuencia de la fuente resonante en serie con la fuente impulsional, que se encuentran conectadas entre sí. De acuerdo a lo anterior, al encontrar sincronía entre la fuente resonante en serie de puente completo y la fuente impulsional, el plasma tiende a girar hacia un solo sentido alcanzando velocidades relativamente altas, en la que posiblemente se puede lograr la separación de los elementos por diferencia de masa.



Dicho lo anterior, al alcanzar velocidades relativamente altas ocurre el enriquecimiento del syngas, es decir cuando el gas y la descarga se encuentran en contacto al incrementar el tiempo tiene mayor área de contacto, lo que favorece la separación de los elementos por diferencia de masa. Por ejemplo, el hidrógeno que presenta una masa menor tiende a salir por la cavidad central del reactor, mientras que las demás especies que se forman después del reformado como el CO, tienden a salir por la cavidad tangente del reactor al tener una masa mayor a la del hidrógeno.

Es por ello, que en este trabajo se implementan los campos magnéticos como método de enriquecimiento del syngas, a través de una bobina en la pos-cámara del reactor donde se induce una intensidad de corriente para generar así los campos. Para ello es necesaria la sincronización de ambas fuentes tanto de la descarga de plasma como del campo magnético para lograr el giro en un solo sentido y favorecer el enriquecimiento del syngas.



2.6 Referencias.

- [1] Pérez M.J.A., Peña E. R, López C. R, Mercado C. A., Valencia A. R., Barocio R. S., De la Piedad B. A., “*Power Supply for Plasma Torches Based on a Class-E Amplifier Configuration*”, Plasma Processes and Polymers, Vol. 5, (2008), 593-598.
- [2] Ru Y. Y., Yao L. W. “*A DC-Pulse Power Supply Designed for Plasma Applications*”, International Conference on Power Electronics and Drive Systems, (2009), 1086-1090.
- [3] Davari P., Zare F., Ghosh A., “*A Flexible Solid-State Pulsed Power Topology*”, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, (2012).
- [4] Valdivia Barrientos R., “*Efecto de la frecuencia de excitación en la conductividad eléctrica de gases ionizados, estudio y desarrollo electrotécnico*”, Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Toluca, Estado de México, (2008).
- [5] Hansjoachim Bluhm, “*Pulsed Power System: Principle and Applications*”, Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, (2006).
- [6] Salazar Torres Juan A., “*Recuperación Energética de la eliminación de H_2S y CO_2 con la tecnología por plasma Híbrido*”, Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Toluca, Estado de México, (2014).
- [7] Soria Arguello Gustavo, “*Desarrollo de una descarga de plasma tipo cortina a tres electrodos excitada por un TEG*”, Tesis de Doctorado, Instituto Tecnológico de Toluca, Estado de México, (2015).
- [8] Muhammad H. Rashid “*Electrónica de Potencia, Circuitos, Dispositivos y Aplicaciones*”, Pearson, México, (2004), tercera edición pp. 352-373.
- [9] B. Bonnevier, “*Experimental evidence of element and isotope separation in a rotating plasma*”, Plasma Physical, (1971), vol. 13, pp. 763–774.
- [10] T. Paulmier, L. Fulcheri, “*Use of non-thermal plasma for hydrocarbon reforming*”, Chemical Engineering Journal, 106 (2005): 59–71.



Capítulo 3

Montaje y Experimentación



3.1 Introducción.

Con la implementación de campos electromagnéticos transversos a una descarga de plasma es posible optimizar el rendimiento energético del syngas al aumentar la proporción de hidrógeno respecto a la de monóxido de carbono mediante la aceleración centrífuga, para lograrlo se diseñó un reactor, que nos permite la implementación de las dos fuentes tanto de la descarga de plasma tibio como la que origina el campo magnético como se describen en este capítulo.

Prosiguiendo con la metodología experimental se realizaron estudios con las diferentes fuentes utilizadas tanto la fuente resonante de puente completo, como la fuente impulsional y la de alta potencia de CD. Con ello se realizó el estudio de dos casos de interés cuando se tenía una gran cantidad de partículas de hollín y una mínima cantidad, realizando un estudio del diagnóstico eléctrico, velocidad de centrifugación alcanzada y balance energético.

3.2 Instrumentación

Para realizar la metodología experimental se usó el siguiente equipo:

- a) Electroválvulas marca Omega, modelo FMA5526A-ST
- b) Fuente de poder “BK Precision” de C.D. (80V/ 60A / 1200W)
- c) Espectrómetro de masas “Cirrus MKS spectra products”.
- d) Osciloscopio Marca Tektroniks modelo MSO2024.
- e) Sensor de campo magnético “Hall Effect/Tesla Meters 5100 Series”.

3.3 Diseño del Reactor

Para aplicar el efecto de centrifugación por campos magnéticos para optimizar el rendimiento energético del syngas, se diseñó un reactor para dicha aplicación. En el siguiente párrafo se describen sus componentes.

El reactor cuenta con una doble pared que se extiende por la cámara principal y la cámara secundaria permitiendo la introducción de los gases de efecto invernadero (GEI). La cual cumplen con la función de enfriamiento del reactor y de pre-calentamiento de los gases. Primero, el gas se introduce en la cámara principal del reactor, cuyo diseño hace que entre por efecto vórtice, como se observa en la Fig. 3.1.

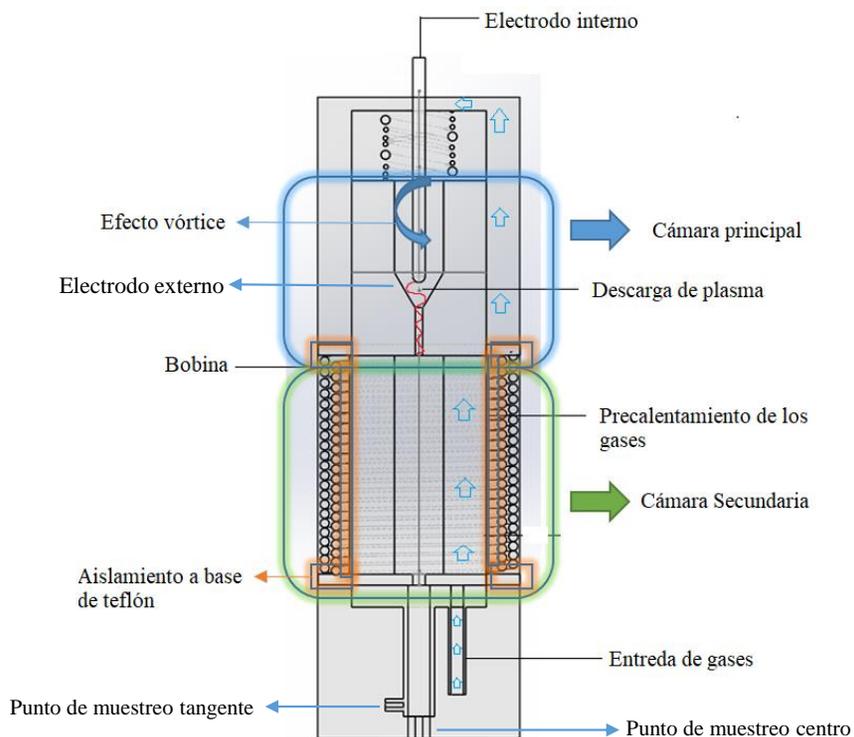


Figura 3.1 Diseño del Reactor

Por otro lado, las paredes de la cámara principal del reactor se llegan a calentar por la descarga de plasma generada por la diferencia de potencial (voltaje), siendo importante el sistema de refrigeración. Por otro lado, en la cámara secundaria se encuentra la



bobina, donde se implementó un aislamiento eléctrico a base de teflón para evitar que el flujo de energía que entre a las fuentes que ocasione daños entre las mismas.

De acuerdo a lo anterior, la cámara secundaria tiene dos salidas implementadas: una tangencialmente y otra en el centro, cuyo objetivo es el de separar por diferencia de masa, las especies que interactúan con el campo magnético que se genera en el proceso de centrifugación del reformado de plasma tibio, siendo las especies con menor masa atómica las que se estima saldrán por la parte central, y las de mayor masa atómica por la salida tangente, de esta manera puede ser posible separar hidrógeno para celdas de combustible.

Para cumplir con el objetivo del trabajo, la metodología experimental se desarrolló en dos etapas que a continuación se mencionan:

a) *primera*, consistió en el montaje experimental para el reformado de GEI. Para ello, se implementaron dos fuentes: la fuente resonante de puente completo para generar plasma y la fuente impulsional para alimentar el campo magnético, posteriormente se busca sincronización entre ellas respecto a la frecuencia de operación.

b) *segunda*, no se hace uso de la fuente impulsional implementada en la bobina y, se reemplaza por una fuente de alta potencia de C.D. que permite incrementar el amperaje en la bobina. A continuación se menciona en que consistió cada una de las etapas.

3.4 Reformado por sincronización de fuentes

Se implementó la sincronización de la fuente resonante de puente completo para generar plasma y la fuente impulsional que se conecta a la bobina para generar el campo magnético, una vez que se encuentran en sincronía, el centrifugado se genera en un solo sentido. Posteriormente, en la parte inferior de la cámara secundaria del reactor se

introducen los gases de efecto invernadero a flujo controlado de cada uno, como se observa en la Fig. 3.2.

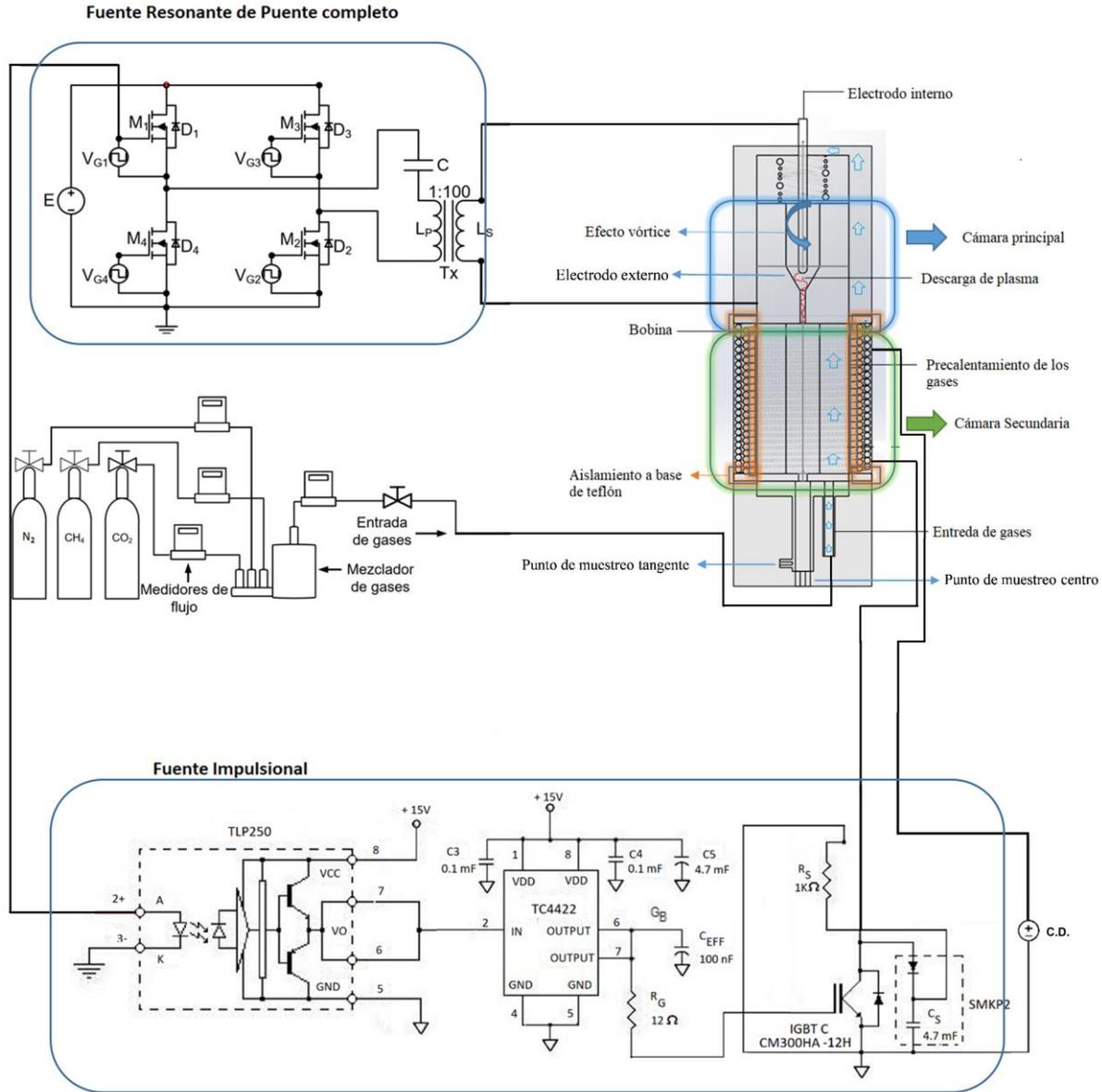


Figura 3.2 Montaje experimental del reformado de los GEI, por centrifuga con sincronía de fuentes.

Es importante mencionar que se tiene un sistema para controlar los flujos de gases que participan directamente en el proceso, ajustando un valor de 5 l/min de CH₄, CO₂ y N₂, respectivamente, para ello se emplearon electroválvulas, que permiten controlar y



cuantificar el flujo de cada gas desde 0 hasta 20 l/min. Una vez que fluyen los gases, se utiliza un mezclador cuya finalidad consiste en homogenizar la mezcla y evitar un embotellamiento.

Posteriormente, una fuente de poder de C.D., alimenta la fuente resonante de puente completo que entrega el voltaje necesario para la descarga que se genera en el electrodo de Tungsteno donde se lleva a cabo la degradación de los GEI, a una frecuencia de 100 kHz ya que a alta frecuencia se disminuye las pérdidas de potencia por disipación desplazando los armónicos de la onda cuadrada.

Una vez realizada la descarga de plasma, se ajusta la fuente resonante de puente completo a una potencia de 400 W, después se prende la fuente pulsante que se encuentra conectada a la bobina para generar el campo magnético. Posteriormente, se verifica que se encuentren en sincronía con la ayuda del osciloscopio. Con este se miden las ondas de voltaje del plasma y de corriente en la bobina. Una vez realizado todo este proceso, se utiliza el equipo de espectrometría de masas para determinar cuantitativamente las especies que se formaron después del reformado.

a) Evaluación de concentración de gases por espectrometría de masas:

El Laboratorio de Aplicaciones de Plasma (LAP) del ININ cuenta con espectrómetro de masas con el cual se llevó la evaluación de concentración de gases en la salida tangencial y centro del reactor después de la interacción de los productos del reformado por plasma tibio con el campo magnético.

La técnica de espectrometría de masas es una técnica analítica que permite estudiar compuestos de naturaleza diversa: orgánica, inorgánica o biológica y obtener información cualitativa o cuantitativa. Mediante el análisis por espectrometría de masas es posible obtener información de la masa molecular del compuesto analizado así como obtener información estructural del mismo, o simplemente detectar su presencia o cuantificar su



concentración. Para ello es necesario ionizar las moléculas y obtener los iones formados en fase gaseosa, este proceso tiene lugar en la fuente de ionización.

Los iones generados son acelerados hacia un analizador y separados en función de su relación masa/carga (m/z) mediante la aplicación de campos eléctricos, magnéticos ó simplemente determinando el tiempo de llegada a un detector. Los iones que llegan al detector producen una señal eléctrica que es procesada, ampliada y enviada a un ordenador. El registro obtenido se denomina espectro de masas y representa las abundancias iónicas obtenidas en función de la relación masa/carga de los iones detectados. Posteriormente, con los datos obtenidos en el espectrómetro de masas se introducen al Software Matlab ®, donde se grafican para su respectivo análisis.

3.5 Reformado por implementación de fuente de alta potencia

En esta etapa experimental, se implementó la fuente de alta potencia conectada a la bobina para incrementar la intensidad de corriente suministrada y así incrementar el campo magnético, como se muestra en la Figura 3.3, donde se elimina la fuente impulsional, permitiendo la conexión de la fuente de alta potencia directamente en la bobina, sin una sincronización con la fuente resonante serie de puente completo.

Por lo cual en esta etapa se realizaron experimentaciones con punto de medición a las salidas del reactor, tanto tangencial como centro, para verificar la separación por diferencia de masa de las especies, sin embargo se presentan dos casos donde el reactor contiene partículas de hollín las cuales reaccionan con los productos del reformado y otro caso donde el reactor está libre de partículas de hollín.

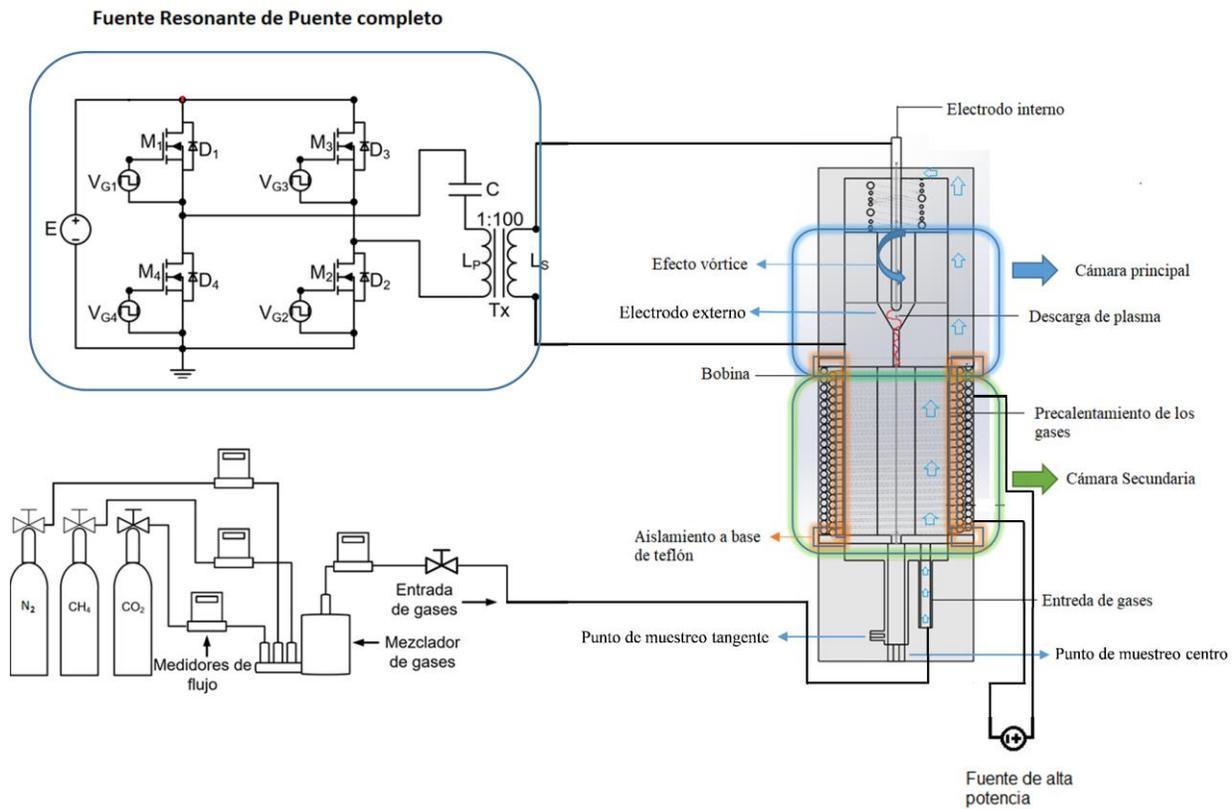


Figura 3.3 Montaje experimental del reformado de los GEI, por centrifuga con la fuente de alta potencia.

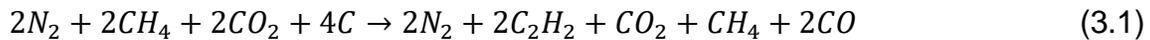
3.5.1 Caso 1 reactor con partículas de hollín

Para el primer caso las características de la experimentación, fue a presión atmosférica (1atm), flujo total de gases de 15 l/min, donde los gases de entrada fueron los siguientes CO₂, CH₄ y N₂ con un flujo de 5 l/min para cada gas, a una potencia de 430 Watts.

La experimentación consistió en variar la intensidad de corriente eléctrica suministrada por la fuente de alta potencia a la bobina, para realizar el estudio en diferentes intensidades de campos magnéticos como se muestra en la Tabla 4.2 del capítulo 4 donde la relación de la intensidad de corriente eléctrica con los campos magnéticos, permitiendo el estudio de la interacción de los productos del reformado por plasma tibio con la interacción del campo magnético tanto en la salida centro como tangente del reactor, para el análisis del enriquecimiento del syngas.



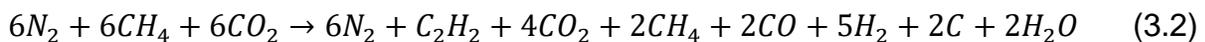
En este primer caso se determinó que en el reformado de los gases de efecto invernadero se generan partículas de carbono que se van acumulando con el tiempo, generando hollín (C_2) el cual provoca que en las siguientes pruebas se obtenga una menor cantidad de hidrógeno hasta el punto de no generarlo, ya que el carbón reacciona con el hidrógeno produciendo así el C_2H_2 , como se demuestra en la siguiente reacción química 3.1.



3.5.2 Caso 2 reactor sin partículas de hollín

Para las siguientes pruebas se eliminaron las partículas de hollín que se encontraba tanto en la cámara principal como en la cámara secundaria, y se prosiguió con la experimentación, con un flujo de 5 l/min de cada gas de entrada (CH_4 , N_2 y CO_2), a una potencia de 650W, presión atmosférica (1atm) nombrando así el caso 2.

Para esta experimentación se volvió a variar la intensidad de corriente en la bobina para formar las diferentes intensidades del campo magnético, empezando con el punto de muestreo tangente permitiendo comparar con el caso 1 para verificar la separación por diferencia de masa y la interacción del hollín con los productos del reformado, los cuales son N_2 , C_2H_2 , CO_2 , H_2 , CH_4 y CO , repitiendo el mismo procedimiento realizando el punto de muestreo tanto en la salida centro como tangente, de esta manera se pudo determinar la reacción 3.2, donde se tiene una mayor producción de hidrógeno al tener menos hollín evitando su interacción con el hidrógeno para la formación del acetileno.



En estas experimentaciones se llegaron a presentar otros fenómenos, como una variación en el deslizamiento del arco eléctrico que genera el plasma tibio, el cual se obtuvo a través de las mediciones de las señales eléctricas del plasma realizadas en el osciloscopio y se muestran en el apartado (3.4) diagnóstico eléctrico del plasma.



3.6 Diagnóstico eléctrico del deslizamiento de la descarga de plasma

Cuando se realiza la descarga del plasma tibio se presenta un comportamiento en el cual la potencia eléctrica varía conforme esta se desplaza desde el punto más cercano entre los electrodos hacia su punto más lejano en donde se extingue y da lugar a la formación de la siguiente descarga. Este fenómeno se repite constantemente y con una frecuencia cuasi-constante, la cual depende de la velocidad del gas dentro del reactor así como su geometría y dimensiones físicas, tal como se describe en [1-4].

Dichas formas de onda están moduladas por la frecuencia de desplazamiento de la descarga entre los electrodos en intervalos de tiempo identificados como T_{des} que se muestran en la Fig. 4.1. Al realizar la captura de las señales eléctricas comprendiendo una escala de tiempo que considere unos cuantos ciclos y que permita apreciar de manera detallada la forma de onda del voltaje y la corriente del plasma, la amplitud de cada una de ellas se registrará de manera aleatoria.

Por tal motivo, durante los experimentos realizados para el estudio del efecto de la aplicación de un campo magnético, las señales eléctricas se capturaron con una escala de tiempo 200 veces mayor al periodo de las forma de onda de voltaje y corriente. Al saber el tiempo de deslizamiento T_{des} se pueden calcular la distancia que recorre la descarga en su deslizamiento y con ello las velocidades y aceleraciones del gas al interaccionar con el campo magnético, así también las fuerzas centrífugas de cada una de las especies como se describen en los siguientes apartados.

3.7 Velocidad rotacional del plasma

Para calcular la velocidad rotacional del plasma se usó el Software Solid Works mediante una simulación de la velocidad del gas. Los factores considerados fueron la geometría interna del reactor, el flujo de entrada de gas de 15 l/min, presión atmosférica (1atm) y el efecto vórtice que tiene el puerto de entrada de gases al reactor (ver Fig. 3.4) donde se muestra la simulación de velocidad del gas en el interior del reactor de plasma tibio sin efecto de campo magnético.

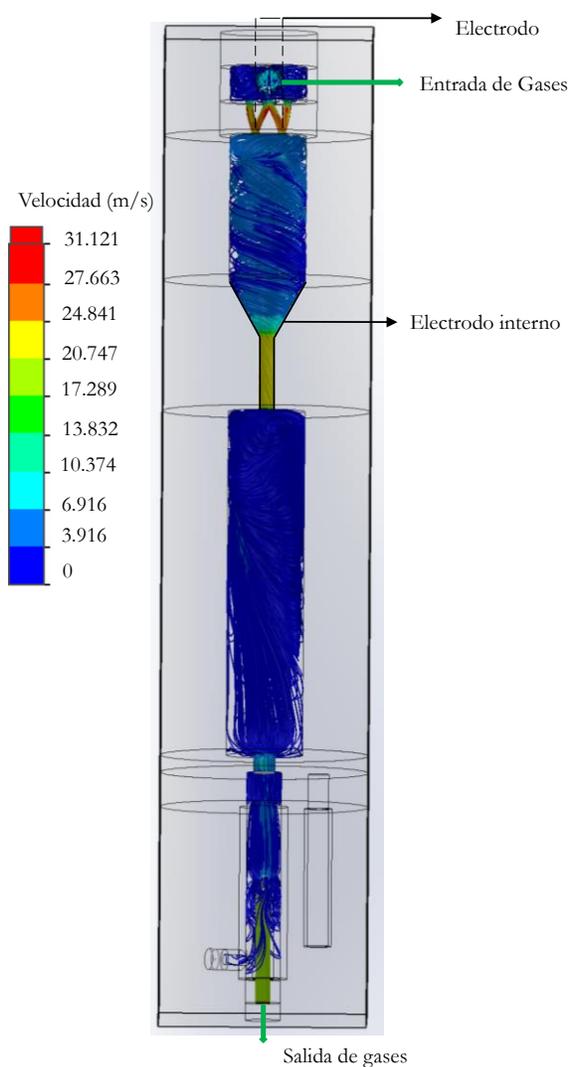


Figura 3.4. Simulación de velocidad del gas en el interior del reactor de plasma tibio sin efecto de campo magnético.



Empleando el tiempo T_{des} obtenido de las Tablas B.1 y B.2 del anexo B se puede calcular la velocidad de rotación de la descarga de plasma. Partiendo de la ecuación de la velocidad, y conociendo el tiempo T_{des} que dura cada descarga de plasma desplazándose por la boquilla sin aplicar campo magnético se calcula a través de la expresión 3.3, donde $v_{plasma0}$ es la velocidad inicial y d_{plasma} la distancia que recorre la descarga en su deslizamiento.

$$d_{plasma} = v_{plasma0} \cdot T_{des} \quad (3.3)$$

Asumiendo que todas las descargas eléctricas subsecuentes seguirán la misma trayectoria debido al efecto spot de las descargas eléctricas [5], con la ecuación 3.3 se calculó la velocidad angular cuyos resultados se presentan en la Tabla 4.1 del capítulo 4 donde se analizan los datos.

3.8 Fuerza centrífuga de las especies

La fuerza centrífuga F_c que experimenta un cuerpo con masa m sometida a una velocidad angular ω a una posición de radio r , está dada por la expresión:

$$F_c = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (3.4)$$

Cuando se genera el plasma tibio entre los electrodos, el gas se ioniza, teniendo una carga que le permite interactuar con un campo magnético y eléctrico, generando una fuerza, la cual es conocida como la fuerza de Lorentz que permite un movimiento en espiral, descrita por la siguiente ecuación:

$$F = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} \quad (3.5)$$

Donde q es la carga de la partícula, \vec{E} el campo eléctrico, \vec{v} velocidad y finalmente \vec{B} el campo magnético. Dicha fuerza permite conocer tanto velocidades como aceleraciones que se encuentran presentes en las especies del reformado, permitiendo evaluar la efectividad del campo magnético generado en la bobina. Por otra parte para calcular el campo magnético en la bobina se utiliza la ecuación (3.6):



$$B = \frac{\mu_0 i N}{2L} \quad (3.6)$$

Donde:

μ_0 = Permeabilidad del vacío

i = Corriente

N = Número de vueltas de la bobina

L = longitud de la bobina

Por otro lado para el cálculo del campo eléctrico se utiliza la ecuación 3.7:

$$E = \frac{V_{plasma}}{Gap} \quad (3.7)$$

Donde V_{plasma} es el voltaje que suministra la fuente resonante para la descarga del plasma tibio y el Gap la distancia entre los electrodos.

3.9 Balance Energético.

Para saber si el sistema es capaz de generar suficiente energía a partir de los subproductos obtenidos se realizó un estudio energético utilizando las expresiones que se describen más adelante, donde se determina si es un sistema apto para generar el gas energético syngas donde se obtiene una ganancia energética o como un sistema de tratamiento de gases de efecto invernadero. Uno de los parámetros para determinar efectividad del sistema es el coeficiente de conversión energética el cual permite calcular la eficiencia del sistema, se obtienen diferentes parámetros que se desarrollaran a continuación para los casos 1 y 2.

La energía consumida SE que se necesita para producir una mol H₂ y CO (syngas), se calcula con la ecuación 3.8 donde se incluye la energía eléctrica que se utiliza para



generar la descarga de plasma, la cual es descrita en términos de electrón volts por molécula del componente (electronvolt/mol).

$$SE = \frac{P_{RMS}}{(CO+H_2)_{producido}} \quad (3.8)$$

Donde P_{RMS} es la potencia a la cual se lleva a cabo la descarga de plasma y $(CO + H_2)_{producido}$ son los moles producidos del syngas después del reformado de plasma tibio. Por otra parte para determinar la energía específica de consumo aplicada en la mezcla de gases de entrada del reactor del plasma se muestra en la ecuación (3.9):

$$SEC = \frac{P_{RMS}}{(CO_2+CH_4)_{producido}} \quad (3.9)$$

Donde $(CO_2 + CH_4)_{producido}$ son los moles de los gases de efecto de invernadero a la entrada del reactor. Finalmente, la mejor forma de medir la efectividad del sistema del reformado de plasma tibio con la mejora de centrifugación por campos magnéticos es calculando el coeficiente de conversión energética (ECE) con la expresión (3.10).

$$ECE = \frac{(\eta_{H_2producido})(LHV_{H_2})+(\eta_{COproducido})(LHV_{CO})}{P_{descarga}+(\eta_{CH_4convertido})(LHV_{CH_4})} \times 100 \quad (3.10)$$

ECE expresa el producto del poder calorífico inferior (LHV) del gas de síntesis con el número de moles de cada especie que compone el syngas obtenido en el proceso de reformado dividido por la suma de la energía de entrada con el producto del poder calorífico inferior del metano con el número de moles del mismo [6-7]. A partir de la expresión 3.10, el valor de ECE deseado debe ser igual al 100% en una situación ideal. De la referencia [8] se encuentran los siguientes valores: 1) $LHV_{H_2} = 242.056$ kJ/mol; 2) $LHV_{CO} = 283.179$ kJ/mol; 3) $LHV_{CH_4} = 802.933$ kJ/mol a una temperatura de 298.16 K. Finalmente $\eta_{H_2producido}$; $\eta_{COproducido}$; $\eta_{CH_4convertido}$ son los moles de cada una de las especies así como $P_{descarga}$ la potencia de la descarga de plasma tibio.



En el siguiente capítulo se muestra el análisis de los datos obtenidos de cada uno de los estudios realizados para cada experimentación descritas en este capítulo, por lo que se comienza con el análisis eléctrico que permite saber la fuerza de centrifugación y las velocidades que se generó con el campo magnético para posteriormente analizar los productos después del reformado por plasma tibio y finalmente realizar el balance energético para determinar si es un procedimiento factible del enriquecimiento del syngas por centrifugación generada por campos magnéticos.



3.10 Referencias.

- [1] Pacheco J., Soria G., Valdivia R., Pacheco M., Ramos F., Frías H., Durán M., Hidalgo M., Salazar J., Silva J., Ibañez M., "Warm Plasma Reactor With Vortex Effect Enhanced Used for CH_4 - CO_2 Reforming", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 42, No. 10, (2014), pp. 2800-2801.
- [2] Pacheco J., G. Soria, M. Pacheco, R. Valdivia, F. Ramos, H. Frías, M. Duran, M. Hidalgo, "Greenhouse gas treatment and H_2 production, by warm plasma reforming", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 40, (2015), 17165-17171.
- [3] Pacheco-Sotelo Joel O., Juan Alfonso Salazar-Torres, Ricardo Valdivia-Barrientos, Marquidia Pacheco-Pacheco, Mario Ibañez-Olvera, Gustavo Soria-Arguello, and Jesús Silva-Rosas, "An Environmental Application in Acid Gas Cracking with a High Frequency Pulsed Gliding Arc", IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 42, No. 3, (2014), pp. 767-773.
- [4] Salazar J.A. -Torres, J Pacheco-Sotelo, R Valdivia-Barrientos, M Pacheco-Pacheco, F Ramos-Flores, G Soria-Arguello and M Ibañez -Olvera, "Impulse Three Phase Power Supply Used for a Gliding Plasma Discharge", Journal of Physics: Conference Series 591, (2015), 012062.
- [5] B. Jüttner, "Properties of Arc Cathode Spots", Journal de Physique IV Colloque, (1997), 07 (C4), pp.C4-31-C4-45.
- [6] Tamosiunas A, Valatkevicius P, Valincius V, Grigaitiene V., "Production of synthesis gas from propane using thermal water vapor plasma", International Journal of Hydrogen Energy, (2014), 39.
- [7] Waldheim L, Nilsson T. "Heating value of gases from biomass gasification". IEA Bioenergy Agreement, Nykoping, China, Tech. Rep. May (2001), TPS-01/16.
- [8] Bossel U. Well to wheel studies, "Heating values and energy conservation principle." Proceedings of European Fuel Cell Forum, Oct. (2003), 22: 572-7.



Capítulo 4

Análisis de

Resultados



4.1 Introducción.

En este apartado se realizan los análisis de los estudios anteriores, partiendo desde el diagnóstico eléctrico del plasma tibio donde se muestra el comportamiento de la corriente y voltaje en la descarga, lo cual nos permite realizar el cálculo de la velocidad de rotación que alcanzan las especies cuando se lleva a cabo la interacción del plasma tibio con el campo magnético.

De acuerdo a lo anterior se calcula la fuerza de centrifugación de las especies y se evalúa la concentración de los gases para poder realizar el balance energético que nos permite el cálculo del poder calorífico aportado por el gas energético, permitiéndonos evaluar el enriquecimiento del syngas.

4.2 Análisis del diagnóstico eléctrico del plasma

Para el análisis del desplazamiento eléctrico que se origina en el electrodo se empleó un osciloscopio, el cual puede registrar 2 Giga-muestras por segundo, lo que permite registrar la evolución de las descargas eléctricas moduladas y observar además a detalle sus formas de onda, tal como se muestra en la Figura 4.1.

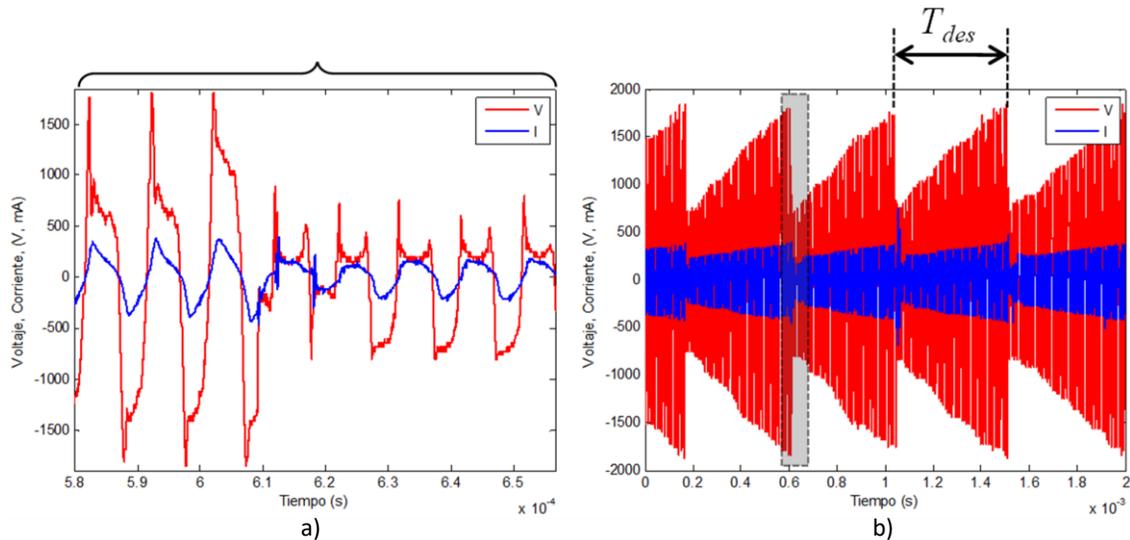


Figura 4.1. Formas de onda de una descarga de plasma tibio a 100 kHz y efecto de modulación por el deslizamiento de la descarga dentro del reactor.



La Figura 4.1 presenta las formas de onda del voltaje y la corriente de una descarga de plasma tibio. Si se considera un rango pequeño de tiempo (gráfica 4.1 a), la intensidad de las formas de onda puede arrojar valores que no son óptimos para el análisis. Por tal motivo se amplió la escala de tiempo (gráfica 4.1 b) para observar la evolución de la intensidad de cada forma de onda y evaluar el tiempo que ocurre entre cada descarga de plasma.

En la forma de onda del voltaje se observa como la intensidad inicia con un valor bajo y conforme la descarga de plasma se desliza entre los electrodos, el voltaje aumenta hasta que la descarga se extingue (voltaje máximo) y vuelve a iniciar una nueva descarga (voltaje mínimo). El tiempo que transcurre entre el mínimo y el máximo valor de voltaje se denomina tiempo de deslizamiento T_{des} .

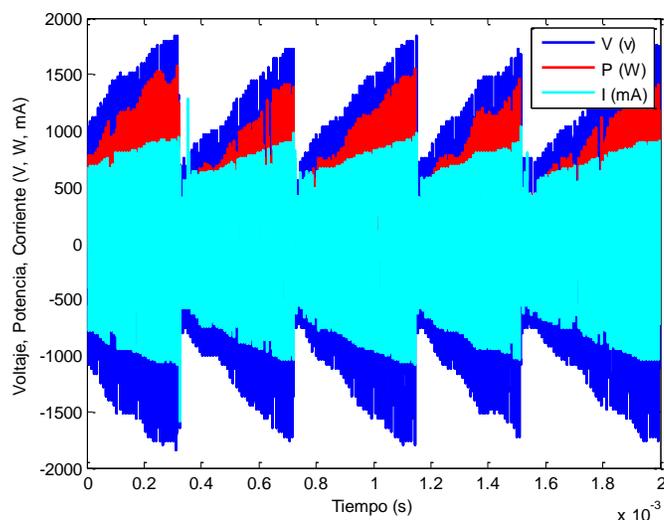


Figura 4.2. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor con carbono sólido.

En las Figuras 4.2 y 4.3 se presentan las formas de onda de voltaje, corriente y potencia del plasma con un campo magnético aplicado de 0.0568 T tanto para el caso 1, como el caso 2, respectivamente. Las formas de onda para otros valores de campo magnético se presentan en las tablas B1 y B2 del anexo B. Con estas formas de onda es posible analizar el efecto del campo magnético.

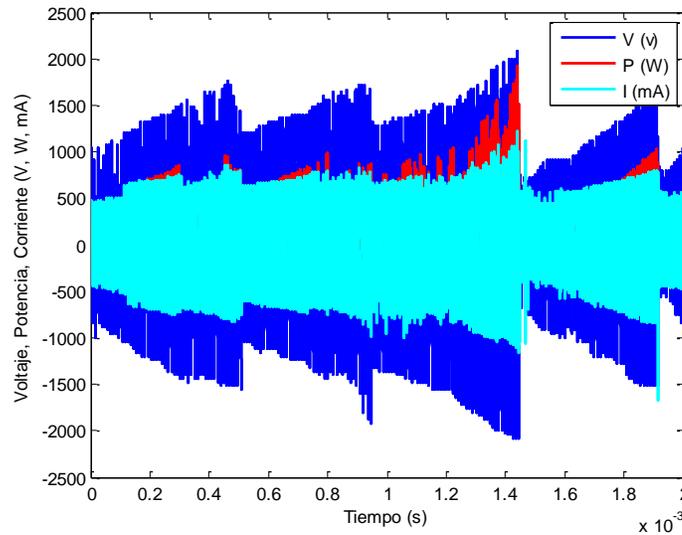


Figura 4.3. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor limpio.

Sobre el tiempo de deslizamiento de las descargas de plasma. En la Figura 4.4 se presenta la evolución de dicho tiempo respecto al campo magnético para ambos casos. Se observa que conforme el campo magnético incrementa, el T_{des} disminuye, lo que evidentemente incrementa la velocidad de deslizamiento de las descargas en ambos casos.

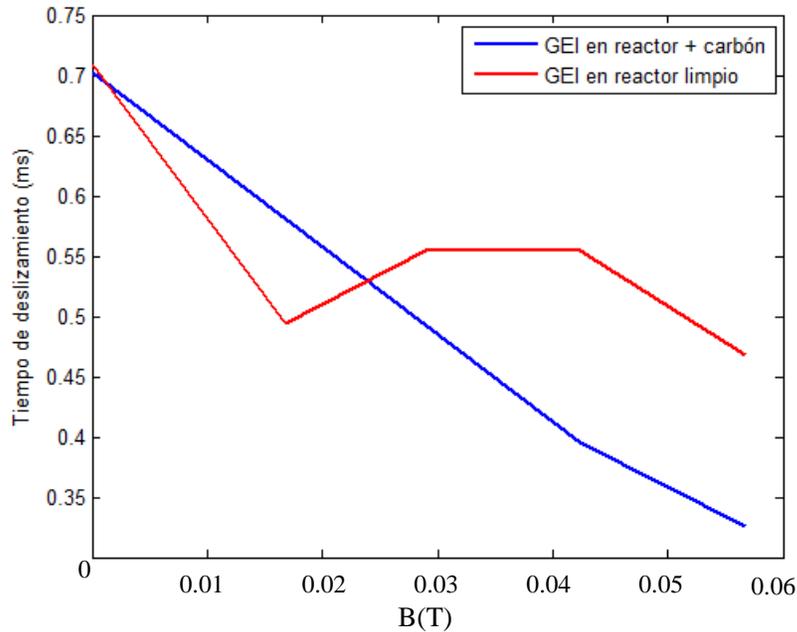


Fig. 4.4. Efecto del campo magnético en el tiempo de desplazamiento de las descargas de plasmas.

4.3 Análisis de la velocidad rotacional del plasma

Tabla 4.1. Velocidad del plasma para los resultados de los caso 1 y 2 (Tablas B.9 y B.10).

B(T)	Velocidad (m/s)		Velocidad angular w (rad/s)	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
0	24.84	24.84	12,421.00	12,421.00
0.0168	30.02	35.65	15,007.82	17,826.90
0.0289	35.37	31.74	17,686.70	15,867.55
0.0424	44.15	31.79	22,074.79	15,896.19
0.0568	53.49	37.63	26,747.06	18,817.28

La simulación del flujo de gas dentro del reactor a condiciones estables (ver Figura 3.4), se consideró como la velocidad inicial del plasma sin aplicar campo magnético (0 T). Aplicando la ecuación (3.3 y 3.4) y empleando los diversos valores de T_{des} para cada descarga (ver Figura 4.4), suponiendo además que la trayectoria de cada descarga es la misma, entonces el valor de la velocidad del plasma para cada caso, así como la velocidad angular (w) que depende del campo magnético aplicado se presenta en la Tabla 4.1, y gráficamente se muestra en la Figura 4.5.

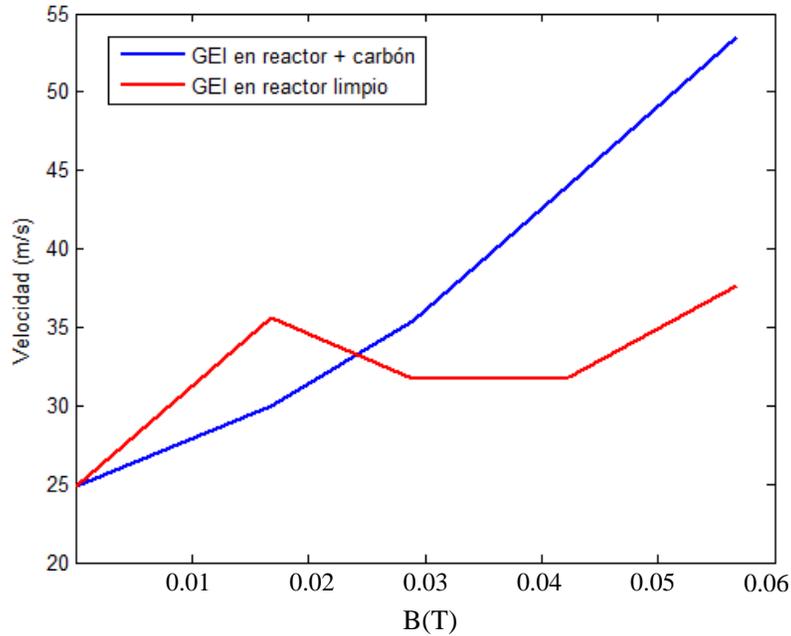


Fig. 4.5. Efecto del campo magnético en la velocidad de las descargas de plasmas

Al observar la Figura 4.5 para los gases en el reactor limpio (caso 2), se tiene un aumento de velocidad que va de 25 m/s hasta los 36 m/s cuando se aplica un campo magnético de 0 a 0.0180 T para después descender y aumentar hasta los 37 m/s cuando la intensidad del campo magnético es de 0.0568 T. Esto nos demuestra que entre mayor sea el campo magnético, mayor será la velocidad de la descarga de plasma.

Sin embargo, caso 1 se tiene un incremento gradual de la velocidad que va desde los 25 m/s hasta los 54 m/s cuando la intensidad del campo magnético es mayor. La razón por la que el plasma con partículas de hollín (caso 1) presenta una velocidad mayor con respecto al caso 2, es probablemente debido a que las partículas sólidas de carbono presentan carga estática que interacciona de mejor manera con el campo magnético del gas ionizado.

El hecho de tener las velocidades con las cuales se realizaron las experimentaciones permitió el estudio de una mejor manera al determinar la factibilidad del enriquecimiento



del syngas por campos magnéticos por lo que en el siguiente apartado se muestran las concentraciones de las especies en cada una de las experimentaciones realizadas.

4.4 Evaluación de concentración de gases

Para poder realizar el estudio energético de las especies se realizó la evaluación de la concentración de los gases enseguida del reformado por plasma tibio con un espectrómetro de masas el cual maneja la relación entre porcentaje de presión con respecto al número de scans realizados por el espectrómetro de masas que cada uno equivale a 6 segundos en tiempo de muestreo

4.4.1 Análisis de resultados de sincronización de fuentes.

Para la evaluación de concentración de gases por medio de espectrometría de masas, se realizó también la medición de la intensidad de corriente en la bobina con un amperímetro de gancho y el voltaje de descarga a través de un osciloscopio, cuyas condiciones de operación para la descarga de plasma y la generación del campo magnético, se muestran en la Tabla A.1, ver Anexo (A). A una potencia de 400 watts y un flujo de 5 l/min de CH₄ y N₂ respectivamente, a presión atmosférica (1 atm).

Los resultados de espectrometría de masas se muestran en la Fig. 4.6 donde los porcentajes obtenidos de las especies después del reformado de plasma tibio, utilizando tanto la fuente resonante serie de puente completo para generar la descarga de plasma como la fuente impulsional para generar los campos magnéticos, demuestra que no hay interacción entre el campo magnético y los productos del reformado, ya que desde que se aplicó el campo magnético en el scan 54 hasta que se apagó en el scan 90 los porcentajes de las especies se mantienen durante la experimentación.

Por otro lado como se puede observar en la Figura 4.6 se tiene una disminución del hidrógeno por el exceso de partículas de hollín en el reactor que hicieron que el hidrógeno



generado por el plasma tibio se convirtiera en acetileno por ello se tiene un incremento en el scan 73.

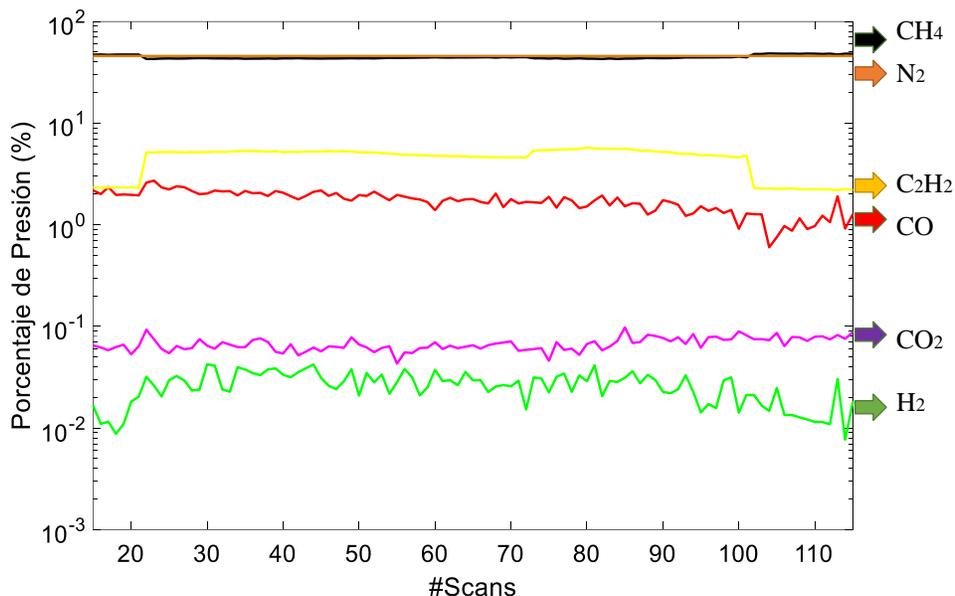


Figura 4.6.- Reformado de GEI, utilizando ambas fuentes en sincronía.

El uso de la fuente pulsante que alimenta la bobina, trabaja con 1.4 A lo que impide generar un campo magnético lo suficientemente intenso como para realizar un cambio significativo en el enriquecimiento del hidrógeno.

De acuerdo a la ecuación (3.6), el campo magnético depende de la corriente que se le suministre a la bobina, por esta razón se optó por no usar la fuente impulsional y conectar directamente una fuente de alta potencia que cuenta el laboratorio de aplicaciones de plasmas (LAP) del Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (ININ), para aumentar la intensidad de corriente suministrada en la bobina. Se realizó la medición de campo magnético respecto a la corriente aplicada a la bobina con el sensor del campo magnético, como se muestra en la Tabla 4.2.



Tabla 4.2.- Relación de la Intensidad de Corriente con el Campo Magnético generado por la bobina

Intensidad de corriente suministrada en la bobina (A)	Campo magnético (T)
36	0.0168
60	0.0289
90	0.0424
120	0.0568

Como se observa en la Tabla 4.2 la intensidad del campo magnético es proporcional a la intensidad de corriente en la bobina. Esto permitió realizar el análisis de las variaciones de las especies en las distintas intensidades del campo magnético tanto de la salida tangencial como en el centro del reactor con ayuda del equipo de espectrometría de masas “Cirrus”.

4.4.2 Análisis del Caso 1 con partículas de hollín

Se analizó dos casos en particular, el primero de ellos es cuando se tenía una gran cantidad de partículas de hollín con el objetivo de estudiar el impacto en la generación del syngas así como en la separación de las especies por diferencia de masa al analizar ambas salidas del reactor.

-Punto de muestreo tangente

En la Fig. 4.7, se muestran los resultados de espectrometría de masas con la fuente de alta potencia conectada a la bobina. La potencia de operación en la fuente resonante serie fue de 430W. Con un flujo de entrada de 5 l/min de N₂, CH₄ y CO₂ respectivamente, a presión atmosférica (1atm) y variando la intensidad del campo magnético, las características de la descarga de plasma tibio se muestran en la Tabla A.2 del anexo A.

Se observa que al aplicar un campo magnético de 0.0168 T, en el scan 49 se registra una producción de hidrógeno del 0.9%, aumentando a 1.16% cuando se aumenta la intensidad del campo magnético a 0.0289 T sin embargo solo este comportamiento se presenta durante el incremento del campo magnético, ya que en los siguientes scans



decae probablemente debido a la falta de sincronización del campo magnético con el campo eléctrico de la descarga de plasma.

En la Figura 4.7 del scan 48 al 70 se tiene una disminución del hidrógeno que es menor al 1% y un incremento tenue del acetileno a lo largo de la experimentación que llega hasta el 3%, esto es debido a la reacción del hidrógeno con el hollín por otro lado probablemente por la centrifugación ocurre la separación de masas que provoca el tener menor cantidad de hidrógeno en la salida tangente al ser este más ligero que las demás especies, tiende a salir por la parte centro del reactor.

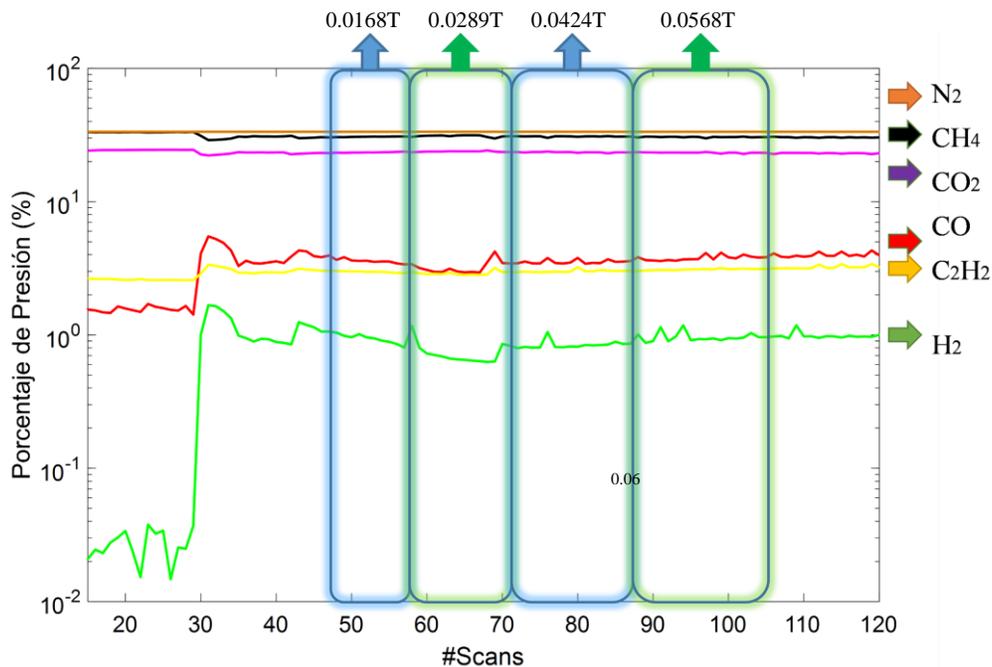


Figura 4.7.- Porcentaje de los productos del reformado a 400W.

El comportamiento que tiene el hidrógeno a lo largo de la experimentación se puede deber a que el campo magnético sigue siendo muy tenue para lograr hacer centrifugar a los gases por lo que se prosiguió con diferentes experimentaciones, analizando esta vez desde la salida centro.

Adicionalmente, justo en los scans 58, 71, 88 y 94 se observan impulsos en la concentración de H₂ y CO, que es justo cuando se realizan los cambios de intensidad de



campo magnético, lo que hace evidente una interacción del campo magnético, sin embargo este no se mantiene durante el resto del experimento.

-Punto de muestreo centro:

En la Fig. 4.8 se muestran los resultados desde el punto de muestreo centro donde en la fuente resonante serie de puente completo para la descarga de plasma tibio se trabajó a una potencia de 430 W, y utilizando la fuente de alta potencia en la bobina, se fue variando la intensidad de corriente cada 30 A para generar diferentes campos magnéticos, con un flujo de entrada de 5 l/min de N₂, CH₄ y CO₂ respectivamente, a presión atmosférica (1 atm), las características de la descarga del plasma tibio de la Figura 4.8 se muestran en la Tabla A.3 del anexo A.

El encendido de la descarga en el scan 37 se obtuvo 1.57% de hidrógeno, al generar un campo magnético de 0.0168 T en el scan 51 se disminuyó la producción de hidrógeno a 1.02%, al seguir aumentando la intensidad del campo magnético la producción de hidrógeno se mantuvo estable, incluso cuando el campo magnético llegó a 0.0568 T se mantuvo en 1.055% de hidrógeno. Esto puede deberse por el efecto de centrifugación que se genera por la interacción entre la descarga de plasma y el campo magnético que separa las especies por su diferencia de masa manteniendo un flujo constante de hidrógeno en la salida centro del reactor.

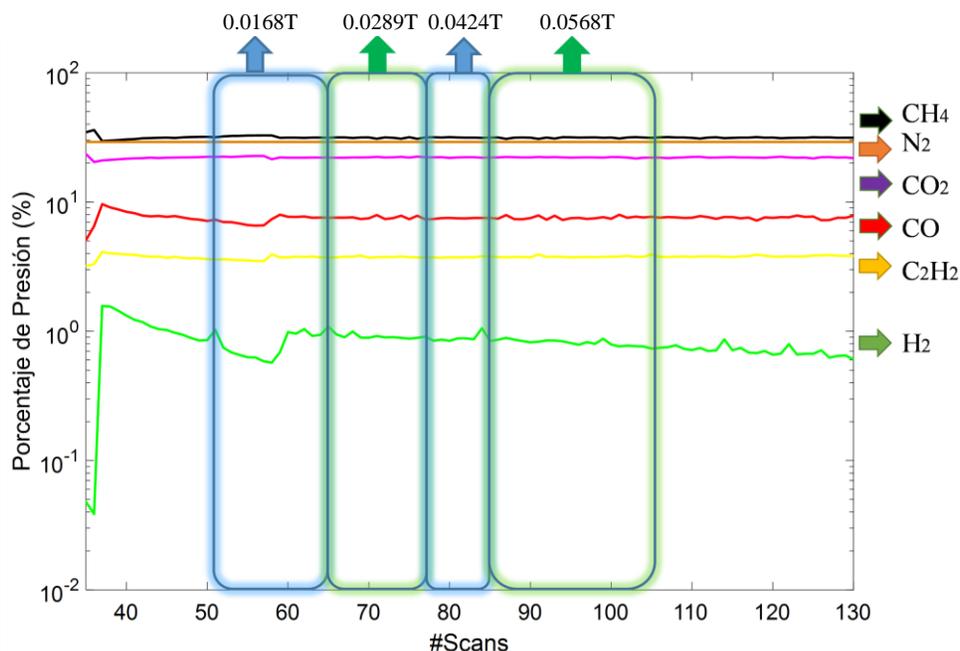


Figura 4.8.- Porcentaje de los productos del reformado a 430W.

De igual manera se observa perturbaciones en la gráfica de la evolución del hidrógeno en el momento de realizar cada incremento del campo magnético (scan 51, 65, 77 y 84)

4.4.3 Análisis del Caso 2 sin partículas de hollín:

El segundo caso de estudio se presentó cuando se limpió el reactor, teniendo una mínima cantidad de partículas de hollín donde se aumentó la producción del syngas y se prosiguió con el estudio de ambas salidas del reactor.

-Punto de muestreo tangente

En la Figura 4.9 se muestran los resultados de espectrometría de masas al hacer un aumento de potencia en la descarga de plasma tibio hasta los 650 W, con un flujo de los gases de entrada de 5 l/min de N₂, CH₄, y CO₂ respectivamente, a presión atmosférica (1 atm), el propósito de aumentar la potencia de 430 W a 650 W fue para incrementar la producción de hidrógeno, y verificar la separación por diferencia de masa en la cámara



secundaria donde tiene la interacción con el campo magnético. Las características de la descarga del plasma tibio se muestran en la Tabla A.4 del anexo A.

Al observar la Figura 4.9 los resultados obtenidos una vez iniciada la descarga de plasma tibio, cuando la intensidad de campo magnético fue de 0.0168 T se obtuvo una producción del 3% de hidrógeno, del acetileno de 2.7 % y finalmente del monóxido de carbono de 4.7%, comparado con el hidrógeno producido en el inicio de la descarga scan 15 este disminuyó de 5% a 3%.

Sin embargo comparando con las experimentaciones anteriores, en este caso se obtuvo la mayor producción de hidrógeno. Por otro lado, en cada incremento de la intensidad del campo magnético se observan pequeñas variaciones en la evolución de las especies, donde el mayor porcentaje de producción del hidrógeno fue cuando la intensidad del campo magnético alcanzó los 0.0568 T produciendo 3.13% de hidrógeno y 2.5 % de acetileno.

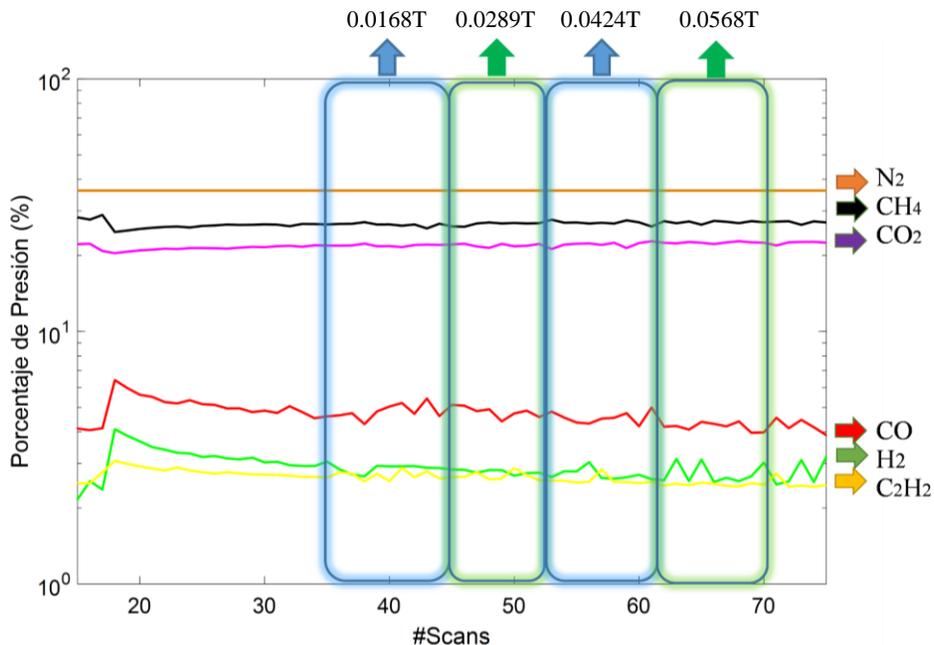


Figura 4.9.- Porcentaje de los productos del reformado a 650W, medición tangente.



La tendencia que muestra la producción de hidrógeno en el Figura 4.9 a lo largo de la experimentación es descendente, solo muestra pequeños picos en cada variación del campo magnético, por otro lado el acetileno muestra un comportamiento de incremento tenue, al ser el punto de muestreo tangente esto puede deberse a la separación por diferencia de masa, por lo que se procedió a la experimentación con el punto de muestreo centro.

-Punto de muestreo centro

En la Figura 4.10 se muestran los resultados de espectrometría de masas de la experimentación con un aumento de la potencia en la descarga de plasma tibio a 700 W, con un flujo de los gases de entrada de 5 l/min de N₂, CH₄, y CO₂ respectivamente, a presión atmosférica (1 atm). De igual forma que en los casos anteriores, se fue incrementando la intensidad del campo magnético donde el hidrógeno a lo largo de la experimentación se mantuvo estable fluctuando entre 5.6% y 5.2% alcanzando el mayor porcentaje cuando el campo magnético era de 0.0289 T para después disminuir a los 0.0568 T a 5.2% manteniéndose estable el resto de la experimentación.

En este caso tanto el monóxido de carbono como el acetileno no fluctuaron tanto y se mantuvieron más estables a lo largo del experimento, sin embargo al compararlo con la prueba anterior (del punto de muestreo tangencial) hay una mayor cantidad de hidrógeno, así mismo no tuvo un comportamiento descendente esto es debido a la separación por diferencia de masa que provocó una mayor cantidad de hidrógeno y menor de acetileno.

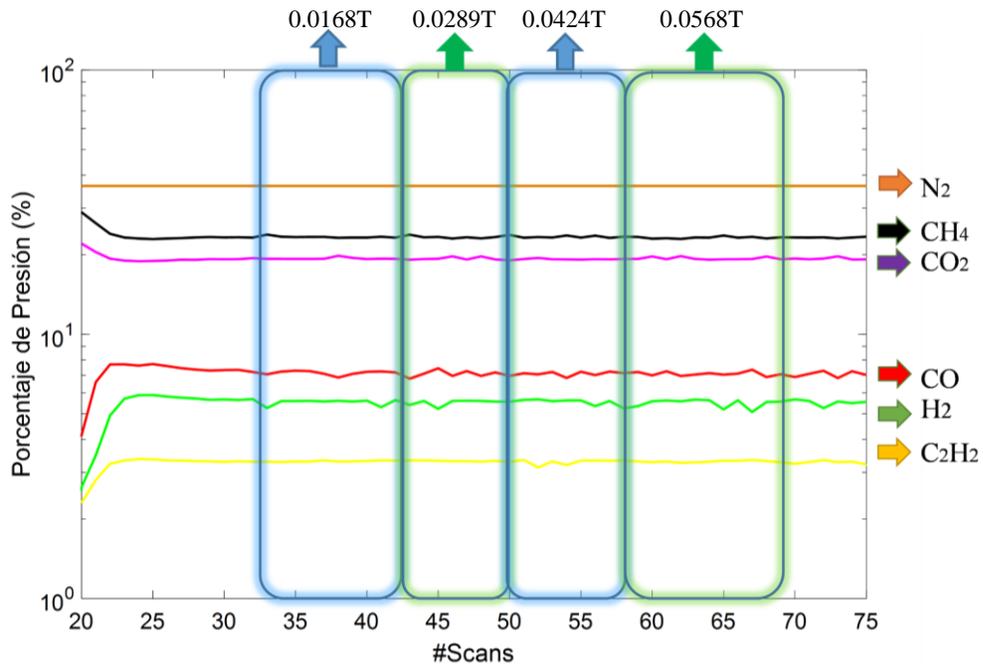


Figura 4.10.- Porcentaje de los productos del reformado a 700W, medición Centro.

Para resumir los resultados de los experimentos realizados se hizo la Tabla (4.3) con los porcentajes de los productos después del reformado de plasma tibio. Solamente se presentan las especies involucradas en el reformado de GEI y no se tomó en consideración el N₂ al igual que trazas de otros elementos, es por ello que la suma de los elementos presentados no es cien por ciento. Se comparan los puntos de muestreo de las salidas centro y tangente de cada caso tanto con partículas de hollín y sin partículas de hollín.



Tabla 4.3.- Porcentaje de los productos del reformado por plasma tibio en las salidas centro y tangente del caso 1 y 2.

Gases de salida	Campo magnético (T)				Punto de medición
	0.0168	0.0289	0.0424	0.0568	
CASO 1	CH ₄	31.71 %	31.41 %	31.58 %	Centro
	CO ₂	22.34 %	22.06 %	22.18 %	
	C ₂ H ₂	3.589 %	3.725 %	3.722 %	
	CO	7.296 %	7.551 %	7.334 %	
	H ₂	1.027 %	1.087 %	0.91 %	
CASO 2	CH ₄	23.83 %	23.21 %	23.76 %	Centro
	CO ₂	19.28 %	19.29 %	19.06 %	
	C ₂ H ₂	3.293 %	3.326 %	3.288 %	
	CO	7.056 %	7.177 %	6.959 %	
	H ₂	5.258 %	5.639 %	5.557 %	
CASO 1	CH ₄	33.42 %	33.42 %	33.42 %	Tangente
	CO ₂	23.832 %	23.392 %	23.434 %	
	C ₂ H ₂	3.01 %	2.972 %	2.963 %	
	CO	3.832 %	3.392 %	3.434 %	
	H ₂	0.985 %	1.167 %	0.83 %	
CASO 2	CH ₄	26.53 %	26.69 %	27.69 %	Tangente
	CO ₂	24.796 %	24.622 %	24.815 %	
	C ₂ H ₂	2.639 %	2.617 %	2.568 %	
	CO	4.61 %	4.622 %	4.815 %	
	H ₂	3.05 %	2.879 %	2.652 %	

Como se puede observar en la Tabla 4.3 el mayor enriquecimiento del syngas fue en el caso 2 en la salida centro, cuando el campo magnético fue de 0.0289 T y se registró el mayor porcentaje de hidrógeno y monóxido de carbono 5.639% y 7.177% respectivamente, esto se debió a varios factores como el aumento de la potencia del plasma, y al no haber una gran acumulación de partículas de hollín.

Por otro lado en el caso 1 se obtuvo menor reformado del metano en hidrógeno por la gran acumulación de partículas de hollín formando en mayor cantidad el acetileno, al igual que la potencia de la descarga de plasma tibio fue menor a 430 W. Un comportamiento



importante de observar es el incremento del porcentaje del syngas y del acetileno cuando se tiene un campo magnético de 0.0289 T en cualquiera de los dos casos, para después tener un decremento en las siguientes intensidades del campo magnético, lo que abre pauta a la posibilidad de incrementar el enriquecimiento al alcanzar mayores intensidades de campos magnéticos.

Sin embargo la interacción de los campos magnéticos con las especies fue muy tenue, es decir no hubo un enriquecimiento del syngas que fuera mayor al 6% por lo que se procedió a un estudio de las aceleraciones alcanzadas en cada caso para calcular las fuerzas de centrifugación.

4.5 Análisis de la fuerza centrífuga de las especies

La carga q necesaria para realizar el cálculo de la fuerza de Lorentz se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$q = \frac{0.5}{2\pi f} \int_0^{T_{des}} \text{sen}(2\pi fT) dt \quad (4.1)$$

Donde:

T_{des} = Tiempo de desplazamiento

f = Frecuencia

q = Carga

A partir del cálculo de la carga, del campo eléctrico con la ecuación (3.7), los campos magnéticos y las velocidades obtenidas de la Tabla 4.1, se calcula la fuerza de Lorentz con la ecuación (3.5) tanto del punto mínimo y máximo de cada periodo de la señal eléctrica de la Figura 4.2 a lo largo de la experimentación y en cada variación del campo magnético como se muestra en la Figura 4.11, donde del mismo modo se calcula la fuerza promedio.



Al observar la Figura 4.11 se tiene una disminución de la fuerza de Lorentz en 0.0168 Teslas donde a partir de ahí aumenta hasta tener un máximo en 0.03 T donde se mantiene constante, para después tener un comportamiento decreciente en la fuerza promedio, esto posiblemente se deba a la necesidad de tener un campo magnético mayor que permita mantener o aumentar la fuerza de Lorentz, por otro lado el peso de los productos del reformado tiene una participación directa en la fuerza de giro donde en este caso se tenía una acumulación grande de partículas de hollín.

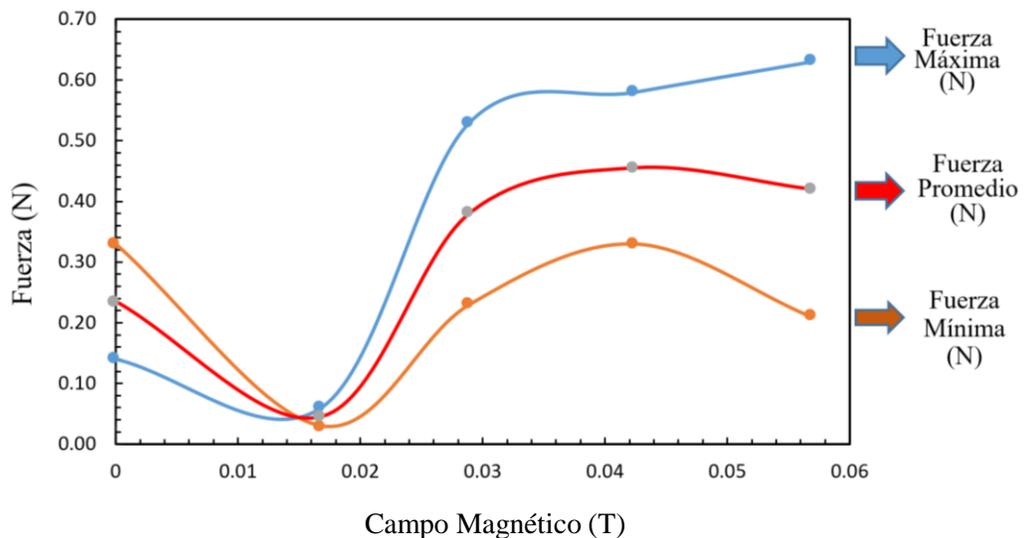


Figura 4.11. Relación del campo magnético con la fuerza de Lorentz generada del caso 1.

Con el cálculo de la fuerza de Lorentz se obtiene la aceleración de cada una de las especies de acuerdo a su respectiva masa en las diferentes intensidades del campo magnético, con esto se demuestra la separación por diferencia de masa al tener distintos valores de aceleración, como se muestra en la Figura 4.12. En las Tablas C.2 a C.6 en el anexo C se presentan las especificaciones de los cálculos realizados. Las especies de estudio son las que se muestran en la Reacción (3.2).

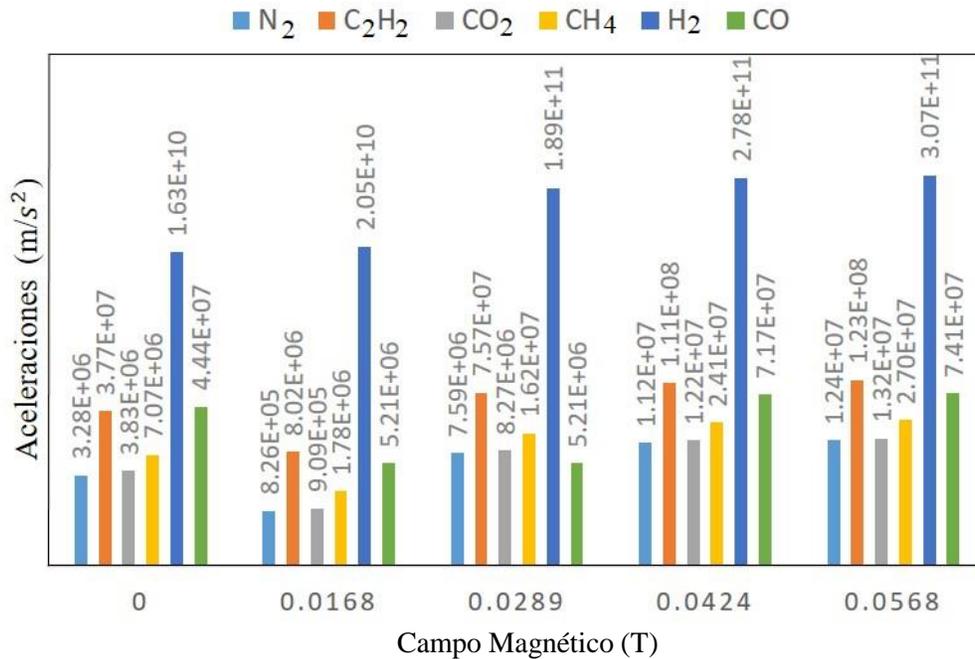


Figura 4.12. Relación del campo magnético con la aceleración de las especies del caso 1.

Como se puede observar en la Figura 4.11 la aceleración del hidrógeno aumenta conforme se incrementa el campo magnético lo que permite la separación de las especies por la diferencia de masa al centrifugar, ya que su aceleración es mayor. Por otro lado las especies más pesadas tienen una aceleración baja comparada con el hidrógeno como el N₂ y el CO₂ como se observa en la Tabla 4.3 donde hay un menor porcentaje de N₂ y CO₂ en la salida centro sin embargo por la salida tangente su concentración es mayor.

Para el caso 2, los resultados obtenidos de la fuerza de Lorentz se muestran en la Figura 4.13 donde la especificación de los cálculos se muestran en la Tabla C.7 del anexo C, de la misma manera que en el caso 1, se muestra la relación del campo magnético con la fuerza de Lorentz, donde se puede observar que la tendencia es totalmente distinta.

Cuando el campo magnético es 0 la fuerza es menor a 0.1 N sin embargo conforme se aumenta el campo magnético se obtiene un máximo de 0.6 N en la fuerza promedio a los 0.028 T para luego tener un comportamiento descendente hasta los 0.15 N cuando la intensidad del campo magnético es 0.056 T. Este comportamiento diferente es debido a



que la concentración de partículas de hollín es menor, sin embargo existen otros dos factores como la intensidad del campo magnético que aún es débil y el no haber sincronización de las fuentes para que la centrifugación se lleve a cabo en un solo sentido.

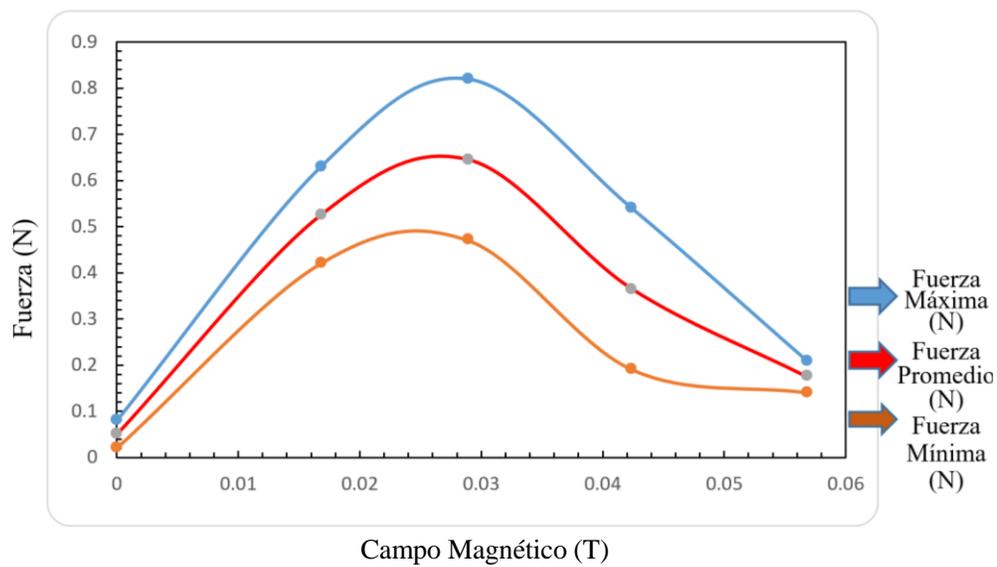


Figura 4.13. Relación del campo magnético con la fuerza de Lorentz generada del caso. 2.

A partir de los resultados la Tabla C.7 del anexo C, se calculan flujos y aceleraciones de cada una de las especies para diferentes magnitudes del campo magnético generado por la bobina, mostrando los resultados en las Tablas C.8 a C.12 en el anexo C, resumidas en la Figura 4.14 donde se muestran los valores de aceleración alcanzadas de cada especie a lo largo de la experimentación al ir aumentando la intensidad del campo magnético.

Se puede observar que la máxima aceleración es alcanzada cuando se tiene una intensidad del campo magnético de 0.0268 T. Aunque dicha experimentación estuvo libre de partículas de hollín y se obtuvo una mayor producción de hidrógeno, se sigue demostrando la factibilidad de separación por diferencia de masa al alcanzar mayor aceleración en el hidrógeno con respecto a las demás especies.

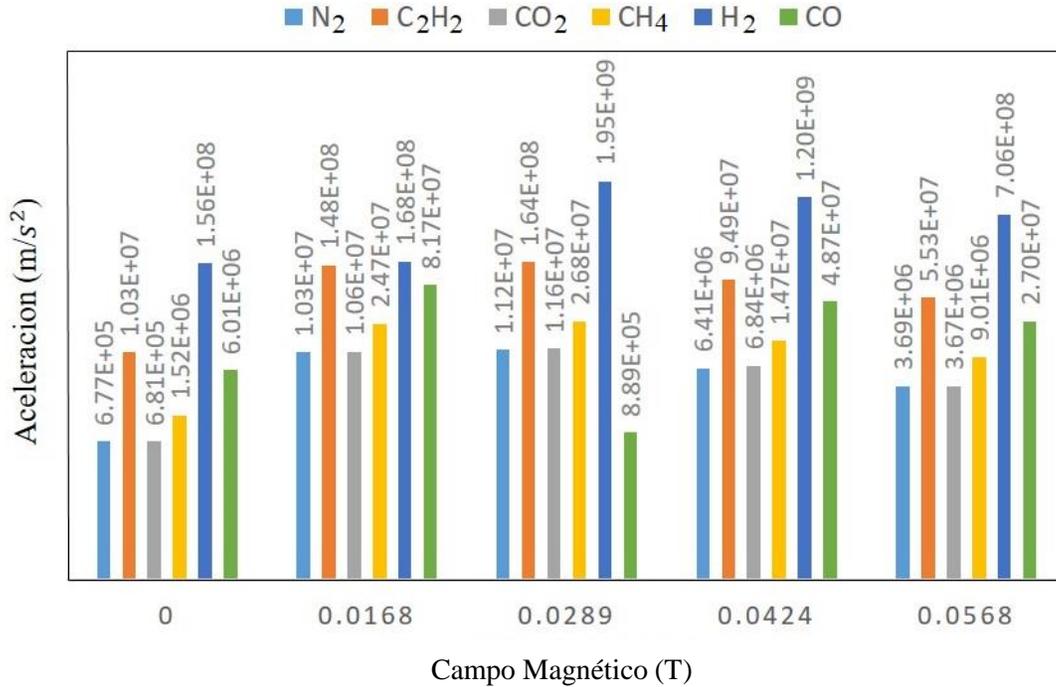


Figura 4.14. Relación del campo magnético con la aceleración de las especies del caso 2.

De igual forma también se observa mayor aceleración de los productos del reformado comparado con el caso 1, esto se debe a la baja concentración de partículas de hollín en la mezcla de gases después del reformado por plasma tibio, lo que disminuye la fricción entre los mismos incrementando así la aceleración. A partir de los datos obtenidos se realizó un estudio energético para determinar la factibilidad de utilizar el procedimiento como tratamiento de gases de efecto invernadero o la producción del syngas.

4.6 Balance Energético.

Utilizando los datos de la Figura 4.8 del caso 1 donde se realizó el punto de muestreo centro, se obtienen los porcentajes de cada una de las especies a lo largo de la experimentación como se observa en la Tabla 4.4 donde se muestran los porcentajes de los gases de salida (H₂, CO, CH₄, CO₂) después del reformado por plasma tibio. No se toma en consideración el N₂ ya que por el rango de temperatura del plasma tibio (3000 K), este se comporta como gas noble (Por tal motivo su concentración permanece constante en los experimentos mostrados). Tampoco se considera el C₂H₂ y el resto de



las especies, por esta razón la suma de los porcentajes de las especies no alcanza el 100% de la mezcla de gases de salida.

Tabla 4.4. Porcentajes de los gases de salida después del reformado, caso 1.

Campo Magnético (T)	Potencia (Watts)	Número de Scan	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0	430	37	1.57	9.62	29.62	20.97
0.0168	410	51	1.02	7.29	31.71	22.34
0.0289	430	65	1.08	7.55	31.41	22.06
0.0424	430	77	0.91	7.33	31.58	22.18
0.0568	430	84	1.05	7.52	31.35	22.01
0.0568	440	103	0.76	7.7	31.75	21.69
0.0568	440	114	0.86	7.65	31.17	22.16
0	440	123	0.66	7.61	31.41	21.99

A partir de la Tabla 4.4 se calcula la cantidad de moles de las especies, tomando en consideración un flujo de 5 l/min para los gases de entrada N₂, CH₄, CO₂ respectivamente a presión atmosférica (1atm), para ello se utiliza la siguiente expresión 4.2:

$$Mol_{Especies} = \frac{\rho * f}{m} \quad (4.2)$$

Donde:

ρ = Densidad de la especie ($\frac{kg}{m^3}$)

f = Flujo ($\frac{m^3}{s}$)

m = Masa molar ($\frac{kg}{mol}$)

Los flujos molares de entrada de los GEI son: $Mol_{CH_4} = 0.003540$ ($\frac{mol}{s}$); $Mol_{CO_2} = 0.003540$ ($\frac{mol}{s}$), por otro lado para obtener los moles de salida del syngas se utiliza los datos de la Tabla 4.3 con la mayor intensidad del campo magnético registrado en el scan 84, al obtener los porcentajes tanto del H₂ como del CO₂ se calculan los flujos molares de salida los cuales son: $Mol_{H_2} = 0.000217$ ($\frac{mol}{s}$); $Mol_{CO} = 0.000765$ ($\frac{mol}{s}$).

Con los datos obtenidos de los moles tanto de los reactivos como los productos se puede calcular el porcentaje de conversión de los gases de efecto invernadero, con las ecuaciones 4.3 y 4.4:



$$(\%) CH_4 \text{ conversión} = \frac{\eta_{CH_4 \text{ conv}}}{\eta_{CH_4 \text{ entrada}}} \times 100 \quad (4.3)$$

$$(\%) CO_2 \text{ conversión} = \frac{\eta_{CO_2 \text{ conv}}}{\eta_{CO_2 \text{ entrada}}} \times 100 \quad (4.4)$$

Donde $\eta_{CH_4 \text{ conv}}$ y $\eta_{CO_2 \text{ conv}}$ son los moles que se transformaron en el syngas, por otra parte $\eta_{CH_4 \text{ entrada}}$ y $\eta_{CO_2 \text{ entrada}}$ son los moles de entrada de los gases de efecto invernadero. Si la conversión fuera del 100% en CH_4 significa que todo el metano se transformó en H_2 y sucede lo mismo con el CO_2 en CO . La relación que existe entre los gases de efecto invernadero y el syngas y que permite saber el porcentaje de producción tanto del H_2 como del CO [6], se obtiene con la expresión 4.5 para el H_2 y 4.6 para el CO :

$$(\%) H_2 \text{ rendimiento} = \frac{\eta_{H_2 \text{ producido}}}{\eta_{CH_4 \text{ entrada}}} \quad (4.5)$$

$$(\%) CO \text{ rendimiento} = \frac{\eta_{CO \text{ producido}}}{\eta_{CH_4 \text{ entrada}} + \eta_{CO_2 \text{ entrada}}} \quad (4.6)$$

Para el caso 1 se obtuvo $H_2 \text{ rendimiento} = 6.129 \%$ y para $CO \text{ rendimiento} = 10.8 \%$. Al saber los porcentajes de rendimiento del syngas se puede calcular la energía de consumo necesaria para producir un mol de syngas que se obtiene con la ecuación 3.8 sabiendo que la potencia con la que se trabajó fue de 430 watts a 100 Khz, durante un tiempo de 262 segundos, por lo tanto para calcular P_{RMS} que se utiliza en la ecuación 3.8 se calcula con la expresión 4.7:

$$P_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T P(t)^2 dt} \quad (4.7)$$

Siendo P la potencia (en kW) y t el tiempo (s) dando un total de 112.66 kW. Por lo tanto la energía de consumo necesaria para la producción de un mol de syngas es $SE = 437.88 \frac{kJ}{mol}$ para un flujo de 5 litros por minuto de CO_2 . Por otra parte, para determinar la energía específica de consumo aplicada (SEC) para la mezcla de gases a la entrada del reactor de plasma tibio (CH_4 y CO_2) se utiliza la expresión 3.9, dando como resultado



$SEC = 60.73 \frac{kJ}{mol}$; finalmente la mejor manera para medir la efectividad del sistema de reformado se utiliza la expresión 3.10 donde para realizar los cálculos se deja los resultados expresados en mol/s ya que los flujos tanto de entrada de los GEI, como del syngas no son constantes, obteniendo los siguientes resultados:

$$Mol_{H_2} = 0.000217 \text{ (mol/s)}$$

$$Mol_{CO} = 0.000765 \text{ (mol/s)}$$

$$Mol_{CH_{4conv}} = 0.00354 \text{ (mol/s)}$$

Con los datos obtenidos de los flujos molares tanto de reactivos como de productos se calcula la eficiencia de conversión energética (ECE) la cual para el caso 1 es del 38.52%. Comparando los resultados obtenidos en este trabajo con los obtenidos por otros autores en el reformado de gases de efecto invernadero, se realizó la Tabla 4.5 que permite situar el trabajo realizado en cuestión energética con otras investigaciones. En la Figura 4.15 se grafica la comparación de flujos, potencia, energía utilizada SE y el coeficiente de conversión energética. Por otro lado en la Figura 4.16 se muestra la comparación con respecto al porcentaje de conversión de los gases de efecto invernadero así como el porcentaje de producción del hidrógeno y monóxido de carbono.

Tabla 4.5. Comparación energética de diferentes autores con este trabajo

Referencias	LPM	Watts	SE (kJ/mol)	ECE (%)	CO ₂ %	CH ₄ %	CO Rendimiento	H ₂ Rendimiento
1 Wang	0.02	107.4	7289	4	44.4	72.8	82	70
2 Yang	0.043	46.3	1798	13	47.8	62.4	67	70
3 Indarto	1	190	608	28	31	40	62	50
4 Xumei	73	1800	88	89	64.8	78	96.8	83
5 Este Trabajo	15	430	437.88	38.52	34.94	9.45	10.08	6.129

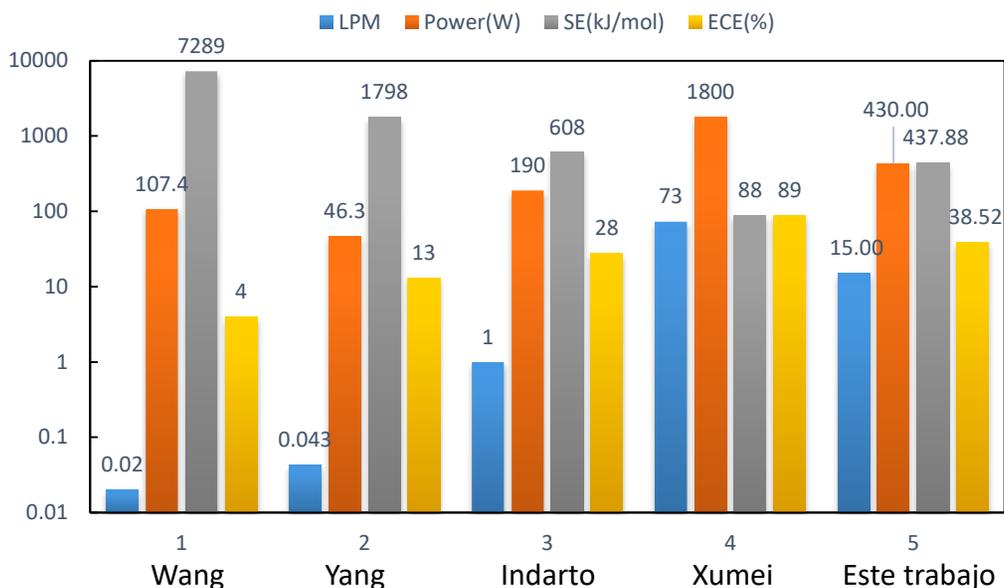


Figura 4.15. Comparación de flujo, potencia, SE y ECE del caso 1 con otros autores

Como se puede observar en la Figura 4.15 en este trabajo se utiliza el flujo de gases de 15 l/min aunque es menor que la de Xumei (73 l/min), sin embargo la potencia que se utiliza es menor (430 W). Por otro lado, la energía consumida es menor comparada con el trabajo 1,2 y 3 siendo de 437.88 kJ/mol por otro lado el coeficiente de conversión energética es mayor que los demás trabajos al ser 38.52% excepto el de Xumei (89%), sin embargo se encuentra en un nivel competitivo por la cantidad de flujo que se maneja.

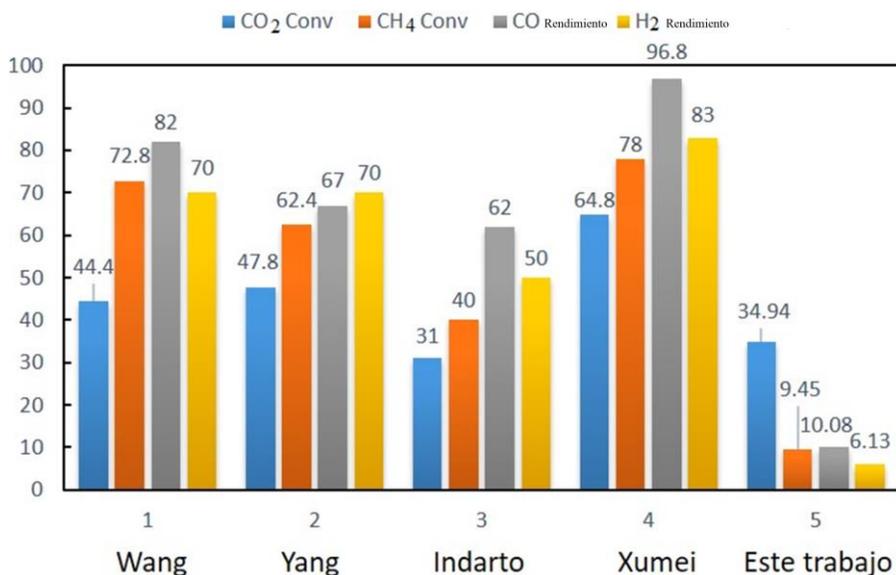


Figura 4.16. Comparación de porcentaje de conversión de los GEI (CO₂ y CH₄) y del rendimiento del syngas (CO y H₂) del caso 1 con otros autores

Por otro lado como se muestra en la Figura 4.16 el porcentaje de conversión de los gases de efecto invernadero de este trabajo es menor que los demás y la producción del syngas es menor. Esto se debe a la baja producción de hidrógeno, como se mencionó anteriormente en el caso 1, se encontró hollín en el interior del reactor provocando la reacción del hidrógeno con el carbono formando así el acetileno C₂H₂, por otro lado la energía necesaria para la producción del syngas (SE) es menor y competitiva con los demás teniendo un flujo alto de GEI.

De igual forma, para el caso 2 se realizó la Tabla 4.6 a partir de la Figura 4.10, donde se muestran los porcentajes de los productos del reformado por plasma tibio de la medición centro con lo cual se realizó el cálculo de la eficiencia de conversión energética, calculando los moles de las especies, de la misma manera que en el caso 1, con un flujo de 5 l/min de cada gas de entrada N₂, CH₄, CO₂ a presión atmosférica (1atm) y con un aumento en la potencia de la descarga de plasma hasta los 700 W.



Tabla 4.6. Porcentajes del syngas y de los gases de efecto invernadero en el reformado de plasma tibio caso 2

Campo Magnético (T)	Potencia (Watts)	Número de Scan	H ₂	CO	CH ₄	CO ₂
0	700	24	5.88	7.61	32.45	23.03
0.0168	620	33	5.25	7.05	32.55	23.83
0.0289	700	42	5.63	7.17	25.47	23.21
0.0424	700	50	5.55	6.95	26.53	23.76
0.0568	700	58	5.24	7.13	26.69	23.4

Al conocer el flujo de entrada de los GEI el cual es 5 l/min para cada gas se multiplica con la densidad 0.656 kg/m³ y 1.842 kg/m³, del metano y dióxido de carbono respectivamente, para obtener así el flujo molar de entrada de $Mol_{CH_4}=0.00354 \left(\frac{mol}{s}\right)$; $Mol_{CO_2}=0.003540 \left(\frac{mol}{s}\right)$. Para el cálculo de la cantidad de moles del syngas se realiza de la misma manera que el caso 1, sin embargo en esta ocasión se toman los porcentajes que se muestran en la Tabla 4.6 para el cálculo del flujo molar del syngas los cuales son los siguientes: $Mol_{H_2} =0.00109 \left(\frac{mol}{s}\right)$; $Mol_{CO} =0.000725 \left(\frac{mol}{s}\right)$. Una vez obtenidos los moles de entrada como de salida, con las expresiones 4.3 y 4.4 se calcula el porcentaje de conversión del metano y del dióxido de carbono siendo estos los siguientes:

$$(\%) CH_4 \text{ conversión} = 24.81$$

$$(\%) CO_2 \text{ conversión} = 32.75$$

A partir de esta relación se calcula el parámetro de producción entre los gases de efecto invernadero y el syngas que permite saber el porcentaje de producción tanto del H₂ como del CO utilizando las expresiones 4.5 y 4.6, dando como resultado:

$$(\%) H_2 \text{ rendimiento} = 30.79$$

$$(\%) CO \text{ rendimiento} = 10.24$$

Al saber los porcentajes de rendimiento se obtuvo la energía de consumo necesaria para producir el mol de syngas a partir de la ecuación 3.8 sabiendo que la potencia con la que



se trabajó fue de 700 watts a 100 Khz, durante un tiempo de 522 segundos, se calcula P_{RMS} siendo este el siguiente:

$$P_{RMS} = 365.4 \text{ kW}$$

Por lo tanto la energía de consumo necesaria para la producción de un mol de syngas es $SE = 385.67 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$ para un flujo de 5 litros por minuto de CO_2 . Por otra parte, para determinar la energía específica de consumo aplicada (SEC) para la mezcla de gases a la entrada del reactor de plasma tibio (CH_4 y CO_2) se utiliza la expresión 3.9, dando como resultado $SEC = 98.87 \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$; finalmente para medir la efectividad del sistema del reformado se utiliza la expresión 3.10, utilizando los siguientes flujos molares para calcular el ECE:

$$\text{Mol}_{\text{H}_2} = 0.00103 \text{ (mol/s)}$$

$$\text{Mol}_{\text{CO}} = 0.000765 \text{ (mol/s)}$$

$$\text{Mol}_{\text{CH}_4_{\text{conv}}} = 0.00354 \text{ (mol/s)}$$

La eficiencia de conversión energética (ECE) es de 33.16% para el caso 2. Se realizó la Tabla 4.7 para comparar con otros autores en el reformado de gases de efecto invernadero que permite situar el trabajo realizado en cuestión energética. A partir de dicha tabla se realizaron las Figuras 4.17 donde se compara la energía suministrada, flujos, potencias y el coeficiente de conversión energética, y la Figura 4.18 donde se realiza la comparación de conversión de los GEI y el porcentaje de producción del syngas.

Tabla 4.7. Comparación energética de diferentes autores con este trabajo para el caso 2

Referencias	LPM	Watts	SE (kJ/mol)	ECE (%)	CO_2 %	CH_4 %	CO Rendimiento	H_2 Rendimiento
1 Wang	0.02	107.4	7289	4	44.4	72.8	82	70
2 Yang	0.043	46.3	1798	13	47.8	62.4	67	70
3 Indarto	1	190	608	28	31	40	62	50
4 Xumei	73	1800	88	89	64.8	78	96.8	83
5 Este Trabajo	15	700	385.67	33.16	32.75	24.81	10.24	30.79

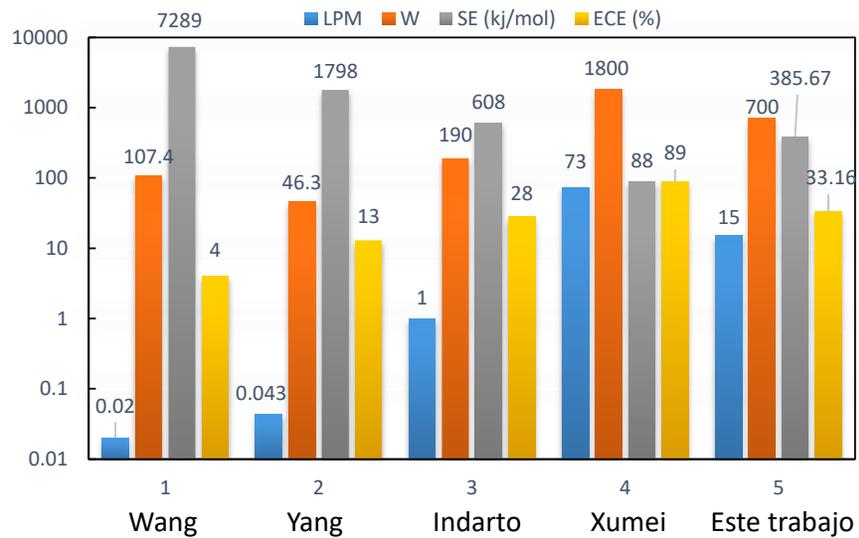


Figura 4.17. Comparación de flujo, potencia, SE y ECE del caso 2 con otros autores

En la Figura 4.17 se observa que el coeficiente de conversión energética disminuyó comparado con el caso 1, esto se debe al incremento de la potencia de la descarga de plasma tibio aunque la energía necesaria para producir un mol de syngas (SE) es menor en este caso debido al incremento en la producción del syngas, el flujo sigue siendo el mismo (15 l/min) y la potencia se incrementó en 170 W, manteniendo un nivel competitivo con los demás autores.

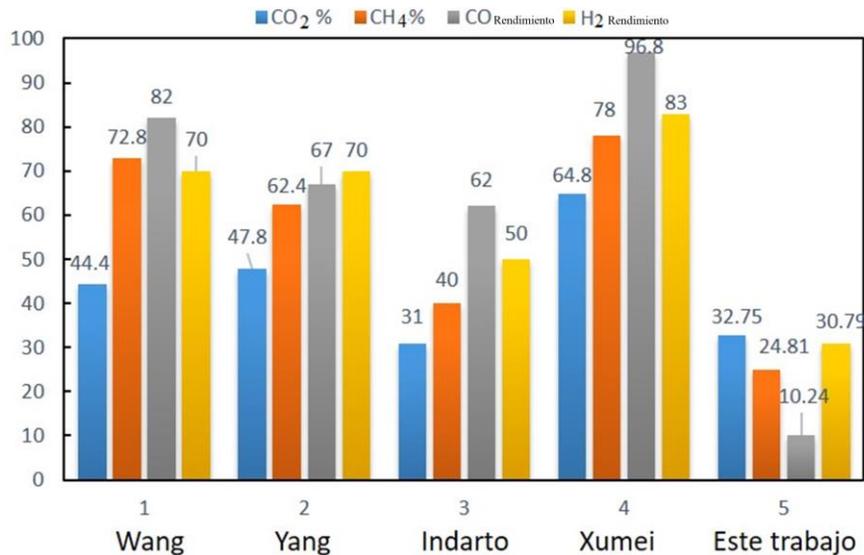


Figura 4.18. Comparación de porcentaje de conversión de los GEI (CO₂ y CH₄) y del rendimiento del syngas (CO y H₂) del caso 2 con otros autores



En la Figura 4.18 se observa un incremento en la producción del hidrógeno comparado con el caso 1, donde el rendimiento de conversión del H_2 se incrementó de 6.13% a 30.79% esto se debe al incremento de la potencia así como también a la ausencia de las partículas de hollín, lo que permite una mayor producción del syngas y un incremento en el porcentaje de conversión del metano pasando de 9.45% para el caso 1 a 24.81% para el caso 2. Por otro lado, el porcentaje de producción del monóxido de carbono se mantiene igual, sin embargo aun con un aumento de producción del syngas, sigue siendo bastante baja comparada con otros autores.

Se demuestra por tanto que la presencia de hollín afecta el reformado de gases de efecto invernadero, tanto en la velocidad como en el porcentaje de conversión de las especies y su coeficiente de conversión energética, en el siguiente apartado se realiza un estudio energético para comprobar la factibilidad del procedimiento para el enriquecimiento del syngas.

4.7 Poder Calorífico

Se realizó un estudio tomando en consideración el flujo molar de los productos respecto al campo magnético aplicado después del reformado por plasma tibio, comenzando con el caso 1, Figura 4.7 punto de muestreo centro. En la Figura 4.19 se muestran los flujos molares de cada especie con los que posteriormente se realizó el cálculo del poder calorífico. Los cálculos realizados se muestran en las Tablas D.1- D.4 del anexo D.

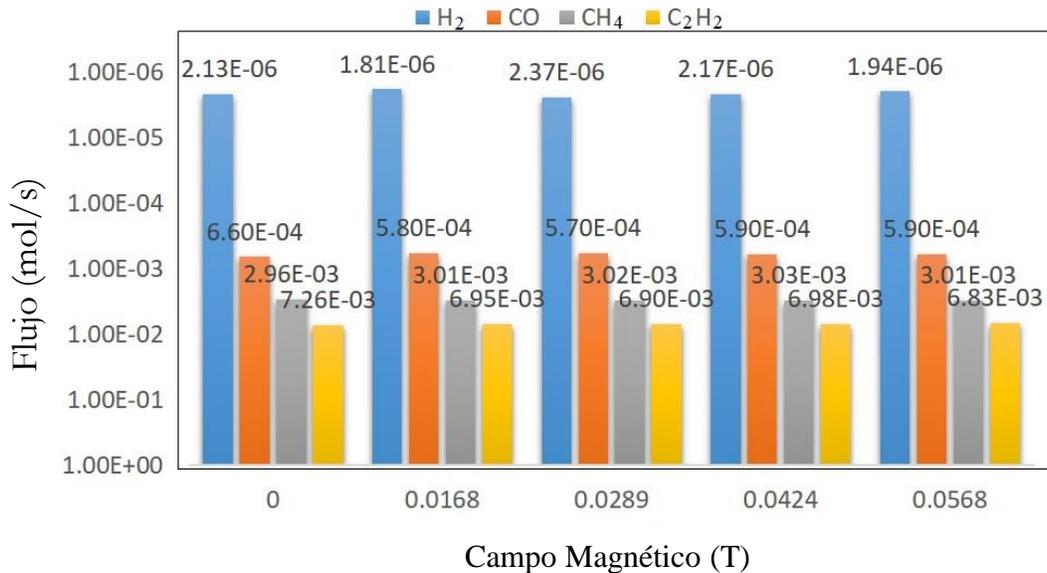


Figura 4.19. Flujos molares de cada especie con respecto al campo magnético del caso1

En la Figura 4.19 se muestra como varían los flujos molares en función de las diferentes intensidades del campo magnético, sin embargo la variación es mínima entre las especies siendo el menor flujo molar el del hidrógeno. Esto se debe al bajo porcentaje de conversión del metano, por otro lado esto permite realizar el cálculo del poder calorífico obtenido de las especies después del reformado por plasma tibio utilizando los datos del LVH ($LHV_{H_2} = 242.056$ kJ/mol; $LHV_{CO} = 283.179$ kJ/mol; $LHV_{CH_4} = 802.933$ kJ/mol; $LHV_{C_2H_2} = 1201.17$ kJ/mol a una temperatura de 298.16K).

Una vez realizado el producto del flujo molar con el poder calorífico inferior (LVH) se obtiene el poder calorífico en función del tiempo. Los cálculos realizados se muestran en la Tabla D.5 del anexo D, donde el poder calorífico mostrado es de cada especie con respecto a la variación del campo magnético. En la Figura 4.20 se muestra la suma del aporte calorífico de todas las especies en función del campo magnético después del reformado por plasma tibio:

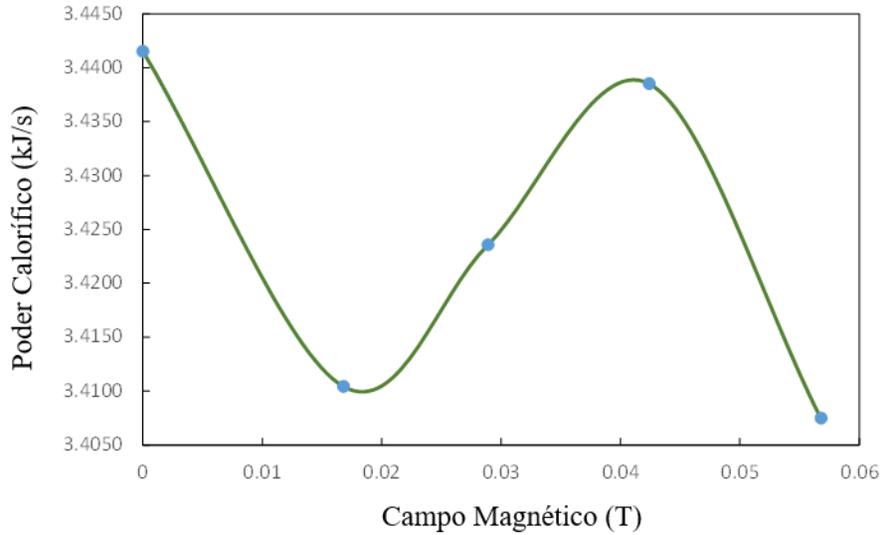


Figura 4.20. Poder Calorífico kJ/s de las especies del caso 1.

Como se muestra en la Figura 4.20 la tendencia del poder calorífico de la mezcla de gases después del reformado de plasma tibio es descendente cuando el campo magnético va de 0 a 0.02 T sin embargo a partir de este punto tiene un aumento que llega a un máximo de 3.4350 kJ/s cuando la intensidad del campo magnético es 0.04 T para luego descender. Esto es debido a la variación del enriquecimiento del syngas, así también a la velocidad y aceleración que alcanzan las especies al interactuar con el campo magnético.

Los cálculos realizados del poder calorífico se muestra en la Tabla D.5 del anexo D, el metano y el acetileno son las especies que aportan un mayor poder calorífico, por otro lado aunque la tendencia de cambio del poder calorífico sea mínima cuando se incrementa el campo magnético permite demostrar la interacción que existe de las especies del reformado por plasma tibio con el campo magnético generado, sin embargo si este fuera mayor es posible que la tendencia sea ascendente para obtener un enriquecimiento del hidrógeno. Para observar este efecto, se presenta la Figura 4.21 que muestra el poder calorífico de cada una de las especies respecto al campo magnético durante el reformado de plasma tibio.

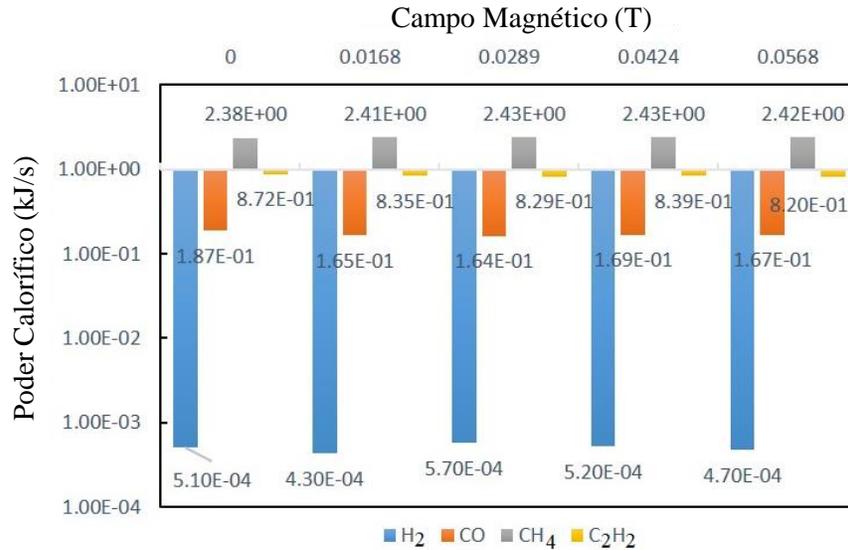


Figura 4.21. Aporte del poder calorífico en kJ/s de cada una de las especies después del reformado por plasma tibio, caso 1.

Como se muestra en la Figura 4.21, el hidrógeno no tuvo una aportación significativa en el poder calorífico ya que la producción del hidrógeno fue baja por la interacción con el hollín, por otro lado el de mayor aportación que se obtuvo del syngas fue el monóxido de carbono así también el acetileno tuvo una mayor aportación. Por lo que se prosiguió con el análisis del caso 2 para ver cómo se comporta el poder calorífico tanto de cada especie como de la mezcla en conjunto después del reformado por plasma tibio al ir variando la intensidad del campo magnético.

Repitiendo los cálculos, ahora para el caso 2, se tomó en consideración el análisis no sólo de la salida centro del reactor sino también en la salida tangente para el caso 2. En la Figura 4.22 se muestra el flujo molar de cada especie respecto al campo magnético de la salida tangente, donde los cálculos realizados se muestran en las Tablas D.6-D.9 del anexo D.

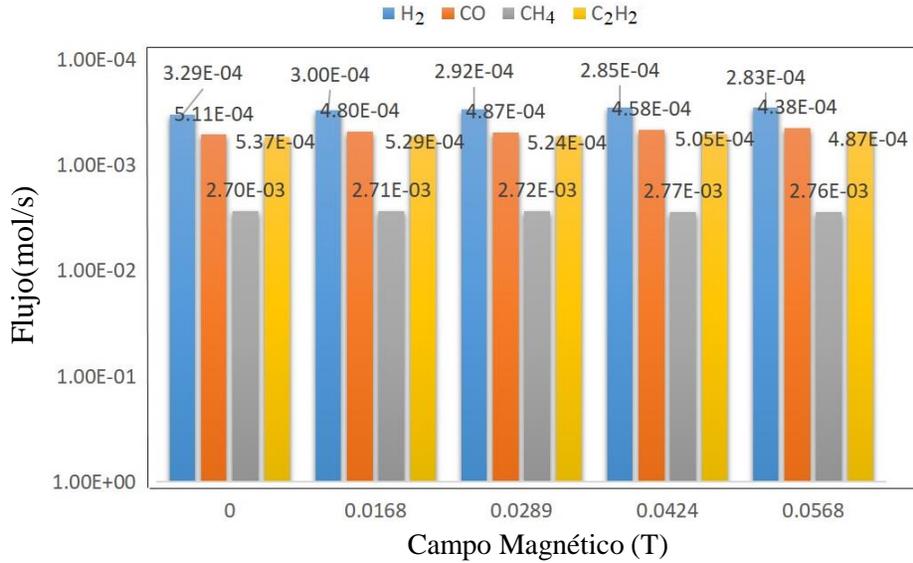


Figura 4.22. Flujos molares de cada especie con respecto al campo magnético del caso 2, punto de muestreo tangencial.

Como se observa en la Figura 4.22 el mayor flujo molar es del metano y este aumenta conforme aumenta el campo magnético, debido a la producción del acetileno que va incrementándose y absorbiendo más hidrógeno lo que lleva a una disminución de conversión del metano, por otro lado el flujo molar del hidrógeno disminuye al igual que el acetileno esto se debe a que el hollín se va acumulando en la cámara secundaria del reactor lo que disminuye el flujo molar de las especies.

Al calcular el poder calorífico de todas las especies utilizando el LVH de cada gas como se muestran en las Tablas D.6 a la D.9 del anexo D, se suman para mostrar la tendencia del poder calorífico de la mezcla de gases después del reformado por plasma tibio como se muestra en la Figura 4.23, donde se muestra una tendencia descendente de 0 a 0.015 T para después incrementar hasta 3.02 kJ/s cuando el campo magnético es 0.04 T, después disminuye hasta 2.98 kJ/s para cuando se alcanza 0.0568 T. Comparado con el caso 1, el poder calorífico es menor. Esto es debido a que la mayor parte del hidrógeno fluye por la salida centro del reactor.

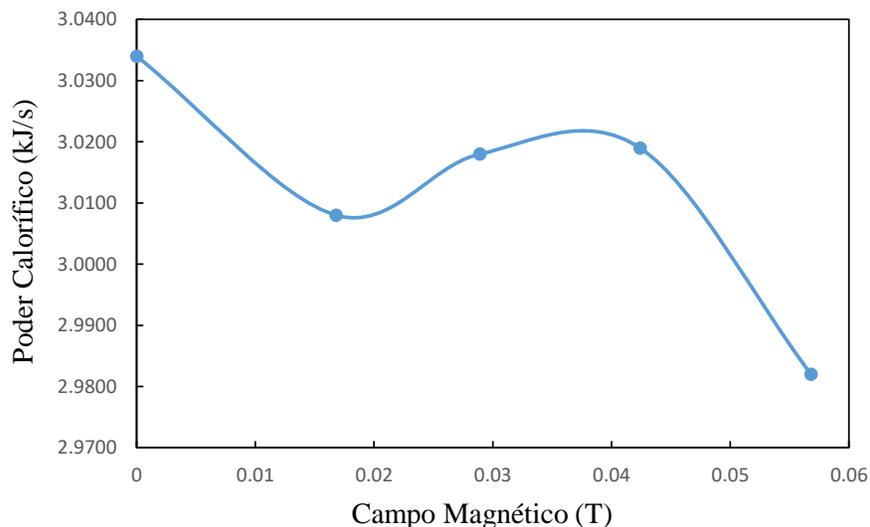


Figura 4.23. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 2.

Con los datos obtenidos de la Tabla D.10 del anexo D, se realizó la Figura 4.24 donde se muestra el aporte de poder calorífico de cada especie. En comparación con el caso 1, se tiene menor aporte del acetileno y un incremento en el hidrógeno. Por otro lado también se incrementó el flujo molar del monóxido de carbono esto se debe a la ausencia de las partículas de hollín y al aumento de la potencia que proporciona una mayor conversión de los GEI en syngas.

Como se puede observar hay una la disminución del flujo molar del metano, sin embargo este va incrementando con forme se incrementa el campo magnético esto posiblemente es debido a la separación de diferencia de masa o al incremento de partículas de hollín con forme se alarga la experimentación.

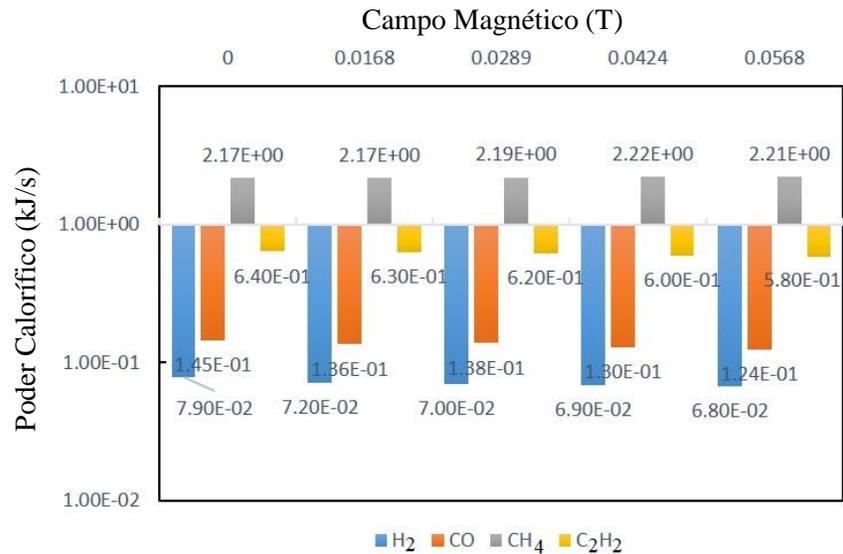


Figura 4.24. Aporte del poder calorífico en kJ/s de cada una de las especies después del reformado por plasma tibio caso 2, muestreo tangencial.

Por otro lado el aporte en el poder calorífico del syngas es mayor al del caso 1, pasando de 0.0005 kJ/s a 0.07 kJ/s de hidrógeno y de 0.17 kJ/s a y 0.12 kJ/s de monóxido de carbono al tener una intensidad del campo magnético de 0.0568 T.

Para realizar el estudio del caso 2 del punto de muestreo centro del reactor, en las Tablas D.11 a D.14 del anexo D se muestran los cálculos del flujo molar de cada especie después del reformado por plasma tibio, que se presentan en la Figura 4.25. Con los datos obtenidos de los flujos se calculó el poder calorífico de la mezcla permitiendo observar el comportamiento del enriquecimiento del syngas durante el reformado.

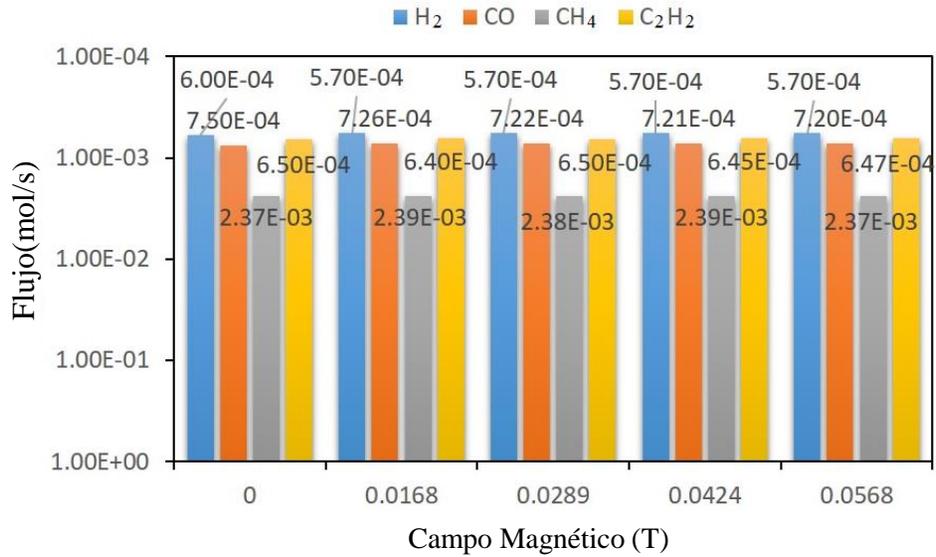


Figura 4.25. Flujos molares de cada especie con respecto al campo magnético del caso 2, punto de muestreo centro.

Como se observa en la Figura 4.25 el flujo molar del hidrógeno se mantuvo estable sin importar el incremento de la intensidad del campo magnético, en tanto que el monóxido de carbono tuvo un comportamiento descendente conforme se iba incrementando el campo magnético. Esto se debe a la centrifugación, separando las especies de mayor masa de las de menor masa, de igual forma el flujo del acetileno fue disminuyendo conforme se aumentaba el campo magnético, excepto cuando se tenía una intensidad de 0.0568 T de campo magnético.

Aunque no se obtuvo un cambio de flujo molar de una magnitud importante donde se llevara a cabo el enriquecimiento en un gran porcentaje del syngas, si se demuestra la separación de especies por diferencia de masa por la interacción con el campo magnético. Esto da pauta a la posibilidad de aumentar el enriquecimiento con un campo magnético mayor. El poder calorífico de la suma de las especies después del reformado de plasma tibio se muestra en la Figura 4.26, donde los cálculos se muestran en la Tabla D.15 del anexo D.

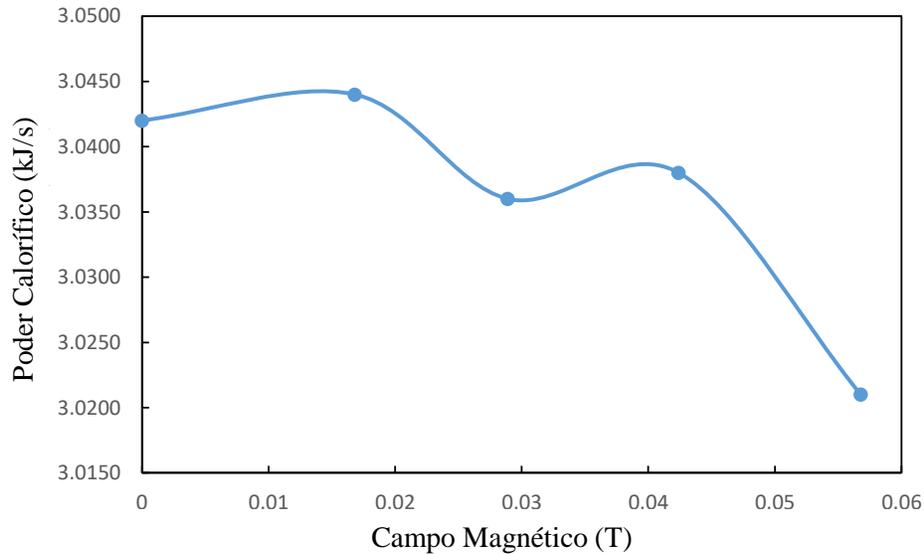


Figura 4.26. Poder Calorífico kJ/s de las especies del caso 2, punto de muestreo centro.

En la Figura 4.26 se muestra un comportamiento diferente al caso 1 y a la salida tangente del caso 2, donde se tiene un incremento en el poder calorífico cuando la intensidad del campo magnético es 0.015 T.

Este comportamiento se debe a la baja interacción que llega a tener el campo magnético con las especies del reformado por plasma tibio. Por otro lado el poder calorífico total sigue siendo menor que el caso 1 ya que se cuenta con menor cantidad de acetileno al haber menos concentración de partículas de hollín. Con los datos obtenidos de la Tabla D.15 del anexo D, se realizó la Figura 4.27 donde se muestra el aporte de poder calorífico de cada especie, en comparación al caso 2 punto de muestreo tangente, se tiene un incremento en el hidrógeno y del monóxido de carbono.

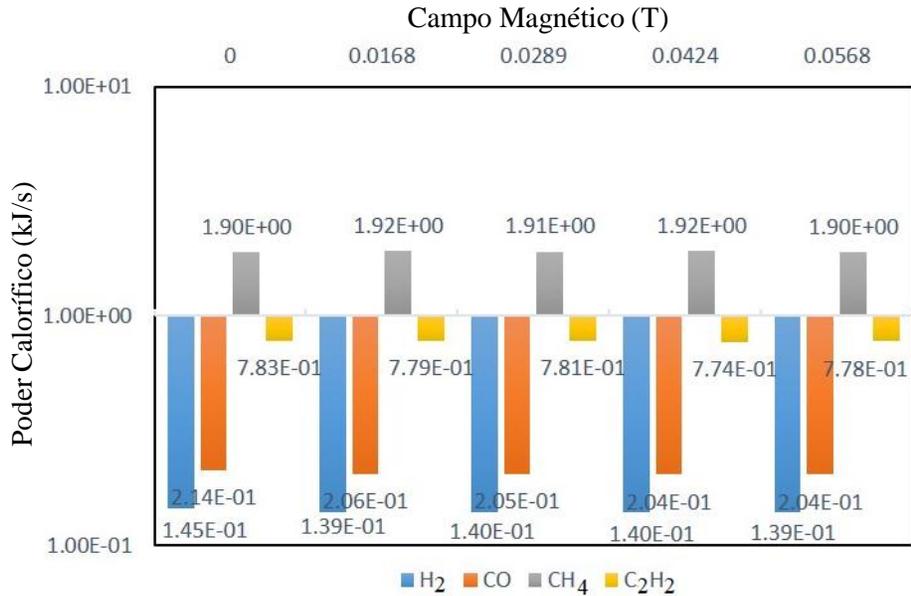


Figura 4.27. Aporte del poder calorífico en kJ/s de cada una de las especies después del reformado por plasma tibio caso 2, muestreo Centro.

En la Figura 4.27 se observa un incremento de aportación del poder calorífico del hidrógeno de 0.14 kJ/s para la salida tangente a 0.20 kJ/s para la salida centro y una disminución en el metano de 2.21 kJ/s para la salida tangente a 1.9 kJ/s para la salida centro cuanto el campo magnético es de 0.0568 T. Esto se debe a un mayor porcentaje de conversión del metano en hidrógeno, sin embargo los valores más altos registrados del syngas fue al tener una intensidad del campo magnético de 0.0289 T. Por otro lado, se obtuvo una mayor cantidad de monóxido de carbono lo que significó un ligero enriquecimiento del syngas.

Cuando se incrementa la intensidad del campo magnético se tiene un descenso del poder calorífico el cual es inferior al inicio de la descarga del plasma tibio sin la participación de los campos magnéticos, como se muestra en la Figura 4.27, lo que quiere decir que el campo magnético no es lo suficientemente fuerte para realizar un enriquecimiento significativo en el syngas.



Por lo que la producción del hidrógeno no tiene un cambio mayor al 5% como se pudo observar en los dos casos de estudio cuando se encuentran una gran acumulación de partículas de hollín y cuando se tiene limpio el reactor, en las diferentes salidas, por otro lado aunque el porcentaje de separación fue mínimo existe la posibilidad de llegar a separar las especies con un campo magnético mayor.

Minxiang Wu [5] señala que a medida que aumenta la intensidad del campo magnético, aumenta la rotación del arco. Para lograr una revolución completa, la intensidad del campo magnético debe de ser de 1.56 T, que puede ser generada por un anillo de imán permanente de neodimio, para ello en este trabajo se tendría que suministrar a la bobina una intensidad de corriente que estuviera en el orden de kilo-amperes. Esto no fue posible realizar en el LAP debido a las limitaciones de potencia de la fuente de C.D., así como el diseño del reactor.

Otro factor determinante es la velocidad de las especies al centrifugar como se muestra en la Tabla 4.1 la velocidad angular tiene un incremento conforme se aumenta el campo magnético siendo mayor para el caso 1 donde se encuentran partículas de hollín llegando a 26 747 rad/s por otro lado para el caso 2 sin la interacción de las partículas de hollín alcanza una velocidad angular de 18 817 rad/s cuando se tiene la mayor intensidad del campo magnético a 0.05 T sin embargo si se alcanza un campo magnético de 1.56 T se alcanzarían velocidades de rotación aptas para la separación de masa del hidrógeno de las demás especies.

Por otro lado *Jin Myung Park* [6] habla de que cuando se aplica un campo magnético de 2 T la velocidad de rotación tiene un límite al igual que el flujo de gases de efecto invernadero que se maneja, ya que ocurre un efecto llamado construcción de columna de plasma donde la columna de plasma gira solo en un radio dado como un cuerpo rígido, generándose un frenado del efecto de centrifugación por la fricción generada entre las especies.



Por último en el estudio energético se determinó que la energía suministrada con respecto a la energía obtenida es mayor ya que para generar un mol de syngas se requieren 385.67 kJ/mol como se muestra en la Tabla 4.7 donde no se tenían partículas de hollín y la descarga de plasma tibio se llevó a 700 W, tomando un flujo molar de 0.00103 mol/s de hidrógeno y 0.000765 mol/s del monóxido de carbono tomara 115 s llegar a formar el mol del syngas, de acuerdo al estudio de poder calorífico que se muestra en la Figura 4.26 tomando en consideración solamente el syngas se tiene un poder calorífico de 0.34 kJ/s, generando 39.1 kJ en total después de los 115 s.



4.8 Referencias.

- [1] Wang Q, et al, “*Investigation of dry reforming of methane in a dielectric barrier discharge reactor*”, *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, (2009).
- [2] Yang Y, “*Methane conversion and reforming by non-thermal plasma on pins*”, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, (2002).
- [3] Indarto A, et al, “*Effect of additive gases on methane conversion using gliding arc discharge*”, *Energy*, (2006).
- [4] Xumei Tao, et al “*CO2 reforming of CH4 by combination of thermal plasma and catalyst*”, *International Journal of Hydrogen Energy*, (2008).
- [5] Minxiang Wu, Jose Pacheco, Eva Cosoroaba, Babak Fahimi, “*Multiphysics simulation of pulsed cold plasma arc rotation for enhanced hydrogen harvesting*”, The University of Texas at Dallas, international journal of hydrogen energy (2017), 1-6.
- [6] Jin Myung Park, Keun Su Kim, Tae Hyung Hwang, and Sang Hee Hong, “*Three-Dimensional Modeling of Arc Root Rotation by External Magnetic Field in Nontransferred Thermal Plasma Torches*”, *IEEE Transactions on Plasma Science*, april (2004), vol. 32, no. 2.



Capítulo 5

Conclusiones



Conclusiones

Se demostró que a través de la tecnología de plasma tibio es posible realizar el reformado de gases de efecto invernadero, tales como metano y dióxido de carbono, para obtener gases energéticos como es el syngas (hidrógeno y monóxido de carbono).

Al realizar el diagnóstico eléctrico del plasma se encontró un comportamiento del deslizamiento de la descarga que depende de la velocidad del gas dentro del reactor así como su geometría y dimensiones físicas. De acuerdo a esto, se demuestra que al incrementar el campo magnético de 0 a 0.05 T, el T_{des} disminuye de 0.7 a 0.05 milisegundos, favoreciendo el aumento de la velocidad de deslizamiento de la descarga hasta los 37 m/s.

Al calcular la fuerza de Lorentz se encontró que a una intensidad de campo magnético de 0.02 T, se obtiene la mayor fuerza que fue de 0.85 N y en consecuencia la aceleración aumenta favoreciendo la separación de especies respecto a su masa a esta intensidad de campo magnético.

Al realizar el estudio cuantitativo de las concentraciones de los gases en el punto de muestreo centro se obtuvo un porcentaje de hidrógeno de 5.6% y con una intensidad de campo magnético de 0.02 T; contrariamente, a la salida tangente que se obtuvo el 2.8% de hidrógeno. Con estos valores se demuestra la separación de especies respecto a su masa, al tener una mayor cantidad de hidrógeno en la salida centro comparado con la salida tangente.

Finalmente, se calculó el poder calorífico del syngas, obteniendo un enriquecimiento de 0.07% en la salida centro cuando se aplicó una intensidad de campo magnético de 0.02 T. Con los resultados que se presentan se demuestra que es factible el aplicar campos magnéticos transversales a una descarga de plasma para hacer centrifugar las especies que lo conforman y propiciar su separación debido a la diferencia de masa.



Trabajo Futuro

De acuerdo con los resultados mostrados en este trabajo, se recomienda incrementar la intensidad del magnético, analizar las concentraciones y velocidad de los gases de entrada que conforman el plasma todo con el objetivo de proporcionar alternativas limpias para mejorar el poder energético del syngas.



ANEXOS



Anexo A

Tabla A.1.- Características de la descarga de plasma tibio con la implementación de las dos fuentes

Número de scan	N ₂ (l/min)	CH ₄ (l/min)	Potencia (W)	Intensidad de corriente en la bobina (A)	Voltaje de descarga (V)
16	8	8	0	0	0
32	8	8	400	0	1159
54	8	8	400	1.49	1179
67	8	8	385	1.49	1200
77	8	8	370	1.50	1228
90	8	8	420	1.50	1222
100	8	8	400	0	1191
111	8	8	0	0	0

Tabla A.2.- Características de la experimentación con la implementación de la fuente de alta potencia, toma de la salida tangente.

Número de scan	N ₂ (l/min)	CH ₄ (l/min)	CO ₂ (l/min)	Potencia (W)	Campo Magnético (T)
9	5	5	5	0	0
34	5	5	5	447	0
49	5	5	5	420	0.0168
58	5	5	5	410	0.0289
71	5	5	5	420	0.0424
88	5	5	5	420	0.0568
94	5	5	5	430	0.0568
105	5	5	5	430	0.0568
116	5	5	5	430	0
125	5	5	5	0	0
135	5	5	5	0	0



Tabla A.3.- Características de la experimentación con la fuente de alta potencia conectada a la bobina, toma de la salida centro.

Número de scan	N ₂ (l/min)	CH ₄ (l/min)	CO ₂ (l/min)	Potencia (W)	Campo Magnético (T)
13	5	5	5	0	0
37	5	5	5	430	0
51	5	5	5	410	0.0168
65	5	5	5	430	0.0289
77	5	5	5	430	0.0424
84	5	5	5	430	0.0568
103	5	5	5	440	0.0568
114	5	5	5	440	0.0568
123	5	5	5	440	0
135	5	5	5	0	0
145	5	5	5	0	0

Tabla A.4.- Características de la experimentación a una potencia más elevada (650W) toma de la salida Tangente después de la limpieza del reactor.

Número de Scan	N ₂ (l/min)	CH ₄ (l/min)	CO ₂ (l/min)	Potencia (W)	Campo Magnético (T)
5	5	5	5	0	0
15	5	5	5	650	0
35	5	5	5	620	0.0168
44	5	5	5	650	0.0289
53	5	5	5	650	0.0424
61	5	5	5	650	0.0568
70	5	5	5	650	0
81	5	5	5	0	0
91	5	5	5	0	0

Tabla A.5.- Características de la experimentación a una potencia más elevada toma de la salida centro después de la limpieza del reactor.

Número de Scan	N ₂ (l/min)	CH ₄ (l/min)	CO ₂ (l/min)	Potencia (W)	Campo Magnético (T)
02	5	5	5	0	0
24	5	5	5	700	0
33	5	5	5	620	0.0168
42	5	5	5	700	0.0289
50	5	5	5	700	0.0424
58	5	5	5	700	0.0568
69	5	5	5	700	0
80	5	5	5	0	0
90	5	5	5	0	0



Anexo B

Tabla B.1. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor con carbono sólido.

Formas de onda	B (T)	P_{prom} (W)	T_{des} (ms)
	0	478.68	0.702
	0.0168	407.29	0.581
	0.0289	316.83	0.493



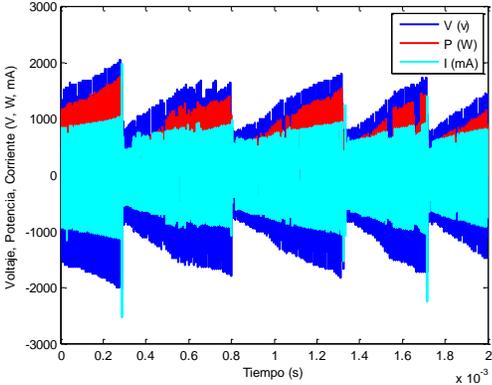
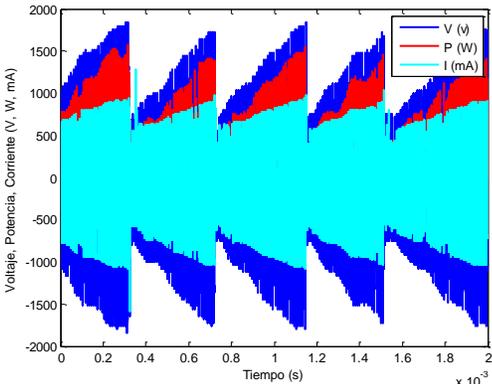
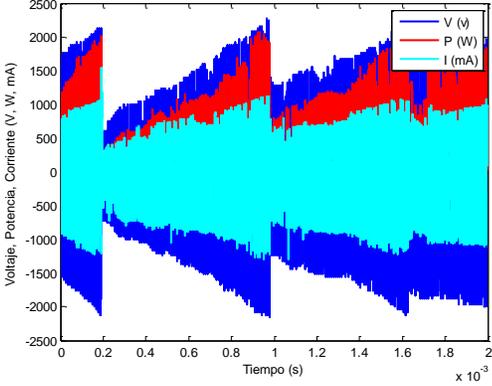
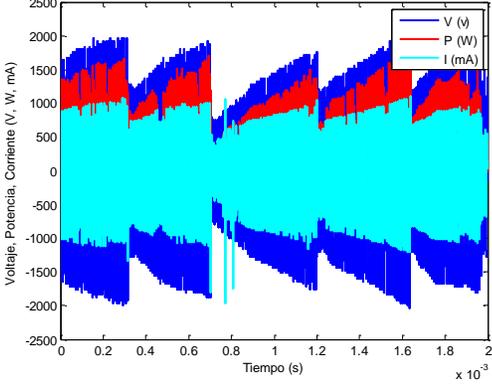
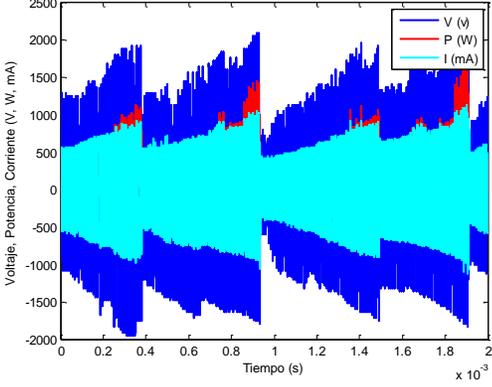
	0.0424	413.26	0.395
	0.0568	421.26	0.326



Tabla B.2. Evolución de señales eléctricas del plasma con aplicación de campo magnético durante reformado de GEI en reactor limpio.

Formas de onda	B (T)	P_{prom} (W)	T_{des} (ms)
	0	461.09	0.709
	0.0168	502.97	0.494
	0.0289	268.42	0.555



	0.0424	409.82	0.554
	0.0568	254.78	0.468



Anexo C

Tabla C.1. Cálculos del caso 1, para obtener la fuerza resultante de Lorentz

	Campo Magnético (T)	Campo Eléctrico $\left(\frac{v}{m}\right)$	Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$	Fuerza Resultante (N)	Carga (C)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
Mínimo	0	2.7×10^5	24.84	0.14	5×10^{-6}	8.37×10^5
Máximo	0	6.1×10^5	24.84	0.33	1×10^{-5}	1.9×10^6
Mínimo	0.0168	2.2×10^5	30.02	0.03	7×10^{-6}	2.29×10^5
Máximo	0.0168	4.4×10^5	30.02	0.06	9×10^{-6}	5.39×10^5
Mínimo	0.0289	2.2×10^5	35.37	0.23	7×10^{-6}	1.85×10^6
Máximo	0.0289	5.1×10^5	35.37	0.53	1×10^{-5}	4.31×10^6
Mínimo	0.0424	2×10^5	44.15	0.33	9×10^{-6}	3.33×10^6
Máximo	0.0424	3.7×10^5	44.15	0.58	1×10^{-4}	5.87×10^6
Mínimo	0.0568	1.4×10^5	53.49	0.21	6×10^{-6}	2.56×10^6
Máximo	0.0568	4.4×10^5	53.49	0.63	8×10^{-6}	7.68×10^6

Tabla C.2. Aceleración de las especies antes de activar el campo magnético.

Gases 0	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.24	3.28×10^6
C ₂ H ₂	0.4	8×10^{-6}	1.1	9×10^{-6}	0.24	3.77×10^7
CO ₂	2.9	4×10^{-5}	1.8	8×10^{-5}	0.24	3.83×10^6
CH ₄	4.4	7×10^{-5}	0.65	4×10^{-5}	0.24	7.07×10^6
H ₂	0.0015	2×10^{-7}	0.083	2×10^{-9}	0.24	1.63×10^{11}
CO	0.4	6×10^{-6}	1.14	7×10^{-6}	0.24	4.44×10^7

Tabla C.3. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0168 T.

Gases 30	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.05	8.26×10^5
C ₂ H ₂	0.585	9×10^{-6}	1.1	1×10^{-5}	0.05	8.02×10^6
CO ₂	3.0855	5×10^{-5}	1.84	9×10^{-5}	0.05	9.09×10^5
CH ₄	4.425	7×10^{-5}	0.656	4×10^{-5}	0.05	1.78×10^6
H ₂	0.003	5×10^{-7}	0.083	4×10^{-9}	0.05	2.05×10^{10}
CO	0.87	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.05	5.21×10^6



Tabla C.4. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0289 T.

Gases 60	Flujo $\frac{l}{min}$	Flujo $\frac{m^3}{s}$	Densidad $\frac{kg}{m^3}$	Flujo $\frac{kg}{s}$	Fuerza (N)	Aceleración $\frac{m}{s^2}$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.39	7.59×10^6
C ₂ H ₂	0.57	9×10^{-6}	1.1	1×10^{-5}	0.39	7.57×10^7
CO ₂	3.11	5×10^{-5}	1.84	9×10^{-5}	0.39	8.27×10^6
CH ₄	4.46	7×10^{-5}	0.656	4×10^{-5}	0.39	1.62×10^7
H ₂	0.003	5×10^{-9}	0.083	4×10^{-9}	0.39	1.89×10^{11}
CO	0.82	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.39	5.05×10^7

Tabla C.5. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0424 T.

Gases 90	Flujo $\frac{l}{min}$	Flujo $\frac{m^3}{s}$	Densidad $\frac{kg}{m^3}$	Flujo $\frac{kg}{s}$	Fuerza (N)	Aceleración $\frac{m}{s^2}$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.46	1.12×10^7
C ₂ H ₂	0.57	9×10^{-7}	1.1	1×10^{-5}	0.46	1.11×10^8
CO ₂	3.12	5×10^{-5}	1.84	9×10^{-5}	0.46	1.22×10^7
CH ₄	4.419	7×10^{-5}	0.656	4×10^{-5}	0.46	2.41×10^7
H ₂	0.003	5×10^{-8}	0.083	4×10^{-9}	0.46	2.78×10^{11}
CO	0.855	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.46	7.17×10^7

Tabla C.6. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0568 T.

Gases 120	Flujo $\frac{l}{min}$	Flujo $\frac{m^3}{s}$	Densidad $\frac{kg}{m^3}$	Flujo $\frac{kg}{s}$	Fuerza (N)	Aceleración $\frac{m}{s^2}$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.42	1.24×10^7
C ₂ H ₂	0.57	9×10^{-6}	1.1	1×10^{-5}	0.42	1.23×10^8
CO ₂	3.177	5×10^{-5}	1.84	9×10^{-5}	0.42	1.32×10^7
CH ₄	4.29	7×10^{-5}	0.656	4×10^{-5}	0.42	2.7×10^7
H ₂	0.003	5×10^{-8}	0.083	4×10^{-9}	0.42	3.07×10^{11}
CO	0.91	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.42	7.41×10^7



Tabla C.7. Cálculos del caso 2, para obtener la fuerza resultante de Lorentz.

	Campo Magnético (T)	Campo Eléctrico $\left(\frac{v}{m}\right)$	Velocidad $\left(\frac{m}{s}\right)$	Fuerza Resultante (N)	Carga (C)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
Mínimo	0	1.3×10^5	24.84	0.02	1.5×10^{-7}	1.1×10^5
Máximo	0	5.6×10^5	24.84	0.08	1.5×10^{-7}	4.7×10^5
Mínimo	0.0168	2.9×10^5	36.65	0.42	1.4×10^{-6}	3.3×10^6
Máximo	0.0168	4.4×10^5	36.65	0.63	1.4×10^{-6}	5×10^6
Mínimo	0.0289	2.9×10^5	31.74	0.47	1.5×10^{-6}	3.3×10^6
Máximo	0.0289	5.1×10^5	31.74	0.82	1.5×10^{-6}	5.8×10^6
Mínimo	0.0424	1.3×10^5	31.79	0.19	1.4×10^{-6}	1.3×10^6
Máximo	0.0424	3.8×10^5	31.79	0.54	1.4×10^{-6}	3.8×10^6
Mínimo	0.0568	2.7×10^5	37.63	0.14	5.49×10^{-7}	1.2×10^6
Máximo	0.0568	3.8×10^5	37.63	0.21	5.49×10^{-7}	1.7×10^6

Tabla C.8. Aceleración de las especies antes de activar el campo magnético.

Gases 0	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.05	6.77×10^5
C ₂ H ₂	0.37	6×10^{-6}	1.1	6×10^{-6}	0.05	1.03×10^7
CO ₂	3.37	5×10^{-5}	1.8	1×10^{-4}	0.05	6.81×10^5
CH ₄	4.24	7×10^{-5}	0.65	4×10^{-5}	0.05	1.52×10^6
H ₂	0.32	5×10^{-6}	0.083	4×10^{-7}	0.05	1.56×10^8
CO	0.618	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.05	6.01×10^6

Tabla C.9. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0168 T.

Gases 30	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.53	1.03×10^7
C ₂ H ₂	0.39	6×10^{-6}	1.1	7×10^{-6}	0.53	1.48×10^8
CO ₂	3.28	5×10^{-5}	1.8	1×10^{-4}	0.53	1.06×10^7
CH ₄	3.97	6×10^{-5}	0.65	4×10^{-5}	0.53	2.47×10^7
H ₂	0.45	7×10^{-6}	0.083	6×10^{-7}	0.53	1.68×10^9
CO	0.69	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.53	8.17×10^7



Tabla C.10. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0289 T.

Gases 60	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.65	1.12×10^7
C ₂ H ₂	0.39	6×10^{-6}	1.1	7×10^{-6}	0.65	1.64×10^8
CO ₂	3.3	5×10^{-5}	1.8	1×10^{-4}	0.65	1.16×10^7
CH ₄	4	6×10^{-5}	0.65	4×10^{-5}	0.65	2.68×10^7
H ₂	0.43	7×10^{-6}	0.083	6×10^{-7}	0.65	1.95×10^9
CO	0.69	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.65	8.89×10^7

Tabla C.11. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0424 T.

Gases 90	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.37	6.41×10^6
C ₂ H ₂	0.38	6×10^{-6}	1.1	7×10^{-6}	0.37	9.49×10^7
CO ₂	3.18	5×10^{-5}	1.8	9×10^{-5}	0.37	6.84×10^6
CH ₄	4.15	6×10^{-6}	0.65	4×10^{-5}	0.37	1.47×10^7
H ₂	0.39	6×10^{-6}	0.083	5×10^{-7}	0.37	1.20×10^9
CO	0.72	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.37	4.87×10^7

Tabla C.12. Aceleración de las especies con un campo magnético de 0.0568 T.

Gases 120	Flujo $\left(\frac{l}{min}\right)$	Flujo $\left(\frac{m^3}{s}\right)$	Densidad $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Flujo $\left(\frac{kg}{s}\right)$	Fuerza (N)	Aceleración $\left(\frac{m}{s^2}\right)$
N ₂	5	8×10^{-5}	1.25	1×10^{-4}	0.18	3.69×10^6
C ₂ H ₂	0.37	6×10^{-6}	1.1	6×10^{-6}	0.18	5.53×10^7
CO ₂	3.41	5×10^{-5}	1.8	1×10^{-5}	0.18	3.67×10^6
CH ₄	3.90	6×10^{-5}	0.65	4×10^{-5}	0.18	9.01×10^6
H ₂	0.39	6×10^{-6}	0.083	5×10^{-7}	0.18	7.06×10^8
CO	0.74	1×10^{-5}	1.14	1×10^{-5}	0.18	2.7×10^7



Anexo D

Tabla D.1. Flujo promedio en (mol/s) del H₂ del caso 1

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	10-52	0.003	3.06 × 10 ⁻⁶	0.0838	4.27 × 10 ⁻⁹	2.13 × 10 ⁻⁶
0.0168	53-67	0.002	2.6 × 10 ⁻⁶	0.0838	3.63 × 10 ⁻⁹	1.81 × 10 ⁻⁶
0.0289	68-82	0.003	3.4 × 10 ⁻⁶	0.0838	4.74 × 10 ⁻⁹	2.37 × 10 ⁻⁶
0.0424	83-96	0.003	3.1 × 10 ⁻⁶	0.0838	4.33 × 10 ⁻⁹	2.17 × 10 ⁻⁶
0.0568	97-110	0.002	3.78 × 10 ⁻⁶	0.0838	3.89 × 10 ⁻⁹	1.94 × 10 ⁻⁶

Tabla D.2. Flujo promedio en (mol/s) del CO del caso 1.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	10-52	0.97	9.7 × 10 ⁻⁴	1.14	1.85 × 10 ⁻⁵	6.6 × 10 ⁻⁴
0.0168	53-67	0.86	8.6 × 10 ⁻⁴	1.14	1.63 × 10 ⁻⁵	5.8 × 10 ⁻⁴
0.0289	68-82	0.85	8.5 × 10 ⁻⁴	1.14	1.62 × 10 ⁻⁵	5.7 × 10 ⁻⁴
0.0424	83-96	0.88	8.8 × 10 ⁻⁴	1.14	1.67 × 10 ⁻⁵	5.9 × 10 ⁻⁴
0.0568	97-110	0.86	8.6 × 10 ⁻⁴	1.14	1.65 × 10 ⁻⁵	5.9 × 10 ⁻⁴

Tabla D.3. Flujo promedio en (mol/s) del CH₄ del caso 1.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	10-52	4.34	4.3 × 10 ⁻³	0.656	4.74 × 10 ⁻⁵	2.96 × 10 ⁻³
0.0168	53-67	4.41	4.4 × 10 ⁻³	0.656	4.82 × 10 ⁻⁵	3.01 × 10 ⁻³
0.0289	68-82	4.43	4.4 × 10 ⁻³	0.656	4.84 × 10 ⁻⁵	3.02 × 10 ⁻³
0.0424	83-96	4.44	4.4 × 10 ⁻³	0.656	4.86 × 10 ⁻⁵	3.03 × 10 ⁻³
0.0568	97-110	4.41	4.4 × 10 ⁻³	0.656	4.82 × 10 ⁻⁵	3.01 × 10 ⁻³

Tabla D.4. Flujo promedio en (mol/s) del C₂H₂ del caso 1.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	10-52	0.55	9.24 × 10 ⁻⁶	1.1	1.01 × 10 ⁻⁵	7.26 × 10 ⁻³
0.0168	53-67	0.53	8.85 × 10 ⁻⁶	1.1	9.73 × 10 ⁻⁶	6.95 × 10 ⁻³
0.0289	68-82	0.52	8.78 × 10 ⁻⁶	1.1	9.66 × 10 ⁻⁶	6.9 × 10 ⁻³
0.0424	83-96	0.53	8.89 × 10 ⁻⁶	1.1	9.78 × 10 ⁻⁶	6.98 × 10 ⁻³
0.0568	97-110	0.52	8.69 × 10 ⁻⁶	1.1	9.56 × 10 ⁻⁶	6.83 × 10 ⁻³



Tabla D.5. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 1.

Campo Magnético (T)	Scans	Poder Calorífico _{H₂} (kJ/s)	Poder Calorífico _{CO} (kJ/s)	Poder Calorífico _{CH₄} (kJ/s)	Poder Calorífico _{C₂H₂} (kJ/s)
0	10-52	5.1×10^{-4}	0.187	2.382	0.872
0.0168	53-67	4.3×10^{-4}	0.165	2.41	0.835
0.0289	68-82	5.7×10^{-4}	0.164	2.43	0.829
0.0424	83-96	5.2×10^{-4}	0.169	2.43	0.839
0.0568	97-110	4.7×10^{-4}	0.167	2.42	0.820

Tabla D.6. Flujo promedio en (mol/s) del H₂ del caso 2 en el punto de muestreo tangente.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	0.47	4.7×10^{-4}	0.0838	6.58×10^{-7}	3.29×10^{-4}
0.0168	35-43	0.43	4.3×10^{-4}	0.0838	6.01×10^{-7}	3×10^{-4}
0.0289	44-52	0.41	4.1×10^{-4}	0.0838	5.84×10^{-7}	2.92×10^{-4}
0.0424	53-60	0.4	4×10^{-4}	0.0838	5.71×10^{-7}	2.85×10^{-4}
0.0568	61-69	0.4	4×10^{-4}	0.0838	5.66×10^{-7}	2.83×10^{-4}

Tabla D.7. Flujo promedio en (mol/s) del CO del caso 2 en el punto de muestreo tangente.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	0.75	7.53×10^{-4}	1.14	1.43×10^{-5}	5.11×10^{-4}
0.0168	35-43	0.70	7.08×10^{-4}	1.14	1.34×10^{-5}	4.8×10^{-4}
0.0289	44-52	0.71	7.18×10^{-4}	1.14	1.36×10^{-5}	4.87×10^{-4}
0.0424	53-60	0.67	6.75×10^{-4}	1.14	1.28×10^{-5}	4.58×10^{-4}
0.0568	61-69	0.64	6.45×10^{-4}	1.14	1.22×10^{-5}	4.38×10^{-4}

Tabla D.8. Flujo promedio en (mol/s) del CH₄ del caso 2 en el punto de muestreo tangente.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	3.95	3.95×10^{-3}	0.656	4.32×10^{-5}	2.70×10^{-3}
0.0168	35-43	3.97	3.97×10^{-3}	0.656	4.34×10^{-5}	2.71×10^{-3}
0.0289	44-52	3.99	3.99×10^{-3}	0.656	4.36×10^{-5}	2.72×10^{-3}
0.0424	53-60	4.06	4.06×10^{-3}	0.656	4.44×10^{-5}	2.77×10^{-3}
0.0568	61-69	4.04	4.04×10^{-3}	0.656	4.42×10^{-5}	2.76×10^{-3}



Tabla D.9. Flujo promedio en (mol/s) del C₂H₂ del caso 2 en el punto de muestreo tangente.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	0.41	9.24 × 10 ⁻⁶	1.1	7.52 × 10 ⁻⁶	5.37 × 10 ⁻⁴
0.0168	35-43	0.40	8.85 × 10 ⁻⁶	1.1	7.41 × 10 ⁻⁶	5.29 × 10 ⁻⁴
0.0289	44-52	0.40	8.78 × 10 ⁻⁶	1.1	7.33 × 10 ⁻⁶	5.24 × 10 ⁻⁴
0.0424	53-60	0.38	8.89 × 10 ⁻⁶	1.1	7.07 × 10 ⁻⁶	5.05 × 10 ⁻⁴
0.0568	61-69	0.37	8.69 × 10 ⁻⁶	1.1	6.81 × 10 ⁻⁶	4.87 × 10 ⁻⁴

Tabla D.10. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 2, del muestreo tangencial.

Campo Magnético (T)	Scans	Poder Calorífico _{H₂} (kJ/s)	Poder Calorífico _{CO} (kJ/s)	Poder Calorífico _{CH₄} (kJ/s)	Poder Calorífico _{C₂H₂} (kJ/s)
0	10-52	7.9 × 10 ⁻²	0.145	2.17	0.64
0.0168	53-67	7.2 × 10 ⁻²	0.136	2.17	0.63
0.0289	68-82	7 × 10 ⁻²	0.138	2.19	0.62
0.0424	83-96	6.9 × 10 ⁻²	0.130	2.22	0.60
0.0568	97-110	6.8 × 10 ⁻²	0.124	2.21	0.58

Tabla D.11. Flujo promedio en (mol/s) del H₂ del caso 2 en el punto de muestreo centro.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	0.86	8.6 × 10 ⁻⁴	0.0838	1.2 × 10 ⁻⁶	6 × 10 ⁻⁴
0.0168	35-43	0.82	8.2 × 10 ⁻⁴	0.0838	1.15 × 10 ⁻⁶	5.7 × 10 ⁻⁴
0.0289	44-52	0.82	8.2 × 10 ⁻⁴	0.0838	1.15 × 10 ⁻⁶	5.7 × 10 ⁻⁴
0.0424	53-60	0.83	0.83 × 10 ⁻⁴	0.0838	1.15 × 10 ⁻⁶	5.7 × 10 ⁻⁴
0.0568	61-69	0.82	0.82 × 10 ⁻⁴	0.0838	1.15 × 10 ⁻⁶	5.7 × 10 ⁻⁴

Tabla D.12. Flujo promedio en (mol/s) del CO del caso 2 en el punto de muestreo centro.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	1.11	1.1 × 10 ⁻³	1.14	2.11 × 10 ⁻⁵	7.5 × 10 ⁻⁴
0.0168	35-43	1.07	1 × 10 ⁻³	1.14	2.03 × 10 ⁻⁵	7.26 × 10 ⁻⁴
0.0289	44-52	1.06	1 × 10 ⁻³	1.14	2.02 × 10 ⁻⁵	7.22 × 10 ⁻⁴
0.0424	53-60	1.06	1 × 10 ⁻³	1.14	2.02 × 10 ⁻⁵	7.21 × 10 ⁻⁴
0.0568	61-69	1.06	1 × 10 ⁻³	1.14	2.01 × 10 ⁻⁵	7.2 × 10 ⁻⁴



Tabla D.13. Flujo promedio en (mol/s) del CH₄ del caso 2 en el punto de muestreo centro.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	3.47	3.4 × 10 ⁻³	0.656	3.79 × 10 ⁻⁵	2.37 × 10 ⁻³
0.0168	35-43	3.5	3.5 × 10 ⁻³	0.656	3.83 × 10 ⁻⁵	2.39 × 10 ⁻³
0.0289	44-52	3.49	3.49 × 10 ⁻³	0.656	3.81 × 10 ⁻⁵	2.38 × 10 ⁻³
0.0424	53-60	3.5	3.5 × 10 ⁻³	0.656	3.83 × 10 ⁻⁵	2.39 × 10 ⁻³
0.0568	61-69	3.47	3.47 × 10 ⁻³	0.656	3.8 × 10 ⁻⁵	2.37 × 10 ⁻³

Tabla D.14. Flujo promedio en (mol/s) del C₂H₂ del caso 2 en el punto de muestreo centro.

Campo Magnético (T)	Scans	Flujo (l/min)	Flujo (m ³ /s)	Densidad (kg/m ³)	Flujo (kg/s)	Flujo (mol/s)
0	15-34	0.49	4.97 × 10 ⁻⁴	1.1	9.12 × 10 ⁻⁶	6.5 × 10 ⁻⁴
0.0168	35-43	0.495	4.95 × 10 ⁻⁴	1.1	9.08 × 10 ⁻⁶	6.4 × 10 ⁻⁴
0.0289	44-52	0.496	4.96 × 10 ⁻⁴	1.1	9.1 × 10 ⁻⁶	6.5 × 10 ⁻⁴
0.0424	53-60	0.492	4.92 × 10 ⁻⁴	1.1	9.03 × 10 ⁻⁶	6.45 × 10 ⁻⁴
0.0568	61-69	0.494	4.94 × 10 ⁻⁴	1.1	9.06 × 10 ⁻⁶	6.47 × 10 ⁻⁴

Tabla D.15. Poder Calorífico (kJ/s) de las especies del caso 2, del muestreo centro.

Campo Magnético (T)	Scans	Poder Calorífico _{H₂} (kJ/s)	Poder Calorífico _{CO} (kJ/s)	Poder Calorífico _{CH₄} (kJ/s)	Poder Calorífico _{C₂H₂} (kJ/s)
0	10-52	0.145	0.214	1.90	0.783
0.0168	53-67	0.139	0.206	1.92	0.779
0.0289	68-82	0.140	0.205	1.91	0.781
0.0424	83-96	0.140	0.204	1.92	0.774
0.0568	97-110	0.139	0.204	1.9	0.778