

**ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE  
OBTENCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS (SYNGAS) POR MEDIO DE ARCO  
ELECTRICO, A PARTIR DE LA GLICERINA RESIDUAL DE LA PRODUCCION  
DE BODIESEL, IMPLEMENTANDO METODOLOGIA IDEFO**

**FERNANDO MONTAÑEZ VILLAMIZAR  
DIEGO FERNANDO MOTTA NIETO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2012**

**ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE  
OBTENCIÓN DE GAS DE SINTESIS (SYNGAS) POR MEDIO DE ARCO  
ELECTRICO, A PARTIR DE LA GLICERINA RESIDUAL DE LA PRODUCCION  
DE BIODIESEL, IMPLEMENTANDO METODOLOGIA IDEFO**

**FERNANDO MONTAÑEZ VILLAMIZAR  
DIEGO FERNANDO MOTTA NIETO**

**Trabajo de grado para optar por el título de  
Ingeniero Electricista**

**Director  
Dr. Gilberto Carrillo Caicedo**

**Codirectores  
Dr. Fernando Martínez Ortega  
MPE. Julio César Chacón Velasco  
Dr. Hermman Raúl Vargas Torres**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECHANICAS  
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA, ELECTRONICA Y DE  
TELECOMUNICACIONES  
BUCARAMANGA  
2012**

## **AGRADECIMIENTOS**

Solo sabría agradecer a ese Ser que es la causa primordial que sostiene este Universo y en cuya infinita sabiduría están contenidas todas las cosas que son. Por tanto sólo en esta causa está la verdadera razón de que cualquier empresa que emprendamos llegue a buen término y sólo de Él es el conocimiento de sus implicaciones, a nosotros solo nos queda agradecer que su voluntad nos sostenga y confiar en que todas las cosas que son y ocurren en este mundo, por su infinito conocimiento del tiempo y el espacio son para bien.

Agradecería también a aquel hipotético lector que de alguna manera encuentre interés en el trabajo realizado y que más aún se tome la molestia de leer estas líneas que en últimas sólo reflejan fútilmente una pequeña parte de la personalidad del autor.

Gracias por su interés, o curiosidad.

***Fernando Montañez Villamizar***

## **AGRADECIMIENTOS**

Debemos reiterar nuestro agradecimiento y destacar las importantes contribuciones de los profesores: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo, Dr. Fernando Martínez Ortega, MPE. Julio César Chacón Velasco, Dr. Hermann Raúl, Vargas Torres, Dra. Elena E. Stashenko, Dra. Marianny Yajaira Combariza, Dra. Martha Eugenia Niño y ME (C) Carlos Fernando Díaz Meza, entre otros; sin cuyos aportes no se hubiera podido llevar a cabo este trabajo.

A cada miembro de mi familia, entre ellos mamá, papá, hermano y abuela; que brindaron su apoyo incondicional para la culminación del presente trabajo, mi más profundo agradecimiento. Finalmente a aquellos amigos y allegados que colaboraron de distinta manera en esta empresa, mi más sincero agradecimiento.

***Diego Fernando Motta Nieto***

## DEDICATORIA

Este trabajo de grado está dedicado a la humanidad pues es en su beneficio que estuvimos alentados a realizar el mismo, enfocados en aportar un poco en el mejoramiento de la manera como suplimos una de nuestras necesidades más básicas: la energía; en el camino de construir una sociedad con un desarrollo realmente sostenible.

***Fernando Montañez Villamizar***

## DEDICATORIA

Estas líneas condensan un valioso esfuerzo, que quizás no hubiera sido posible culminar sin esa idea, ese objetivo vital que deberá cristalizar con el correr del tiempo o perecer en el intento. Es en función de la humanidad, y sólo de ésta, en que todo ello se inscribe.

***Diego Fernando Motta Nieto***

# TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>25</b>
<b>1. FORMULACIÓN/DECLARACIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>26</b>
<b>2. OBJETIVO GENERAL.....</b>	<b>30</b>
<b>3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....</b>	<b>30</b>
<b>4 ANTECEDENTES .....</b>	<b>31</b>
<b>5 MARCO REFERENCIAL.....</b>	<b>32</b>
5.1 SUSTANCIAS INVOLUCRADAS EN LA INVESTIGACIÓN .....	32
5.1.1 <i>El Biodiesel</i> .....	32
5.1.1.1 <b>Composición del Biodiesel</b> .....	32
5.1.1.2 <b>Obtención del Biodiesel</b> .....	33
5.1.1.3 <b>Ventajas y desventajas del biodiesel como combustible</b> .....	34
5.1.2 <i>La Glicerina</i> .....	35
5.1.3 <i>El Syngas</i> .....	36
5.1.4.1 <b>Obtención de Syngas por medios químicos</b> .....	36
5.1.4.2 <b>Obtención de syngas por arco eléctrico</b> .....	37
5.2 EL PLASMA.....	38
5.3 FÍSICA DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE PLASMA POR ARCO ELÉCTRICO .....	40
5.3.1 <i>Procesos de ionización</i> .....	40
5.3.1.1 <b>Partículas cargadas elementales en el plasma</b> .....	41
5.3.1.2 <b>Colisiones elásticas e inelásticas</b> .....	42
5.3.1.3 <b>Clasificación de los procesos de ionización</b> .....	43
5.3.2 <i>Generación del arco eléctrico</i> .....	45
5.3.3 <i>Capas anódicas y catódicas de las descargas eléctricas</i> .....	46
5.3.4 <i>Puntos calientes catódicos</i> .....	50
5.3.5 <i>Ruptura de líquidos por arco eléctrico</i> .....	51
5.3.6 <i>Mecanismo de rompimiento dieléctrico para medios líquidos con partículas sólidas suspendidas</i> ...	52
5.3.7 <i>Mecanismo de rompimiento dieléctrico para medios líquidos con presencia de cavidades por gases disueltos</i> 55	
5.3.8 <i>Factores que influyen en el rompimiento eléctrico de líquidos</i> .....	56
5.3.8.1 <b>Influencia de la frecuencia y forma de la señal de tensión</b> .....	57
5.3.8.2 <b>Influencia de la polaridad de los pulsos de tensión</b> .....	69

5.3.8.3	Influencia de la distancia inter-electrodos .....	72
5.3.8.4	Influencia del área de los electrodos .....	76
5.3.8.5	Influencia de la naturaleza química de los líquidos .....	77
5.4	QUÍMICA DEL PROCESO ESTUDIADO .....	79
5.5	METODOLOGÍA IDEF0 .....	83
5.5.1	Concepto de modelo .....	84
5.5.2	Componentes de modelado IDEF0 .....	84
5.6	ELECTRÓNICA ASOCIADA .....	88
5.6.1	Conexión Darlington .....	88
5.6.2	El Optoacoplador .....	89
5.7	ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE TRANSFORMADORES .....	91
<b>6</b>	<b>DISEÑO METODOLÓGICO .....</b>	<b>93</b>
6.1	DESARROLLO EXPERIMENTAL .....	97
6.2	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS .....	98
6.3	HIPÓTESIS PROPUESTAS .....	98
6.3.1	Hipótesis general .....	99
6.3.2	Hipótesis derivadas .....	99
6.4	TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS .....	99
6.5	CONTEXTO DEL EXPERIMENTO GENERAL .....	100
6.5.1	Variables de interés .....	100
6.5.2	Protocolo de Experimentos .....	102
6.5.3	Cuantificación del Syngas generado .....	102
6.5.4	Materiales y equipos utilizados .....	103
6.5.5	Variables controladas .....	104
6.5.6	Procedimiento .....	104
6.5.7	Criterio de selección de equipos .....	107
6.5.8	Diseño del sistema eléctrico propuesto .....	108
6.5.9	Diseño del reactor .....	119
6.5.10	Diseño de los electrodos .....	121
6.5.11	Sistema de sellado y aislamiento .....	124
<b>7</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO .....</b>	<b>125</b>
7.1	SIMULACIÓN ELÉCTRICA DEL PROCESO .....	125
7.2	PRUEBAS PRELIMINARES .....	130

7.2.1	<i>Determinación de la respuesta eléctrica de la muestra</i> .....	130
7.2.1.1	<b>Ensayos realizados</b> .....	133
7.2.1.2	<b>Análisis de los resultados del experimento</b> .....	137
7.2.2	<i>Caracterización del transformador elevador de tensión utilizado</i> .....	141
7.3	<b>EXPERIMENTO GENERAL</b> .....	145
7.3.1	<i>Experimentación con glicerina de alta pureza</i> .....	149
7.3.2	<i>Experimentación con glicerina cruda</i> .....	152
7.4	<b>MAPA DEL PROCESO EN IDEF0</b> .....	169
	<b>CONCLUSIONES</b> .....	175
	<b>RECOMENDACIONES</b> .....	177
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> .....	178
	<b>GLOSARIO</b> .....	182
	<b>ANEXOS</b> .....	184

## LISTA DE TABLAS

<b>TABLA 1.</b> PARÁMETROS DE DESCARGA TÍPICOS PARA DIVERSOS TIPOS DE PLASMA.....	46
<b>TABLA 2.</b> FUERZA ELÉCTRICA DE ALGUNOS LÍQUIDOS ALTAMENTE PURIFICADOS.....	51
<b>TABLA 3.</b> VALORES EXPERIMENTALES DE COEFICIENTES UTILIZADOS EN EL MODELO DE CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA DIELECTRICA( $E_{BR}$ ) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE DURACIÓN DEL PULSO ELÉCTRICO (T), LA SEPARACIÓN (D) Y EL TIPO DE ELECTRODOS.....	61
<b>TABLA 4.</b> VALORES DEL COEFICIENTE DE PULSO K PARA ELECTRODOS AISLADOS POR UN ACEITE DE TRANSFORMADOR. ....	66
<b>TABLA 5.</b> EFECTO DE LA POLARIDAD EN LA RUPTURA ELÉCTRICA INICIADA EN VARIOS LÍQUIDOS PARA UN SISTEMA DE ELECTRODOS PUNTA—PLANO Y UNA TEMPERATURA AMBIENTE DE $T=293K$ . ....	72
<b>TABLA 6.</b> INFLUENCIA DE LA NATURALEZA QUÍMICA DE LOS LÍQUIDOS EN LAS CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y RIGIDEZ DIELECTRICA DE ÉSTOS, EN CONDICIONES DE RUPTURA DIELECTRICA CON ELECTRODOS PUNTA PLACA (+T -P Y -T +P) BAJO PULSOS DE TENSIÓN DE LA FORMA $1.2/50 \mu S^*$ .....	77
<b>TABLA 7.</b> TIPOS DE REACCIONES PLASMA-QUÍMICAS MÁS COMUNES. ....	80
<b>TABLA 8.</b> VELOCIDAD DE REACCIÓN TÍPICA PARA REACTORES DE DESCARGA ELÉCTRICA EN FASE LÍQUIDA.....	82
<b>TABLA 9.</b> RELACIÓN ENTRE FUNCIÓN EN EL MODELO Y UBICACIÓN EN EL DIAGRAMA IDEFO. ....	85
<b>TABLA 10.</b> EQUIPOS EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS REALIZADOS. ....	103
<b>TABLA 11.</b> ENSAYO SOBRE ACEITE AISLANTE DIELECTRICO: TENSIÓN REGISTRADA EN EL INDICADOR LED ACOPLADO AL CHISPÓMETRO.....	134
<b>TABLA 12.</b> ENSAYO SOBRE ACEITE AISLANTE DIELECTRICO: LECTURAS REGISTRADAS EN MULTÍMETRO POR BAJA TENSIÓN Y EN EL MEDIDOR ANÁLOGO PROPIO DEL CHISPÓMETRO POR ALTA TENSIÓN. ....	134
<b>TABLA 13.</b> ENSAYO SOBRE MUESTRA DE GLICEROL REMANENTE DEL BIODIESEL: LECTURAS DE LA TENSIÓN DE DISRUPCIÓN REGISTRADAS POR EL MEDIDOR ANALÓGICO DEL CHISPÓMETRO Y DE LA CORRIENTE DE DISRUPCIÓN REGISTRADA POR UN AMPERÍMETRO DIGITAL CONECTADO AL CHISPÓMETRO.....	135
<b>TABLA 14.</b> ENSAYO SOBRE MUESTRA DE GLICEROL CRUDO: LECTURAS DE LA TENSIÓN DE DISRUPCIÓN REGISTRADAS POR EL MEDIDOR ANALÓGICO DEL CHISPÓMETRO Y DE LA	

CORRIENTE DE DISRUPCIÓN REGISTRADA POR UN AMPERÍMETRO DIGITAL CONECTADO AL CHISPÓMETRO.....	136
<b>TABLA 15.</b> ENSAYO SOBRE SEGUNDA MUESTRA DE GLICEROL DE ALTA PUREZA: LECTURAS DE LA TENSIÓN DE DISRUPCIÓN REGISTRADAS POR EL MEDIDOR ANALÓGICO DEL CHISPÓMETRO Y DE LA TENSIÓN DE DISRUPCIÓN REGISTRADA POR UN OSCILOSCOPIO DIGITAL FLUKE CONECTADO AL CHISPÓMETRO.....	136
<b>TABLA 16.</b> ENSAYO SOBRE MUESTRA DE GLICEROL DE ALTA PUREZA CALIDAD USP: LECTURAS DE LA TENSIÓN DE DISRUPCIÓN REGISTRADAS POR EL MEDIDOR ANALÓGICO DEL CHISPÓMETRO Y DE LA TENSIÓN DE DISRUPCIÓN REGISTRADA POR UN OSCILOSCOPIO DIGITAL FLUKE CONECTADO AL CHISPÓMETRO. ....	137
<b>TABLA 17.</b> RESULTADOS DE MEDICIONES EN ENSAYOS DE VACÍO DE LA BOBINA DE IGNICIÓN. ....	143
<b>TABLA 18.</b> VALORES TÍPICOS DE IMPEDANCIAS PARA BOBINAS DE IGNICIÓN COMERCIALES. PARA TODOS LOS CIRCUITOS CP= 1 $\mu$ F; CI =40PF; CS= 10PF; LSP=25NH. ....	144
<b>TABLA 19.</b> TRATAMIENTOS ESTUDIADOS EN EL EXPERIMENTO CON GLICERINA DE ALTA PUREZA.....	149
<b>TABLA 20.</b> RESULTADOS PROMEDIO DE ENSAYOS PARA GLICERINA DE ALTA PUREZA Y TRATAMIENTO A. ....	150
<b>TABLA 21.</b> RESULTADOS PROMEDIO DE ENSAYOS PARA GLICERINA DE ALTA PUREZA Y TRATAMIENTO B.....	151
<b>TABLA 22.</b> RESULTADOS PROMEDIO DE ENSAYOS PARA GLICERINA DE ALTA PUREZA Y TRATAMIENTO C. ....	151
<b>TABLA 23.</b> RESULTADOS PROMEDIO DE ENSAYOS PARA GLICERINA DE ALTA PUREZA Y TRATAMIENTO D.....	152
<b>TABLA 24.</b> TRATAMIENTOS ESTUDIADOS EN EL EXPERIMENTO CON GLICERINA CRUDA. ...	153
<b>TABLA 25.</b> CARACTERÍSTICAS DE LAS PIEZAS EMPLEADAS EN EL REACTOR. ....	157
<b>TABLA 26.</b> CARACTERÍSTICAS DE LAS PIEZAS EMPLEADAS EN EL REACTOR (2).....	158
<b>TABLA 27.</b> RESULTADOS PROMEDIO DEL EXPERIMENTO PARA EL TRATAMIENTO A. ....	161
<b>TABLA 28.</b> RESULTADOS PROMEDIO DEL EXPERIMENTO PARA EL TRATAMIENTO B. ....	162
<b>TABLA 29.</b> COSTOS DE PRODUCCIÓN Y PRECIOS COMERCIALES DEL PRODUCTO PARA LOS ESCENARIOS PLANTEADOS.....	164
<b>TABLA 30.</b> COSTOS Y EFICIENCIAS PARA EL PROCESO EN EL TRATAMIENTO A PROMEDIO EN ESCENARIO ECONÓMICO I.....	165

<b>TABLA 31.</b> COSTOS Y EFICIENCIAS PARA EL PROCESO EN EL TRATAMIENTO B PROMEDIO EN ESCENARIO ECONÓMICO I.....	165
<b>TABLA 32.</b> COSTOS Y EFICIENCIAS PARA EL PROCESO EN EL TRATAMIENTO A PROMEDIO EN ESCENARIO ECONÓMICO 2. *TENIENDO EN CUENTA EL PRECIO DEL HIDRÓGENO GASEOSO.....	166
<b>TABLA 33.</b> COSTOS Y EFICIENCIAS PARA EL PROCESO EN EL TRATAMIENTO B PROMEDIO EN ESCENARIO ECONÓMICO 2. *TENIENDO EN CUENTA EL PRECIO DEL HIDRÓGENO GASEOSO.....	166
<b>TABLA 34.</b> COSTOS Y EFICIENCIAS PARA EL PROCESO EN EL TRATAMIENTO A PROMEDIO EN ESCENARIO ECONÓMICO 3. *TENIENDO EN CUENTA EL PRECIO DEL HIDRÓGENO GASEOSO.....	167
<b>TABLA 35.</b> COSTOS Y EFICIENCIAS PARA EL PROCESO EN EL TRATAMIENTO B PROMEDIO EN ESCENARIO ECONÓMICO 3. *TENIENDO EN CUENTA EL PRECIO DEL HIDRÓGENO GASEOSO.....	167

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1.</b> PRECIOS DE LA GLICERINA EN MERCADOS DE USA Y EUROPA ENTRE 1995 Y 2005.	27
<b>FIGURA 2.</b> CANTIDAD DE GLICERINA PRODUCIDA EN EUROPA ENTRE 1995 Y 2005. ....	28
<b>FIGURA 3.</b> CANTIDAD DE GLICERINA PRODUCIDA EN USA ENTRE 1995 Y 2005. ....	28
<b>FIGURA 4.</b> LA REACCIÓN DE TRANSESTERIFICACIÓN. R1, R2 Y R3 SON MEZCLAS DE CADENAS DE VARIOS ÁCIDOS GRASOS. ....	33
<b>FIGURA 5.</b> REPRESENTACIÓN MOLECULAR DE LA GLICERINA. ....	35
<b>FIGURA 6.</b> GASTO ENERGÉTICO DE LA PRODUCCIÓN DE SYNGAS DURANTE LA CONVERSIÓN POR PLASMA DEL KEROSENO, COMO FUNCIÓN DE LA ENTRADA ESPECIFICA DE ENERGÍA EN EL SISTEMA. ....	38
<b>FIGURA 7.</b> TÍPICA COLISIÓN COULÓMBICA DE PARTÍCULAS CARGADAS. ....	44
<b>FIGURA 8.</b> DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES, TEMPERATURA Y CAMPO ELÉCTRICO; DESDE EL CÁTODO HASTA EL ÁNODO EN UN ARCO ELÉCTRICO. ....	48
<b>FIGURA 9.</b> DISTRIBUCIÓN TÍPICA DE DENSIDAD DE CARGA, CORRIENTE ELÉCTRICA Y CAMPO ELÉCTRICO EN LA CAPA CATÓDICA DE UNA DESCARGA POR ARCO ELÉCTRICO. ....	49
<b>FIGURA 10.</b> RELACIÓN ENTRE EL CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA DIELECTRICA ( $E_{AV,BR}$ ) Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PORCENTUAL ( $\Sigma\%$ ), EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE DURACIÓN DEL PULSO ELÉCTRICO DE ROMPIMIENTO ( $T$ )*. ....	58
<b>FIGURA 11.</b> RELACIÓN ENTRE EL CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA DIELECTRICA ( $E_{AV,BR}$ ) Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PORCENTUAL ( $\Sigma\%$ ) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE DURACIÓN DEL PULSO ELÉCTRICO DE ROMPIMIENTO ( $T$ )*. ....	59
<b>FIGURA 12.</b> RELACIÓN ENTRE EL CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA DIELECTRICA ( $E_{AV,BR}$ ) Y LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR PORCENTUAL ( $\Sigma\%$ ) EN FUNCIÓN DEL TIEMPO DE DURACIÓN DEL PULSO ELÉCTRICO DE ROMPIMIENTO ( $T$ )*. ....	60
<b>FIGURA 13.</b> RELACIÓN DE $E_{BR}$ VS. $T$ PARA AGUA TRATADA (RESISTIVIDAD ELÉCTRICA: $P=10^6\Omega\cdot CM$ ) EN UN CAMPO UNIFORME.*. ....	64
<b>FIGURA 14.</b> CARACTERÍSTICA TENSIÓN DE RUPTURA-TIEMPO DE DURACIÓN DE PULSO, EN UN ACEITE DE TRANSFORMADOR PARA DISTANCIAS INTER-ELECTRODOS DE $D=5$ CM (1), $D=15$ CM (2) Y $D=25$ CM (3). ....	65
<b>FIGURA 15.</b> RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA ( $U_{BR}$ ) Y LA FRECUENCIA DE LA TENSIÓN AC (F), APLICADA A LOS ELECTRODOS TIPO PUNTA-PLANO EN UN MEDIO LÍQUIDO DE PERFLUOROHEXANO PARA UNA DISTANCIA INTER-ELECTRODOS DE 1.9MM. ....	67

<b>FIGURA 16.</b> RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DE RUPTURA DIELECTRICA ( $U_{BR}$ ) Y LA FRECUENCIA ELÉCTRICA DE LA TENSIÓN AC ( $F$ ).*	68
<b>FIGURA 17.</b> RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DE RUPTURA ( $U_{BR}$ ) Y LA DISTANCIA INTER-ELECTRODOS ( $D$ ) PARA UN SISTEMA DE ELECTRODOS PUNTA-PLACA EN UN MEDIO LÍQUIDO DE HEXANO.*	70
<b>FIGURA 18.</b> RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DE RUPTURA ( $U_{BR}$ ) Y LA DISTANCIA INTER-ELECTRODOS ( $D$ ) PARA UN SISTEMA DE ELECTRODOS PUNTA-PLACA EN UN MEDIO LÍQUIDO DE NEOPENTANO.**	71
<b>FIGURA 19.</b> RELACIÓN ENTRE LA TENSIÓN DE RUPTURA ( $U_{BR}$ ) Y LA DISTANCIA INTER-ELECTRODOS ( $D$ ) PARA UN SISTEMA DE ELECTRODOS PUNTA-PLACA Y ESFERA-PLACA (3) EN UN MEDIO LÍQUIDO DE HELIO.*	71
<b>FIGURA 20.</b> DEPENDENCIA DEL CAMPO ELÉCTRICO Y DE LA ENERGÍA MEDIA DEL PLASMA GENERADO POR ARCO ELÉCTRICO, EN FUNCIÓN DE LA SEPARACIÓN DE LOS ELECTRODOS Y DE LA DENSIDAD DEL GAS PASA A ESTADO PLASMÁTICO.....	74
<b>FIGURA 21.</b> RELACIÓN ENTRE EL CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA ( $E_{BR}$ ) SOBRE LA DISTANCIA INTER-ELECTRODOS ( $D$ ).*	75
<b>FIGURA 22.</b> RELACIÓN ENTRE EL CAMPO ELÉCTRICO DE RUPTURA ( $E_{BR}$ ) SOBRE LA DISTANCIA INTER-ELECTRODOS ( $D$ ) EN AGUA DESTILADA.**	75
<b>FIGURA 23.</b> RELACIÓN ENTRE LA FUNCIÓN $E_{T1/3}$ Y EL ÁREA EFECTIVA DE LOS ELECTRODOS ( $S$ ) EN ACEITE DE TRANSFORMADOR PARA CAMPOS DÉBILMENTE UNIFORMES (CURVA 1) Y CAMPOS UNIFORMES (CURVA 2).....	76
<b>FIGURA 24.</b> RELACIÓN DE DEPENDENCIA ENTRE LA RIGIDEZ DIELECTRICA DE UNA SOLUCIÓN ACUOSA DE NACL CON RESPECTO A LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.*	78
<b>FIGURA 25.</b> REACCIÓN $A+B + C+D$ : SI UNO DE LOS REACTANTES ES LLEVADO A UN ESTADO EXCITADO $B = M^*$ , ÉSTE PUEDE SUPERAR LA ENERGÍA DE ACTIVACIÓN, INICIANDO LA REACCIÓN. ....	79
<b>FIGURA 26.</b> DIAGRAMA PADRE EJEMPLO.....	87
<b>FIGURA 27.</b> DIAGRAMA DE DESCOMPOSICIÓN. ....	87
<b>FIGURA 28.</b> ESQUEMA TÍPICO DE CONEXIÓN DARLINGTON PARA 2 TRANSISTORES BJT TIPO NPN.....	88
<b>FIGURA 29.</b> FORMA BÁSICA DE UN DISPOSITIVO OPTOACOPLADOR.....	90
<b>FIGURA 30.</b> ESQUEMA TÍPICO DE CONEXIÓN DARLINGTON PARA 2 TRANSISTORES BJT TIPO NPN.....	90

<b>FIGURA 31.</b> MEDICIÓN DE PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO PARA UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.	91
<b>FIGURA 32.</b> MEDICIÓN DE PÉRDIDAS EN LOS DEVANADOS PARA UN TRANSFORMADOR MONOFÁSICO.	93
<b>FIGURA 33.</b> MAPA PRELIMINAR DEL PROCESO PROPUESTO.	96
<b>FIGURA 34.</b> DISEÑO METODOLÓGICO DE CUANTIFICACIÓN DEL SYNGAS GENERADO.	105
<b>FIGURA 35.</b> ESQUEMA GENERAL DE CONEXIÓN DEL SISTEMA EMPLEADO PARA EXPERIMENTACIÓN.	106
<b>FIGURA 36.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO FINAL EMPLEADO.	109
<b>FIGURA 37.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN DEL CIRCUITO.	111
<b>FIGURA 38.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL GENERADOR DE PULSOS.	112
<b>FIGURA 39.</b> VISTA Y DESCRIPCIÓN DEL PRIMER CIRCUITO GENERADOR DE ALTA TENSIÓN USADO EN PRUEBAS PRELIMINARES.	112
<b>FIGURA 40.</b> VISTA GENERAL DE LA CONEXIÓN ENTRE EL CIRCUITO GENERADOR DE ARCO ELÉCTRICO DISEÑADO INICIALMENTE Y EL REACTOR PRELIMINAR DE GASIFICACIÓN DE GLICERINA POR PLASMA.	113
<b>FIGURA 41.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO CONSTRUIDO PARA EL SISTEMA GENERADOR DE PULSOS DE ALTA TENSIÓN PRECURSOR DE LA FORMACIÓN DEL ARCO ELÉCTRICO.	115
<b>FIGURA 42.</b> DETALLE DE CIRCUITO DE OPTO-AISLAMIENTO PARA SEÑAL DIGITAL.	116
<b>FIGURA 43.</b> CIRCUITO DE POTENCIA IMPLEMENTADO.	117
<b>FIGURA 44.</b> VISTA INTERNA DE UNA BOBINA DE IGNICIÓN AUTOMOTRIZ TÍPICA.	118
<b>FIGURA 45.</b> DETALLE DEL ARCO ELÉCTRICO PRESENTADO EN LOS TERMINALES DE LA BOBINA DE ALTA TENSIÓN OPERANDO CON EL CIRCUITO IMPLEMENTADO.	119
<b>FIGURA 46.</b> VISTAS GENERALES DEL REACTOR DE GASIFICACIÓN.	120
<b>FIGURA 47.</b> VISTA SUPERIOR DEL REACTOR DE GASIFICACIÓN.	121
<b>FIGURA 48.</b> PRIMER PLANO DE LOS ELECTRODOS EN EL REACTOR.	123
<b>FIGURA 49.</b> DETALLE DEL ELECTRODO SUPERIOR CROMADO Y GRADUADO.	123
<b>FIGURA 50.</b> VISTA FRONTAL DE LA ZONA DE PLASMA ENTRE LOS ELECTRODOS DEL SISTEMA.	124
<b>FIGURA 51.</b> DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL CIRCUITO USADO PARA LA SIMULACIÓN Y PARA EL PROTOTIPO DE PRUEBAS.	126
<b>FIGURA 52.</b> SEÑAL DE ENTRADA TOMADA PARA LA SIMULACIÓN EN PSPICE.	128
<b>FIGURA 53.</b> GRÁFICA DE LA TENSIÓN EN EL LADO DE ALTA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN.	128

<b>FIGURA 54.</b> GRÁFICA DE LA TENSIÓN EN EL LADO DE BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE TENSIÓN. ....	129
<b>FIGURA 55.</b> GRÁFICA DE LA CORRIENTE EN LA CARGA SIMULADA PARA TENER UNA ESTIMACIÓN DE ESTE VALOR. ....	129
<b>FIGURA 56.</b> CHISPÓMETRO COMERCIAL. ....	131
<b>FIGURA 57.</b> RECIPIENTE EMPLEADO EN EL CHISPÓMETRO CON ELECTRODOS EN FORMA DE HONGO. ....	133
<b>FIGURA 58.</b> DETALLE DE LA CONEXIÓN REALIZADA EN BAJA TENSIÓN DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIAL AL CHISPÓMETRO. ....	135
<b>FIGURA 59.</b> CURVA DE AJUSTE DE LOS VALORES OBTENIDOS DE LAS TENSIONES EN ALTA Y EN BAJA EN EL CHISPÓMETRO. ....	139
<b>FIGURA 60.</b> ESQUEMA DE CONEXIÓN GENERAL PARA EL ENSAYO DE VACÍO DE LA BOBINA DE IGNICIÓN EMPLEADA. ....	142
<b>FIGURA 61.</b> CIRCUITO EQUIVALENTE TIPO PARA UNA BOBINA DE IGNICIÓN DONDE SE IGNORA LAS PÉRDIDAS EN EL NÚCLEO DE LA BOBINA. CPC, CS, RSP, LSP Y RS SON VALORES DE RESISTENCIAS, INDUCTANCIAS Y CAPACITANCIAS PROPIAS DEL CONECTOR AISLADO DE LA BOBINA. ....	145
<b>FIGURA 62.</b> MUESTRA TIPO DE GLICERINA CRUDA (IZQUIERDA) Y DE GLICERINA DE ALTA PUREZA (DERECHA), EMPLEADOS EN LOS ENSAYOS. ....	146
<b>FIGURA 63.</b> DETALLE DEL MONTAJE FINAL GENERAL DEL EXPERIMENTO. ....	147
<b>FIGURA 64.</b> DETALLE DE LOS EQUIPOS DE ANÁLISIS DE GASES. ....	148
<b>FIGURA 65.</b> DETALLE DE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN ELÉCTRICA Y EL CIRCUITO GENERAL. ....	148
<b>FIGURA 66.</b> REACTOR CON MUESTRA DE GLICERINA DE ALTA PUREZA. ....	149
<b>FIGURA 67.</b> REACTOR CON MUESTRA DE GLICERINA CRUDA. ....	153
<b>FIGURA 68.</b> SEÑAL DE ENTRADA TIPO SUMINISTRADA POR EL GENERADOR DE SEÑALES. ....	154
<b>FIGURA 69.</b> BLOQUE A0 DONDE SE MUESTRA EL PROCESO COMPLETO DEL SISTEMA CON SUS ENTRADAS, CONTROLES, MECANISMOS Y SALIDAS. ....	172
<b>FIGURA 70.</b> MAPA DEL PROCESO COMPLETO DONDE SE MUESTRAN LAS ACTIVIDADES Y LA MANERA COMO SE RELACIONAN A TRAVÉS DE LAS ENTRADAS, LAS SALIDAS, LOS MECANISMOS Y LOS CONTROLES. ....	173
<b>FIGURA 71.</b> DETALLE DEL PROCESO AMPLIFICACIÓN DE POTENCIA. ....	174

## LISTA DE ANEXOS

<b>ANEXO A.</b> PROPIEDADES DE LA GLICERINA	185
<b>ANEXO B.</b> CONSTRUCCIÓN DEL REACTOR	186
<b>ANEXO C.</b> ENSAYOS CON GLICEROL DE ALTA PUREZA	197
<b>ANEXO D.</b> RESULTADOS EXPERIMENTALES CON GLICERINA CRUDA	203
<b>ANEXO E.</b> EXPERIMENTO CON GLICERINA CRUDA (VELOCIDADES DE GENERACIÓN DE LOS GASES).	209
<b>ANEXO F.</b> EXPERIMENTO CON GLICERINA CRUDA (GRÁFICAS DE LAS VELOCIDADES DE GENERACIÓN DE LOS GASES)	221
<b>ANEXO G.</b> PROPIEDADES DEL ACERO INOXIDABLE ALEACIÓN 308	243
<b>ANEXO H.</b> CAUCHO BUTADIENO-ACRONITRILO	245
<b>ANEXO I.</b> PROPIEDADES DE LOS ACRÍLICOS	246
<b>ANEXO J.</b> PRECIO REFERENCIAL DE LA ENERGÍA ELÉCTRICA	250
<b>ANEXO K.</b> HOJA DE DATOS DE ELEMENTOS ELECTRÓNICOS UTILIZADOS	251

## ABREVIATURAS

**EEDF:** Función de Distribución de Energía Electrónica

**EUR:** Euro (Moneda)

**HCS:** Hidrocarburos

**IDEF0:** Integration Definition for Function Modeling

**SADT:** Structured Analysis and Design Technique

**Syngas:** Gas de Síntesis

**TAG:** Triacilglicerol

**US\$:** Dólar estadounidense (Moneda)

**USP:** United States Pharmacopeia

## RESUMEN

**TITULO:** ENERGÍAS RENOVABLES: CARACTERIZACIÓN Y SIMULACIÓN DEL PROCESO DE OBTENCIÓN DE GAS DE SÍNTESIS (SYNGAS) POR MEDIO DE ARCO ELÉCTRICO, A PARTIR DE LA GLICERINA RESIDUAL DE LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL, IMPLEMENTANDO METODOLOGIA IDEF0<sup>\*</sup>.

**AUTORES:** FERNANDO MONTAÑEZ VILLAMIZAR, DIEGO FERNANDO MOTTA NIETO<sup>\*\*</sup>.

**PALABRAS CLAVES:** Biodiesel, glicerina, syngas, arco eléctrico, plasma.

### DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo de grado se realizó en el marco del área de investigación denominada *Energías Alternativas*, y busca sentar bases para un desarrollo tecnológico posterior; al realizar estudios preliminares que establecen su viabilidad y ofrecen escenarios y recomendaciones para dicho desarrollo, el cual buscaría brindar valor agregado a la glicerina (1,2,3-propanotriol) residual del proceso industrial del biodiesel producido en Colombia, mediante la generación de Gas de Síntesis (Syngas) por rompimiento molecular utilizando plasma inducido por arco eléctrico.

Para este fin se realizaron una serie de pruebas de laboratorio y simulación de los bloques más importantes del proceso, evaluación financiera y estructuración mediante mapa de procesos de las rutas estudiadas para la conversión de la glicerina en Syngas.

El estudio preliminar permitió obtener resultados satisfactorios de generación de syngas para el proceso implementado, de los cuales se pueden resaltar la eficiencia energética pico del 22% y promedio del 20% para el tratamiento experimental más ventajoso. Por otra parte la eficiencia económica pico, para el tratamiento y el escenario más ventajoso, es cercana al 60% y la eficiencia promedio ronda el 53%.

Por último se desarrolló un mapa del proceso implementado mediante la metodología IDEF0, el cual desagrega cada etapa del proceso y permite una comprensión del mismo para su implementación en prototipos futuros.

---

<sup>\*</sup> Trabajo de grado.

<sup>\*\*</sup> Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería Eléctrica. Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo. Codirectores: Dr. Fernando Martínez Ortega, MPE. Julio Cesar Chacón Velasco.

## ABSTRACT

**TITLE:** RENEWABLE ENERGIES: SIMULATION AND CHARACTERIZATION OF THE PROCESS OF SYNTHESIS GAS (SYNGAS) OBTENTION THROUGH ELECTRIC ARC, FROM BIODIESEL PRODUCTION RESIDUAL GLYCERIN, IMPLEMENTING IDEF0 METHODOLOGY\*.

**AUTHORS:** FERNANDO MONTAÑEZ VILLAMIZAR, DIEGO FERNANDO MOTTA NIETO \*\*.

**KEYWORDS:** Biodiesel, glycerol, syngas, electric arc, plasma.

### DESCRIPTION:

This capstone work was performed within the framework of the *Alternative Energies* research line, attempting to lay the basis for a posterior technologic development; by carrying out preliminary studies which determine its viability and offer scenarios and recommendations for that development; which should prospect for giving an additional value to residual glycerin (1, 2, 3-propanetriol) from the industrial production of bio-diesel in Colombia, by generating synthesis gas (Syngas) through molecular breaking by means of electric arc generated plasma.

To reach this goal there was followed a set of lab tests, physic and kinetic-chemical simulation of the most important blocks of the process, financial evaluation and a structuring of the process map of the studied channels for the conversion of glycerin into syngas.

The preliminary study yielded to satisfactory obtain results of syngas generation for the process in place, there can be highlighted the peak efficiency of 22% and 20% average for the better experimental treatment. Moreover, the peak economic efficiency for the treatment of the most advantageous scenario is close to 60% and the average efficiency is around 53%. Finally, it was developed a process map using IDEF0 methodology, which breaks down each step of the process and allows an understanding of it for implementation in future prototypes.

---

\* Trabajo de grado.

\*\*Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Ingeniería Eléctrica. Director: Dr. Gilberto Carrillo Caicedo. Codirector: Dr. Fernando Martínez Ortega, MPE. Julio Cesar Chacón Velasco.

## INTRODUCCIÓN

La inestabilidad en la disponibilidad y precio del petróleo y de otras fuentes primarias de energía, así como el cambio climático mundial, han motivado la incesante búsqueda de tecnologías más limpias, y por tanto el volcamiento hacia fuentes renovables. En el futuro cercano, para conseguir un sistema energético verdaderamente sostenible, se deberán reemplazar los combustibles fósiles por combustibles renovables que a su vez tengan propiedades de compatibilidad con la infraestructura y maquinaria existente, evitando traumas socioeconómicos en el proceso de transformación.

Teniendo en cuenta lo anterior, los biocombustibles y en particular el biodiesel se presentan como una opción que satisface las necesidades mencionadas, además considerando el caso de Colombia, tanto el mercado interno como el potencial productivo es favorable al desarrollo de industrias relacionadas con la producción y comercialización del mencionado producto.

Actualmente existen en el país proyectos de desarrollo tecnológico e industrial en la producción de biodiesel a partir del aceite de palma; cuyo proceso productivo inherentemente involucra la producción de glicerina<sup>1</sup>, para la cual el mercado tanto nacional como internacional tienen tendencia a la sobreoferta y disminución del precio<sup>2</sup>, esto sumado al costo adicional necesario para su refinamiento, han ocasionado que en el medio de los productores de dicho bien se considere imperante la búsqueda de nuevas aplicaciones o mercados para la glicerina preferiblemente en favor de la misma producción de biocombustibles y biodiesel.

La propuesta del presente trabajo trata por tanto de determinar la viabilidad de una alternativa para el uso de glicerina proponiendo el desarrollo de un procedimiento

---

<sup>1</sup>(CORPODIB, 2011)

<sup>2</sup>(CORPODIB, 2011)

para aprovechar la misma en un proceso combinado para subsecuentemente obtener biocombustibles, en especial biodiesel.

## **1. FORMULACIÓN/DECLARACIÓN DEL PROBLEMA**

La demanda energética en Colombia y en el mundo ha venido creciendo sostenidamente, al tiempo que las fuentes primarias se agotan o resultan inaccesibles. A pesar de que en los últimos años, en el marco de los avances tecnológicos, han surgido nuevas fuentes alternativas renovables y con un menor impacto ambiental; la proporción de consumo energético mundial sigue volcada hacia los combustibles fósiles, cuyo uso continuado tiene un impacto negativo en los ciclos naturales del planeta.

Los biocombustibles han surgido en los últimos años, como una alternativa muy aceptada de sustitución de los combustibles fósiles, dada su compatibilidad con el parque automotor y la infraestructura instalada.

El proceso de producción de biodiesel trae consigo la producción de glicerina, que a medida que se amplía la producción del biodiesel, se aprecia el incremento de la producción de glicerina en los mercados actuales. Muchos artículos y reportes se refieren al problema del exceso de glicerina el cual satura al mercado mundial actualmente.

La glicerina es producida principalmente para aplicaciones como jabones y producción oleo-química, tal como lo mencionó el Biodiesel Magazine en septiembre de 2006.<sup>3</sup>

“Además, el crecimiento de la industria oleo-química en Asia produce glicerina en grandes cantidades. Gran parte de ésta es exportada a EE.UU., pero el aumento

---

<sup>3</sup>(NILLES, 2006)

en los costos de envío, la mayoría está siendo enviada a China”.<sup>4</sup> Por lo anterior se puede afirmar que el mercado de glicerina sintética en EE.UU. se ha transformado en los últimos años.

La glicerina sintética se obtiene del petróleo, mientras que la glicerina natural - como la obtenida del biodiesel- está creada de grasas y aceites. Compañías como Dow Chemical han cerrado plantas de producción de glicerina sintética aludiendo en parte a la inundación de glicerina en el mercado, debido al incremento de producción de biodiesel. El impacto de la glicerina producida como subproducto no es insignificante.

Como se puede ver en el siguiente gráfico, el precio de la glicerina en EE.UU. redujo de 100 US\$ cts/lb en 1995 a menos de 40 US\$ cts/lb en 2005; en Europa el precio bajó de casi 1,500 EUR/t a menos de 500 EUR/t.”<sup>5</sup>

**Figura 1.** Precios de la glicerina en mercados de USA y Europa entre 1995 y 2005.



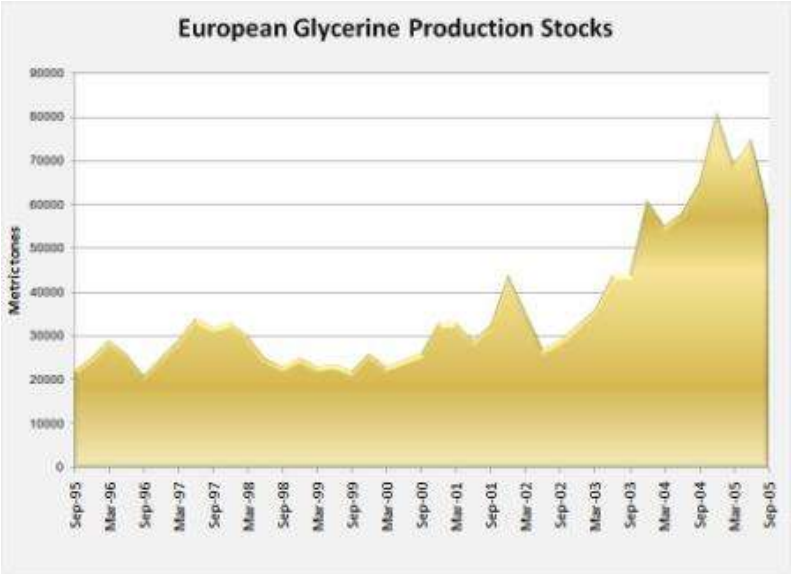
Fuente: (OLEOLINE, 2005).

<sup>4</sup>(NILLES, 2006)

<sup>5</sup>(UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, 2011)

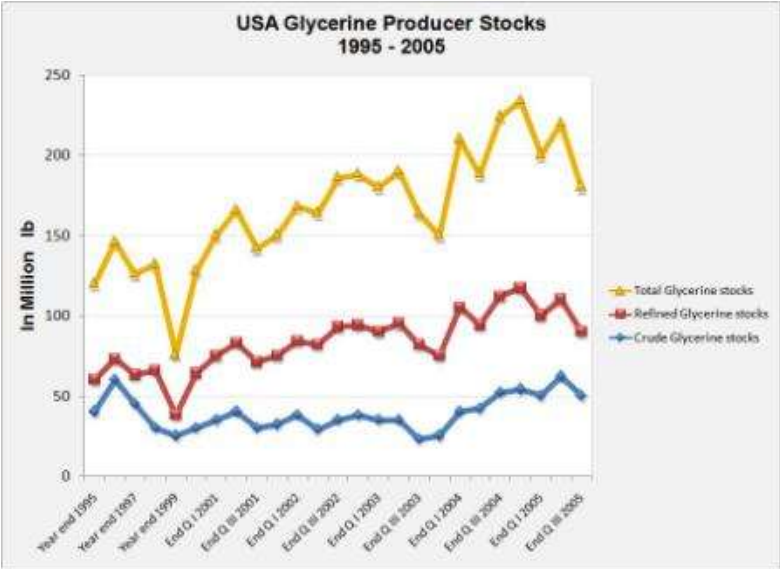
Del mismo modo, a continuación se muestra el incremento en los stocks de glicerina en EE.UU. y Europa:

**Figura 2.** Cantidad de glicerina producida en Europa entre 1995 y 2005.



**Fuente:** (OLEOLINE, 2005).

**Figura 3.** Cantidad de glicerina producida en USA entre 1995 y 2005.



**Fuente:** (OLEOLINE, 2005).

Ante la situación antes mencionada, es de interés general en la comunidad científica, la industria y las instituciones nacionales e internacionales del sector, encontrar valor agregado y nuevas aplicaciones para la glicerina subproducto de la producción de biodiesel.

Como estrategia para lograr una solución al problema planteado, el trabajo consiste en desarrollar una ruta para el aprovechamiento de la glicerina en la obtención de syngas por medio de un arco eléctrico que ocasione el rompimiento molecular de la sustancia; determinando las ventajas y falencias del método trabajado según sea su eficiencia energética y económica, así como la capacidad de desarrollo del mismo en el contexto local y nacional.

El proceso investigado se supone, a priori, como una opción eficiente tanto económica como energéticamente considerando estudios y experimentos desarrollados en materias primas similares. En aras de comprobar la validez de estas suposiciones el trabajo consistió en realizar pruebas basadas en simulación y experimentación para determinar la eficiencia y viabilidad del mismo.

Dado que actualmente existen pocos estudios concretos que aborden el tema específico, aunque algunos sí citan y proponen la posibilidad y viabilidad de obtener syngas a partir de la glicerina, se consideró desarrollar una metodología de experimentación y simulación, como una vía pertinente para obtener la información necesaria para llevar la propuesta a resultados concretos.

Del desarrollo del trabajo de investigación se esperaba contar con datos confiables que indicaran la viabilidad y dirección de un posterior desarrollo tecnológico enfocado a la producción de syngas a partir de glicerina utilizando plasma inducido por arco eléctrico, ya sea para futuros trabajos de investigación o implementación a nivel de pregrado y posgrado, como para un aprovechamiento concreto de los resultados obtenidos por las entidades patrocinadoras involucradas en el mismo.

## **2. OBJETIVO GENERAL**

Determinar la factibilidad energética y económica a partir de la caracterización de los procesos tecnológicos en la cadena de producción por arco eléctrico de syngas a partir de la glicerina que resulta como producto secundario en el proceso de producción del biodiesel, representándolos en IDEF0.

## **3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar pruebas preliminares utilizando la infraestructura y laboratorios de alta tensión de la Universidad Industrial de Santander para determinar las condiciones requeridas para el rompimiento de la rigidez dieléctrica y posterior gasificación de la glicerina.
- Simular las etapas eléctricas de generación del arco eléctrico para la obtención de syngas por arco eléctrico a partir de glicerina
- Utilizar prototipo de pruebas que permita generar las condiciones eléctricas, mecánicas y químicas para la realización del proceso de gasificación del glicerol de muestra por plasma inducido por arco eléctrico; y realizar pruebas preliminares con el mismo, de manera que a partir de su análisis se obtendrán las variables y relaciones necesarias para el desarrollo del modelo funcional, permitiendo establecer la viabilidad y pertinencia del desarrollo tecnológico.
- Implementar la metodología de IDEF0 para los procesos desarrollados.
- Desarrollar un modelo funcional, caja o proceso de funciones a partir de los datos obtenidos de las pruebas y de la simulación, para ser implementado en el mapa del proceso de la metodología IDEF0.
- Realizar un mapa de los procesos definidos que permita la comprensión general del sistema.

## 4 ANTECEDENTES

El desarrollo de la presente investigación, una vez identificado el problema a tratar, se encaminó en una primera etapa a la recopilación de un estado del arte sobre el tema, es decir, a una revisión de los antecedentes más relevantes del proceso que se quería implementar.

Hay antecedentes reportados que muestran que el uso de un plasma generado por arco eléctrico o por métodos alternativos puede resultar en un proceso significativamente eficiente a nivel energético y económico para la obtención de syngas a partir de materias orgánicas similares a la sustancia de interés (glicerina).

Los trabajos de Van Oost et. al.<sup>6</sup>, Kalra et. al.<sup>7</sup>, Gangoli et. al.<sup>8</sup>, Yan et. al.<sup>9</sup> y Goujard et. al.<sup>10</sup>; son muestras representativas de la investigación de estos procesos sobre diversas materias primas mediante métodos de generación de plasma de muy variada naturaleza.

Por otra parte procesos de obtención de syngas a partir de glicerina se han llevado a cabo de manera limitada, pudiéndose citar los valiosos trabajos de Zhu et. al.<sup>11</sup> y Chernovsky<sup>12</sup>, que se constituyen en una parte de las aún limitadas investigaciones realizadas sobre glicerina, como un precursor de gas de síntesis en procesos plasma-químicos.

Comparado con otros procesos convencionales (como los puramente catalíticos), algunos de los estudios reseñados anteriormente presentan resultados de similar

---

<sup>6</sup>(VAN OOST, 2004)

<sup>7</sup>(KALRA, 2004)

<sup>8</sup>(GANGOLI, 2008)

<sup>9</sup>(YAN, 2001)

<sup>10</sup>(GOJJARD, 2009)

<sup>11</sup>(ZHU, 2009)

<sup>12</sup>(CHERNOVSKY, 2009)

o mayor eficiencia; de ahí nace el interés en evaluar y modelar esta opción como primer paso hacia el desarrollo de un proceso aprovechable que potencialice el rendimiento de todo el sector del biodiesel, sentando así un antecedente e incentivando a la investigación y desarrollo tecnológico futuros, que finalmente conduzcan a un proceso completamente funcional.

## **5 MARCO REFERENCIAL**

### **5.1 SUSTANCIAS INVOLUCRADAS EN LA INVESTIGACIÓN**

#### **5.1.1 El Biodiesel**

El biodiesel es un tipo especial de biocombustible obtenido a partir de grasas vegetales, el cual ha tenido en la última década un importante crecimiento en sus niveles de producción y penetración en los mercados nacionales e internacionales, debido, en gran medida, a las políticas públicas de la mayoría de países encaminadas a la sustitución de combustibles fósiles por aquellos, a priori, de un menor impacto ambiental.

##### ***5.1.1.1 Composición del Biodiesel***

Los principales componentes de los aceites vegetales y las grasas vegetales son los Triacilglicerolos (TAG) o trigleceridos. Químicamente los TAG son esterres o ácidos grasos con glicerol (1,2,3-propanotriol) -el glicerol es también llamado glicerina-.

En este sentido, los triglicéridos de los aceites vegetales y las grasas animales contienen varios tipos de ácidos grasos. De esta manera diferentes ácidos

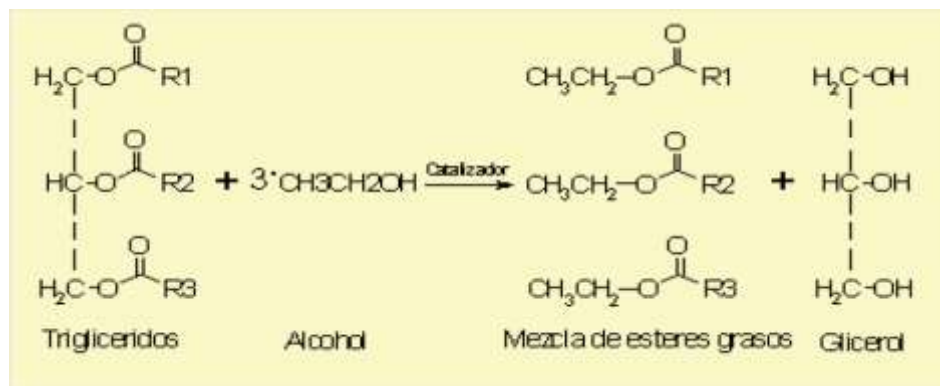
grasos pueden ser agregados a una cadena molecular de glicerol. Los diferentes ácidos grasos contenidos en los triglicéridos les confieren las propiedades físico-químicas de aceites vegetales o grasas animales.

Dado que diferentes ácidos grasos tienen diferentes propiedades físicas y químicas, el perfil de los ácidos grasos es probablemente el parámetro más incidente en las propiedades de los aceites vegetales o grasas animales correspondientes.<sup>13</sup>

### 5.1.1.2 Obtención del Biodiesel

Para obtener biodiesel, el aceite vegetal o la grasa animal es sometida a una reacción química llamada transesterificación. En esta reacción el aceite vegetal o grasa animal reacciona en presencia de un catalizador (usualmente una base), con un alcohol (usualmente metanol o etanol) para dar los correspondientes alquil ésteres de mezclas de ácidos grasos provenientes del aceite vegetal o grasa animal primarios. La figura 4 muestra la reacción de transesterificación con un triglicérido y etanol como precursores.<sup>14</sup>

**Figura 4.** La Reacción de transesterificación. R1, R2 y R3 son mezclas de cadenas de varios ácidos grasos.



**Fuente:** (KNOTHE, 2005. p. 3)

<sup>13</sup> (KNOTHE, 2005)

<sup>14</sup> (KNOTHE, 2005)

### **5.1.1.3 Ventajas y desventajas del biodiesel como combustible<sup>15</sup>**

El biodiesel tiene algunas ventajas distintivas con respecto al diesel proveniente de combustibles fósiles, siendo completamente competitivo en la mayoría de aspectos técnicos con respecto éste último:

- Es derivado de un recurso renovable, luego se reduce la dependencia respecto al petróleo.
- Es biodegradable.
- Reduce la mayoría de las emisiones (con excepción de los óxidos de nitrógeno NOx).
- Punto de inflamación mayor, lo que permite almacenamiento y manejo más seguro.
- Excelente lubricidad, hecho que está adquiriendo importancia con el surgimiento de combustibles diesel derivados del petróleo con bajo nivel de azufre, lo que ha reducido considerablemente la lubricidad. Añadir biodiesel a niveles bajos (1-2%) restaura la lubricidad.

Algunos problemas inherentes al biodiesel pueden ser:

- Alto costo de producción, que hace que sea necesario implementar subsidios e incentivos legales para su producción.
- Emisiones de gases de óxidos de nitrógeno (NOx).
- Inestabilidad relativa a la exposición al aire.
- Las propiedades se alteran en climas fríos.

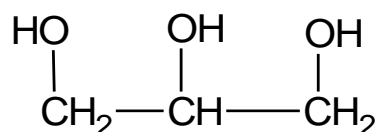
---

<sup>15</sup>(KNOTHE, 2005)

### 5.1.2 La Glicerina

Desde el punto de vista químico, el propanotriol, glicerol o glicerina (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>) es un alcohol lineal con tres grupos hidroxilos (OH), por lo que es posible representar la molécula como se muestra en la figura 5:

**Figura 5.** Representación molecular de la glicerina.



**Fuente:** Propia.

El propanotriol es uno de los principales productos de la degradación digestiva de los lípidos, paso previo para el ciclo de Krebs. Se produce también como un producto intermedio de la fermentación alcohólica. El propanotriol, junto con los ácidos grasos, es también uno de los componentes principales de los lípidos simples, como son los triglicéridos y fosfolípidos.

Los usos de la glicerina se cuentan por miles, con grandes cantidades de ésta que sirven para la fabricación de medicamentos, cosméticos, dentífricos, espuma de uretano, resinas sintéticas, gomas y otras aplicaciones. La producción de tabaco y de alimentos también consume grandes cantidades de glicerol. El glicerol es producido naturalmente por animales y plantas, tomando formas preferentemente de ácidos grasos como lecitina y cefarinas.

El anexo A presenta algunas de las propiedades más representativas de la glicerina.

### 5.1.3 El Syngas

Se denomina gas de síntesis (syngas) al gas cuya composición se basa en la mezcla de monóxido de carbono (CO) e hidrógeno gaseoso (H<sub>2</sub>), entre otros componentes conexos.

El uso del gas de síntesis (H<sub>2</sub>/CO) como materia prima industrial, supuso a lo largo del siglo XX, el comienzo de una nueva era en la industria química mundial, ya que esta materia prima permite obtener, a gran escala, tanto combustibles sintéticos como otros importantes productos de síntesis.<sup>16</sup>

#### 5.1.4.1 Obtención de Syngas por medios químicos

El gas de síntesis (syngas) puede obtenerse por distintos métodos químicos:

- 1) A partir de carbón: Método en el cual se hace pasar vapor de agua sobre carbón coque caliente. La proporción de hidrógeno y monóxido de carbono en el syngas puede modificarse por medio de una reacción posterior, que consume CO y genera H<sub>2</sub>, y que puede utilizar una gran variedad de catalizadores, tanto homogéneos como heterogéneos, aunque normalmente se lleva a cabo usando óxidos de hierro como catalizadores.
- 2) Reformado de metano con vapor de agua: Este es el método más utilizado para generar syngas mediante reacciones catalíticas, ya que el metano es un compuesto fácilmente disponible que se encuentra como componente principal del gas natural.
- 3) Reformado de metano con CO<sub>2</sub>: Es un método que utiliza distintos metales de transición soportados como níquel, rubidio, rodio y paladio (Ni, Ru, Rh, Pd) como catalizadores, y con el que se obtiene syngas con alto contenido en CO, lo que es adecuado para los procesos de hidrogenación.
- 4) Oxoreformado de metano: Consiste en la oxidación parcial del metano (CH<sub>4</sub>) con Oxígeno (O<sub>2</sub>) a altas temperaturas, para obtener syngas. A pesar

---

<sup>16</sup> (SÁNCHEZ, 2004)

de las ventajas que presenta, este método de síntesis de syngas no ha sido aplicado industrialmente debido a los problemas derivados de la desactivación del catalizador; sin embargo, se ha desarrollado una variante electroquímica de la reducción electroquímica de CO<sub>2</sub> para obtener gas de síntesis sobre electrodos de difusión de gas, mejorando algunos aspectos del mismo.)

#### **5.1.4.2 Obtención de syngas por arco eléctrico**

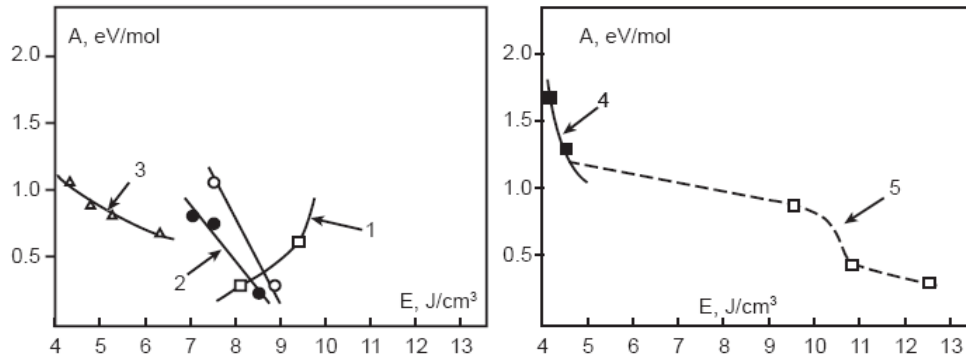
Los combustibles líquidos como la gasolina, diesel, biodiesel, queroseno, etanol y otros, pueden ser eficientemente convertidos en syngas por oxidación parcial asistida por plasma o por conversión catalítica en aire-vapor. Tales tecnologías de producción permiten que gases ricos en hidrógeno, puedan ser empleados en diferentes aplicaciones industriales, siendo especialmente interesantes en sistemas de transporte.<sup>17</sup>

Existen estudios diversos que se han realizado para determinar la pertinencia de la producción de syngas por arco eléctrico a partir de diversas materias primas, que van desde gases como el metano hasta sólidos como la biomasa, pasando por líquidos como el queroseno. Un ejemplo de un estudio tipo y sus resultados se presenta en la figura 6.

---

<sup>17</sup>(FRIDMAN, 2008. pp.1-3)

**Figura 6.** Gasto energético de la producción de syngas durante la conversión por plasma del keroseno, como función de la entrada específica de energía en el sistema.



**Fuente:** (FRIDMAN, 2008).

## 5.2 EL PLASMA

El plasma es un gas ionizado, por cuya naturaleza ha sido denominado el cuarto estado de la materia. “Ionizado” significa que ha perdido al menos un electrón de enlace respecto a la molécula de gas precursora, convirtiéndose los átomos o moléculas en iones cargados positivamente. Cuando la temperatura se incrementa, las moléculas se vuelven más energéticas y transforman la materia siguiendo la secuencia sólido, líquido, gas y finalmente plasma. Además de ser muy importante en muchos aspectos de la vida cotidiana, se estima que más del 99% del universo visible está constituido por plasma.

Las cargas eléctricas libres –electrones e iones- le confieren al plasma una alta conductividad eléctrica (de un orden mayor incluso que el de conductores eléctricos como el oro o el cobre), una interactividad interna y una fuerte respuesta a campos electromagnéticos. El gas ionizado es llamado plasma cuando éste es neutro eléctricamente (con la densidad electrónica balanceada por la presencia prácticamente equivalente de iones de carga positiva y negativa) y contiene un

número significativo de partículas cargadas eléctricamente, suficientes para afectar sus propiedades eléctricas.

El estado de plasma se manifiesta de manera natural, como también puede producirse deliberadamente en un laboratorio o en la industria, lo cual permite muchas oportunidades a numerosas aplicaciones como la síntesis termonuclear, electrólisis, láser, lámparas fluorescentes, y muchas más.

Para la química, el plasma ofrece principalmente 3 características que resultan atractivas para diferentes aplicaciones y soluciones:

1. La temperatura y energía pueden exceder significativamente la de aquellas que se producen en otras tecnologías más convencionales, como las que emplean energía térmica.
2. En estado de plasma se pueden obtener muy altas concentraciones de energía y sustancias activas (electrones, iones, átomos y radicales, estados excitados, y fotones de diferentes longitudes de onda).
3. En estado de plasma se tienen condiciones esencialmente lejanas del equilibrio termodinámico, proveyendo muy altas concentraciones de sustancias activas y manteniendo la temperatura molar tan baja como la del entorno.

Estas características permiten una intensificación significativa de los procesos químicos tradicionales, incrementando su eficiencia, y usualmente permitiendo la simulación satisfactoria de las reacciones químicas, algo imposible en la química convencional.

En la actualidad el campo de la química del plasma se ha extendido ampliamente, con aplicaciones como fabricación de dispositivos microelectrónicos, revestimientos protectores para aviones, tratamiento de fibras poliméricas, cauterización de heridas para detener la sangre y tratamiento, y para producir ozono para las televisiones de plasma.

Cuando una fuente de tensión acoplada a unos electrodos (con una distancia mutua de relativa cercanía), es capaz de generar un nivel de tensión lo suficientemente grande y duradero, es posible vencer la rigidez dieléctrica del medio en donde están inmersos los electrodos, posibilitando la conducción eléctrica momentánea del medio y generando un arco eléctrico entre dichos electrodos, una consecuente elevación de la temperatura en las adyacencias del mismo, elevando así la temperatura del medio hasta niveles que pueden inducir la formación de plasma.<sup>18</sup>

### **5.3 FÍSICA DEL PROCESO DE GENERACIÓN DE PLASMA POR ARCO ELÉCTRICO**

En este apartado se presenta un esbozo de las leyes y fenómenos físicos propios del proceso implementado, el cual involucra las etapas de generación de tensiones de disrupción, la formación del arco eléctrico y la generación de plasma en el medio líquido; etapas que se constituyen en fundamentales en el proceso realizado como parte de la investigación.

#### **5.3.1 Procesos de ionización.<sup>19</sup>**

El paso de sistemas neutros a un sistema de gas ionizado (plasma) discurre en múltiples etapas y bajo diversos procesos. Los procesos de ionización simple son considerados como los más simples para el modelado y entendimiento del fenómeno.

---

<sup>18</sup>(FRIDMAN, 2008. pp.1-3)

<sup>19</sup>(FRIDMAN, 2008. pp. 12-15)

### 5.3.1.1 *Partículas cargadas elementales en el plasma*

Los procesos de ionización y formación de plasma, traen consigo la formación de un número cuasi equivalente de partículas cargadas tanto positiva como negativamente. Esto varía cuando el medio es un gas de alta electronegatividad (afinidad electrónica), donde hay un ligero desequilibrio a favor de la formación de iones con carga negativa.

El mecanismo de ionización simple se constituye como el más elemental precursor de procesos plasma-químicos, donde la baja masa y alta movilidad de los electrones, les confieren una alta capacidad para transferir energía.

Las velocidades y eficiencias de estos procesos dependen de cuantos electrones tienen la energía suficiente para promoverse. Un parámetro empleado para describir la energía electrónica del sistema en estado plasmático es la denominada *Función de Distribución de Energía Electrónica* ( $f(\varepsilon)$ ), llamada por sus siglas en inglés **EEDF**. Dicho parámetro se determina mediante la siguiente expresión:

$$f(\varepsilon) = 2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{\pi(kT_e)^3}} e^{-\varepsilon/kT_e} \quad (5.1)$$

Donde  $\varepsilon$  es a energía electrónica,  $k$  la constante de Boltzmann y  $T_e$  la temperatura electrónica en Kelvin.

La *Energía Media Electrónica* se obtiene de la expresión 5.1 y se calcula como el primer momento de la función de distribución de energía electrónica, según la siguiente expresión:

$$\langle \varepsilon \rangle = \int_0^{\infty} \varepsilon f(\varepsilon) d\varepsilon = \frac{3}{2} T_e \quad (5.2)$$

La expresión anterior arroja energías en el rango entre 1 a 5eV para los plasmas más comunes generados en laboratorio. Por otra parte, los procesos descritos por este mecanismo, se basan en el desprendimiento de uno o más electrones para formar iones positivos en la mayoría de los casos, catalogados como plasmas fríos con cargas cercanas a la de un electrón ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  C); mientras que el fenómeno de iones multicargados, se presenta principalmente en plasmas termonucleares calientes de mucha mayor energía.

### **5.3.1.2 Colisiones elásticas e inelásticas**

Los procesos elementales de generación de plasma se pueden subdividir en dos clases según el tipo de colisiones entre las partículas del medio: *Colisiones elásticas* e *inelásticas*. Estas clases agrupan las reacciones según la energía de las partículas y su interacción cuando alcanzan dicho estado.

Las colisiones inelásticas son aquellas en las que la energía interna de las partículas colisionantes no cambia substancialmente durante el fenómeno de generación de plasma. Por otra parte las colisiones elásticas modifican significativamente la energía interna de las partículas colisionantes, al ocurrir transferencia de energía cinética hacia energía interna de las mismas. Un caso atípico son las *colisiones superelásticas*, las cuales presentan una realimentación por la cual las partículas pesadas como átomos, iones y/o moléculas; transfieren energía interna hacia la energía cinética de electrones plasmáticos, incrementando la densidad iónica del plasma.

Los procesos elementales de formación de plasma se pueden expresar de acuerdo a algunos parámetros de interés que se han desarrollado: *Sección Transversal*, *Camino Libre Medio*, *Frecuencia de Interacción*, *Tasa de Reacción* y *Coefficiente de la Tasa de Reacción*.

De los parámetros citados anteriormente, la *sección transversal* del plasma es considerada como la característica fundamental de un plasma descrito por

ionización simple. Dicho parámetro puede interpretarse como el área imaginaria de una sección circular transversal dentro de la cual una especie colisionante tipo  $A$  choca con otra especie tipo  $B$ . Para 2 partículas colisionantes  $A$  y  $B$  con radio  $r_1$  y  $r_2$  respectivamente, se considera la sección transversal como:

$$\sigma = \pi(r_1 + r_2)^2 \quad (5.3)$$

El *Camino Libre Medio*  $\lambda$  de una especie colisionante  $A$  con respecto a otra especie colisionante  $B$  en procesos tipo “ $A+B$ ”, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$\lambda = 1/n_B\sigma \quad (5.4)$$

Donde  $n_B$  es la densidad de partículas  $B$  y  $\sigma$  es la sección transversal del plasma por ionización elemental.

La *frecuencia de interacción*  $\nu$  de una especie colisionante  $A$  con otra especie colisionante  $B$ , se puede **expresar** como la relación entre la velocidad relativa  $v$  y el camino libre medio  $\lambda$ , según la siguiente expresión:

$$\nu_A = n_B\sigma v \quad (5.5)$$

$$\nu_A = n_B \int \sigma(v)v(v) dv = \langle \sigma v \rangle n_B \quad (5.6)$$

### **5.3.1.3 Clasificación de los procesos de ionización**

Los mecanismos de ionización pueden variar dependiendo del sistema analizado y se suelen clasificar como: Ionización Directa por Impacto de Electrones, Ionización Paso a Paso por Impacto de Electrones, Ionización por

Colisión de Partículas Pesadas, Fotoionización e Ionización Superficial (Emisión Electrónica).

- **Ionización Directa por Impacto de Electrones:**

Ionización de átomos neutros y no excitados previamente, radicales o moléculas por un electrón que posee la suficiente energía para ionizar la especie al colisionar con ésta. Este es un proceso importante en fenómenos de descargas frías y no-térmicas.

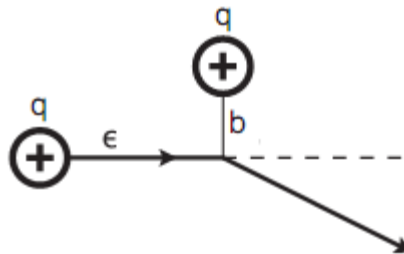
- **Ionización Paso a Paso por Impacto de Electrones:**

Ionización de especies neutras previamente excitadas. Proceso relevante en descargas térmicas y de intensa energía.

- **Ionización por Colisión de Partículas Pesadas:**

Proceso que tiene lugar durante colisiones ión-átomo e ión-molécula, cuando la energía total de las partículas colisionantes excede el potencial de ionización.

**Figura 7.** Típica colisión coulombica de partículas cargadas.



**Fuente:** (FRIDMAN, 2008. p. 15).

- **Fotoionización:**

Procesos que tienen lugar cuando fotones chocan con energía suficiente para ionizar las especies presentes.

- **Ionización Superficial (Emisión Electrónica):**

Procesos en los cuales electrones, átomos, moléculas, iones y fotones chocan con superficies, manifestándose un calor superficial elevado.

### 5.3.2 Generación del arco eléctrico

La generación del arco eléctrico en un medio líquido es un fenómeno más complejo de modelar que el fenómeno análogo en medios gaseosos. Dicho fenómeno puede presentar comportamientos similares al modelo denominado *Townsend*<sup>20</sup>, que describe la formación de un arco eléctrico en gases (para el caso de líquidos de alta pureza); pero a medida que la composición del líquido se torna rica en impurezas y gases disueltos, el comportamiento del mismo tiende a alejarse del modelo de descarga por arco eléctrico en gases.

Para entender el fenómeno de descarga en líquidos es importante comprender el modelo de descarga en medios gaseosos, como una fuente inicial de información que permita construir un modelo adecuado para la formación de plasma por arco eléctrico en líquidos.

La tabla 1 muestra las condiciones de formación de plasma por arco eléctrico térmico completo e incompleto, según los parámetros físicos que intervienen en el fenómeno de la descarga eléctrica.

---

<sup>20</sup>(KUFFEL, 2000)

**Tabla 1.** Parámetros de descarga típicos para diversos tipos de plasma.<sup>21</sup>

Parámetro de descarga del plasma	Descarga por arco térmico	Arco térmico incompleto
Presión de gas	0.1-100 atm	10 <sup>-3</sup> -100 Torr
Corriente del arco	30A-30kA	1-30 A
Densidad de corriente del cátodo	10 <sup>4</sup> —10 <sup>7</sup> A/cm <sup>2</sup>	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup> A/cm <sup>2</sup>
Tensión	10-100 V	10-100 V
Potencia por unidad de longitud	>1 kW/cm	<1kW/cm
Densidad electrónica	10 <sup>15</sup> -10 <sup>19</sup> cm <sup>-3</sup>	10 <sup>14</sup> -10 <sup>15</sup> cm <sup>-3</sup>
Temperatura del gas	1-10eV	300-6000 K
Temperatura electrónica	1-10eV	0.2-2 eV

La formación de un arco eléctrico suele presentar fenómenos de capas anódicas y catódicas, así como de formación de puntos calientes, todos los cuales pueden modificar el comportamiento del arco eléctrico generado. Estos fenómenos son altamente dependientes de la geometría y naturaleza del sistema de generación del arco eléctrico.

### 5.3.3 Capas anódicas y catódicas de las descargas eléctricas

La función de la capa en el cátodo es la de proveer la alta corriente necesaria para la operación del arco eléctrico. La emisión electrónica desde el cátodo, en los arcos eléctricos, es debida a las emisiones termoiónicas y del campo eléctrico, las cuales son mucho más intensas que las emisiones de electrones secundarios inducidas por iones, a su vez dominantes en las capas catódicas para descargas tipo relámpago (*Glow*). En el caso de la emisión termoiónica, el bombardeo de

<sup>21</sup>(FRIDMAN, 2008. p. 188)

iones genera calentamiento del cátodo que conduce al escape de electrones desde la superficie. En este sentido, la emisión secundaria de iones suministra alrededor de  $\gamma \approx 001$  electrones por ion, mientras que la emisión termoiónica puede generar muchos más electrones por ion ( $\gamma_{eff} = 2 - 9$ ). La fracción de la corriente electrónica cerca del cátodo se calcula según la siguiente expresión:

$$S = \frac{\gamma_{eff}}{\gamma_{eff} + 1} \approx 0.7 - 0.9 \quad (5.7)$$

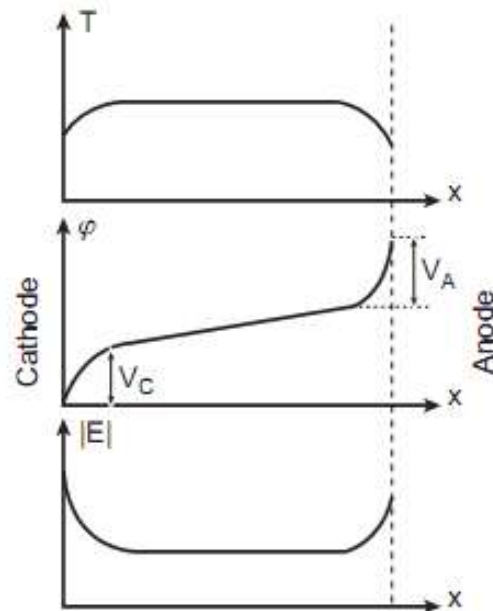
Donde  $\gamma$  es la razón efectiva de generación de electrones por ion y  $S$  es la fracción de la corriente electrónica cerca del cátodo. (FRIDMAN, 2008. p.189)

Esto muestra que la emisión termoiónica desde el cátodo provee la mayoría de la corriente en el arco eléctrico. La corriente en la columna positiva tanto de las descargas de tipo incandescente, como de las descargas de tipo arco eléctrico, es casi completamente suplida por electrones de alta movilidad. En contraste a las descargas de tipo incandescente, la ionización directa por impacto de electrones en la capa catódica para una descarga tipo arco eléctrico, debe proveer solo una fracción menor de la corriente total de descarga ( $1-S \approx 10-30\%$ ); por otra parte, la tensión en el cátodo en descargas de tipo arco eléctrico es relativamente baja, estando alrededor o un poco menos del potencial de ionización.

La capa catódica proporciona suficiente densidad iónica para proveer el calentamiento catódico necesario para el caso de la emisión termoiónica. La temperatura del gas cerca del cátodo es la misma que la de la superficie del mismo, y unas veces menor que la temperatura en la columna de cargas positivas. Por tanto, la ionización térmica es incapaz, por sí sola, de proveer el grado de ionización necesario para el arco eléctrico, por lo que es requerida una ionización adicional de carácter no térmico para tal propósito. Esto conduce a un elevado campo eléctrico cerca del cátodo, el cual estimula la emisión electrónica por

decrecimiento de la función de trabajo del material del cátodo (Efecto Schottky), contribuyendo a la emisión por campo eléctrico. La ionización intensiva en la vecindad del cátodo conduce a una alta concentración de iones en la capa del mismo, así como a la formación de carga positiva espacial, la cual genera el elevado campo eléctrico. Una función de distribución típica de los parámetros del arco eléctrico, como temperatura, tensión y campo eléctrico a lo largo del cátodo hasta el ánodo, se presenta en la figura 8. La distribución típica de la capa catódica se ilustra en la figura 9.

**Figura 8.** Diagrama de distribución de tensiones, temperatura y campo eléctrico; desde el cátodo hasta el ánodo en un arco eléctrico.

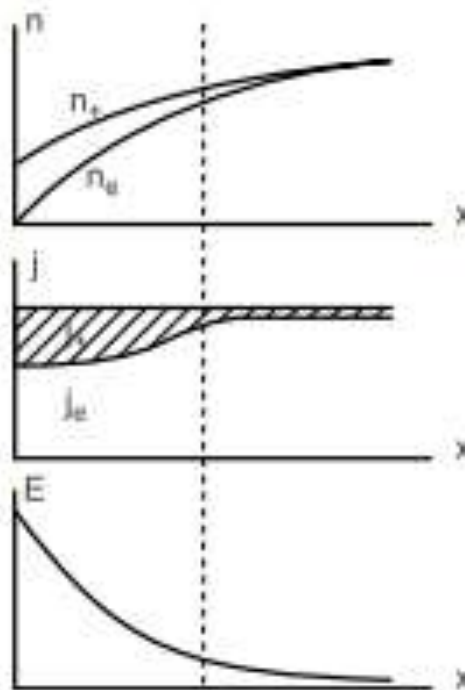


**Fuente:** (FRIDMAN, 2008. p. 189).

Una carga espacial positiva larga, con alto campo eléctrico y la mayoría de la tensión del cátodo, queda localizada en la delgada capa por el cátodo. Esta capa es más pequeña que el camino libre medio y es denominada como la “Zona menor de colisiones de la capa catódica”. La zona más larga casi-neutra de la capa catódica es localizada entre la capa delgada menor de colisiones. La mayoría de

la corriente que transporta iones y energía hacia el cátodo es generada allí. Las corrientes iónicas son constantes en la capa menor de colisiones, donde no hay fuentes de partículas cargadas. La fracción de electrones de la corriente crece desde  $S \approx 0.7-0.9$  en la capa catódica, hasta  $S \approx 0.1$  en la columna positiva.

**Figura 9.** Distribución típica de densidad de carga, corriente eléctrica y campo eléctrico en la capa catódica de una descarga por arco eléctrico.



**Fuente:** (FRIDMAN, 2008. p. 189).

Los componentes electrónicos ( $j_e$ ) e iónicos ( $j_+$ ) de la densidad de corriente total  $j$  en la zona menor de colisiones se definen por las relaciones:

$$j_e = S \cdot j = n_e e v_e \quad (5.8)$$

$$j_+ = (1 - S)j = n_+ e v_+ \quad (5.9)$$

Las velocidades de los electrones y de los iones,  $v_e$  y  $v_+$ , pueden ser presentadas como funciones de la tensión  $V$ , suponiendo a  $V=0$  en el cátodo y  $V=V_C$  hacia el final de la capa menor de colisiones (con  $m$  y  $M$  las masas de los electrones y los iones respectivamente):

$$v_e = \sqrt{\frac{2eV}{m}} \quad (5.10)$$

$$v_+ = \sqrt{\frac{2e(V_C - V)}{M}} \quad (5.11)$$

#### 5.3.4 Puntos calientes catódicos

El fenómeno de puntos calientes en el cátodo se presenta para electrodos con materiales que tienen una relativa baja temperatura de fusión con relación a la temperatura de la zona de plasma. En este fenómeno el flujo de corriente no es sostenido establemente y la densidad de corriente en estos puntos es relativamente alta ( $10^4$ – $10^7$  A/cm<sup>2</sup>), seguida de fenómenos de sobrecalentamiento y fusión de parte del material del cátodo. Se conoce a este fenómeno también como “fenómeno de emisión termoiónica”. Este fenómeno debe ser tenido en cuenta en el estudio del proceso de formación de plasma por arco eléctrico si se emplean electrodos metálicos expuestos a altas temperaturas.<sup>22</sup>

Para el caso de los electrodos presentes en el prototipo de pruebas que se empleó en el presente trabajo, los mismos están elaborados con un metal de relativa baja temperatura de fusión, como es el acero inoxidable 308 (Ver Anexo G), lo que permite inferir que se presentan puntos calientes en el cátodo durante el desarrollo de las pruebas.

---

<sup>22</sup> (FRIDMAN, 2008. p.190)

### 5.3.5 Ruptura de líquidos por arco eléctrico

El estado general del conocimiento sobre el rompimiento eléctrico en líquidos es menos avanzado que el de sólidos y gases. Pese a que ha sido investigado en las últimas décadas, los resultados y las conclusiones de los muchos trabajos no pueden conciliarse y así producir una teoría general aplicable a los líquidos, ya que los datos experimentales están a veces en desacuerdo. La razón principal de esta situación es la falta de una teoría completa sobre la base física del estado líquido sometido a estos esfuerzos, en el que las observaciones podrían ser comparables y afines.

La condición de inicio de la avalancha de electrones se obtiene de la equivalencia de la ganancia en energía de un electrón sobre su camino libre medio que se requiere para la ionización de la molécula.

$$eE\lambda = ch\nu \quad (5.12)$$

Donde  $E$  es el campo aplicado,  $\lambda$  es el camino libre medio,  $h\nu$  es la energía cuantizada de las pérdidas por la ionización de la molécula y  $c$  es una constante de ajuste del fenómeno.

**Tabla 2.** Fuerza eléctrica de algunos líquidos altamente purificados.<sup>23</sup>

<i>Líquido</i>	<i>Fuerza (MV/cm)</i>
Hexano	1.1-1.3
Benceno	1.1
Aceite óptimo	~1.0-4.0
Silicona	1.0-1.2
Oxígeno	2.4
Nitrógeno	1.6-1.88

<sup>23</sup>(KUFFEL, 2000)

### 5.3.6 Mecanismo de rompimiento dieléctrico para medios líquidos con partículas sólidas suspendidas

Los sólidos que se encuentren presentes en un líquido dieléctrico, ya sea como fibras o como partículas en suspensión, modifican la respuesta de este ante campos eléctricos, modificando el valor de tensión de disrupción, reduciéndolo considerablemente a medida que aumente la cantidad de partículas sólidas presentes en el líquido dieléctrico.

Para una partícula sólida de radio  $r$  y permitividad  $\epsilon$ , se considera que la fuerza que experimenta dicha partícula en el medio líquido se puede expresar por la siguiente fórmula:

$$F_e = \epsilon_{liq} r^3 \frac{\epsilon - \epsilon_{liq}}{\epsilon + 2 \cdot \epsilon_{liq}} E \cdot grad(E) \quad (5.13)$$

Donde  $F_e$  es la fuerza que experimenta el sólido inmerso en el líquido,  $\epsilon_{liq}$  es la permitividad del líquido y  $E$  es el campo eléctrico presente.

Para partículas sólidas conductoras (Con  $\epsilon \rightarrow \infty$ ) en un medio líquido dieléctrico, la ecuación 5.13 se transforma en la siguiente:

$$F_e = F_\infty = r^3 E \cdot grad(E) \quad (5.14)$$

La fuerza descrita anteriormente incide en la partícula para que se desplace hacia el campo eléctrico presente. El medio estudiado es un líquido que se presupone sea rico en partículas sólidas inmersas (glicerol subproducto de fabricación del biodiesel), luego es de suponer que éste tendrá un significativo número de iones o especies cargadas, provenientes de los catalizadores empleados para la reacción de transesterificación.

La fuerza eléctrica que experimentan las partículas en el líquido es contrarrestada en parte, por la viscosidad del mismo que le aplica un arrastre en una región de gran esfuerzo, por lo que la difusión cumple un rol importante con respecto al fenómeno de rompimiento eléctrico de los líquidos. Se puede expresar la fuerza de arrastre que experimenta una partícula en

$$F_{arrastre} = 6\pi r\eta v(x) \quad (5.15)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad,  $r$  es el radio de la partícula y  $v(x)$  es la velocidad de la partícula sometida al campo eléctrico.

Igualando  $F_{arrastre} = F_e$ , es posible obtener la velocidad de la partícula hacia la región de máximo esfuerzo, según se expresa en la siguiente relación:

$$v_E = \frac{r^2 E}{6\pi\eta} \cdot \frac{dE}{dx} \quad (5.16)$$

Para  $v_E$  la velocidad de la partícula hacia la región de máximo esfuerzo y  $E$  es el campo eléctrico aplicado y  $x$  es la dirección del movimiento de la partícula. La velocidad de deriva de la partícula por efecto de la difusión de la misma en el líquido está dada por la relación:

$$v_d = -\frac{D}{N} \cdot \frac{dN}{dx} = -\left(\frac{kT}{6\pi r\eta}\right) \cdot \frac{d}{Nd} \quad (5.17)$$

Donde  $v_d$  es la velocidad de deriva,  $N$  es la concentración de partículas en el líquido,  $k$  es la constante de Boltzmann y  $T$  la temperatura absoluta y se define  $D$  como un parámetro derivado la relación de Stokes-Einstein formulada así:

$$D = \frac{kT}{6\pi r\eta} \quad (5.18)$$

Después de igualar  $v_E$  con  $v_d$  se obtienen las expresiones que introducen la dependencia de la resistencia al rompimiento eléctrico en el tiempo, con respecto a la concentración de las partículas ( $N$ ).

$$\frac{r^2 E}{6\pi\eta} \cdot \frac{dE}{dx} = - \left( \frac{kT}{6\pi r\eta} \right) \cdot \frac{d}{Nd} \quad (5.19)$$

El valor crítico del campo eléctrico  $E(x)$  cuando ocurre la ruptura dieléctrica, se obtiene integrando la ecuación 5.19, para obtener las expresiones siguientes:

$$\left[ \frac{r^2 E^2}{2} \right]_{E=E(\infty)}^{E=E(x)} = - \left[ \frac{kT}{r} \ln N \right]_{N=N(\infty)}^{N=N(x)} \quad (5.20)$$

$$\frac{N(x)}{N(\infty)} = e^{r^3 \frac{[E(x)^2 - E(\infty)^2]}{2kT}} \quad (5.21)$$

Si el incremento en la energía electrostática (cuando las partículas están a la deriva alrededor de un lugar de máximo esfuerzo eléctrico) es mucho más pequeño que su energía cinética, la vida del aislamiento es infinita. Con el criterio anterior se fija la condición de máximo esfuerzo por la expresión:

$$r^3 [E(x)^2 - E(\infty)^2] = 2kT \quad (5.22)$$

Considerando el caso en el cual la no-uniformidad inicial es causada por una "joroba" hemisférica en el electrodo y suponiendo que el campo eléctrico  $E_0$  produce el rompimiento dieléctrico del líquido en un tiempo prolongado de exposición al mismo, entonces el máximo esfuerzo en el extremo de la esfera es

$3E_0$ , o en general el máximo esfuerzo es  $gE_0$ , donde  $g$  es un factor geométrico. Entonces la ecuación 5.22 puede ser escrita como:

$$r^3[g^2 - 1]E_0^2 = \frac{1}{4}kT \quad (5.23)$$

### 5.3.7 Mecanismo de rompimiento dieléctrico para medios líquidos con presencia de cavidades por gases disueltos

Los líquidos aislantes pueden contener gases disueltos en forma de burbujas. El proceso por el cual las burbujas se forman incluye los siguientes tópicos:

- Bolsas de gas sobre la superficie del electrodo.
- Cambios en la temperatura y presión.
- Disociación de productos por colisiones de electrones, provocando así la formación de productos gaseosos.
- Vaporización líquida por descargas tipo corona desde puntos de irregularidad de los electrodos.

El campo eléctrico en una burbuja, la cual está inmersa en un líquido aislante dieléctrico está dado por:

$$E_b = \frac{3E_0}{\varepsilon_{liq.} + 2} \quad (5.24)$$

Donde  $\varepsilon_{liq.}$  es la permitividad eléctrica del líquido,  $E_b$  es el campo eléctrico dentro de la burbuja de gas y  $E_0$  es el campo eléctrico en el líquido en ausencia de la burbuja. Cuando  $E_b$  se hace igual al campo de ionización del gas, ocurre la

descarga que lleva a la descomposición del líquido y el siguiente rompimiento dieléctrico del mismo.

Una expresión desarrollada para el modelo teniendo en cuenta la conductividad del medio ( $\sigma$ ) y el tamaño de la burbuja ( $r$ ), se presenta a continuación:

$$E_b = \frac{1}{\varepsilon_1 - \varepsilon_2} \left\{ \frac{2\pi\sigma(2\varepsilon_1 - \varepsilon_2)}{r} \left[ \frac{\pi}{4} \sqrt{\left( \frac{V_b}{2rE_0} \right) - 1} \right] \right\}^{1/2} \quad (5.25)$$

### 5.3.8 Factores que influyen en el rompimiento eléctrico de líquidos

Los mecanismos de rompimiento dieléctrico de líquidos analizados anteriormente para líquidos, son afectados en la práctica por diversos factores que ejercen una marcada influencia en el comportamiento del medio y en las condiciones que presenta el fenómeno.

Dentro de los factores influyentes en el fenómeno se pueden citar los efectos de la frecuencia de la tensión eléctrica ejercida sobre el medio, la temperatura y presión del medio, la separación de los electrodos y el área efectiva de formación del plasma, las características fisicoquímicas del medio líquido (pureza, conductividad eléctrica, partículas suspendidas, etc.), entre otros factores de menor influencia.

A continuación se presenta un esbozo de los principales factores citados anteriormente:

### **5.3.8.1 Influencia de la frecuencia y forma de la señal de tensión<sup>24</sup>**

Comparativamente, los líquidos considerados dieléctricos presentan un comportamiento diferente a los gases dieléctricos al ser sometidos a un campo eléctrico elevado capaz de inducir la disrupción eléctrica de estos medios, presentando un crecimiento de la fuerza dieléctrica del líquido al disminuir la duración de los pulsos de tensión.

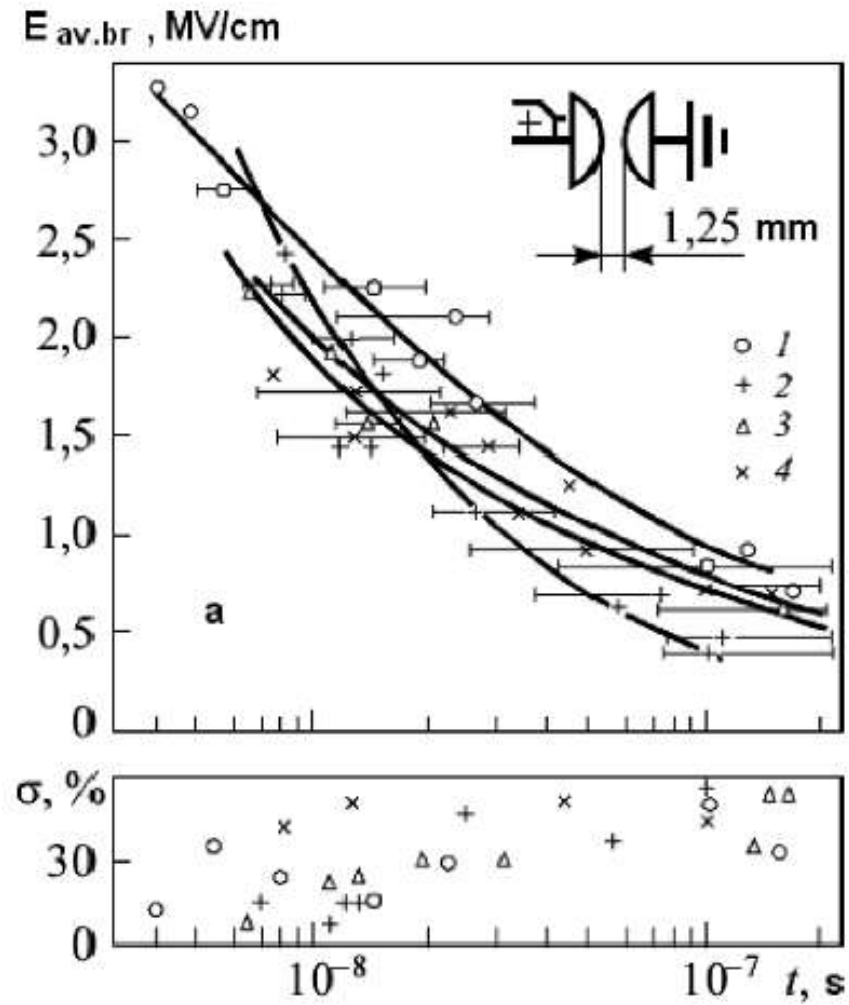
Para el caso específico de líquidos dieléctricos el canal de descarga es más estrecho y de una menor duración, por lo que el tiempo de duración de los pulsos de tensión debe ser pequeño para una alta eficiencia del proceso, siendo deseable una alta frecuencia de la señal de tensión aplicada al sistema de generación de plasma, cuando se quiera inducir el arco eléctrico en un medio líquido.

Las figuras 10, 11 y 12 muestran la respuesta en el tiempo de diversos líquidos puros ante un campo eléctrico aplicado del orden del campo eléctrico necesario para el rompimiento de los líquidos ensayados. Cada gráfica muestra la respuesta dada para diferentes tipos de electrodos y distancias entre electrodos. Es de resaltar que para líquidos puros la fuerza dieléctrica excede los 1 MV/cm hasta alcanzar los 4 MV/cm en un campo uniforme para el tiempo  $t=4\text{ns}$  con la distancia de separación inter-electrodos  $d=1,25\text{ mm}$ . Además se puede apreciar que líquidos con naturaleza química distinta tienen rigideces dieléctricas cercanas.

---

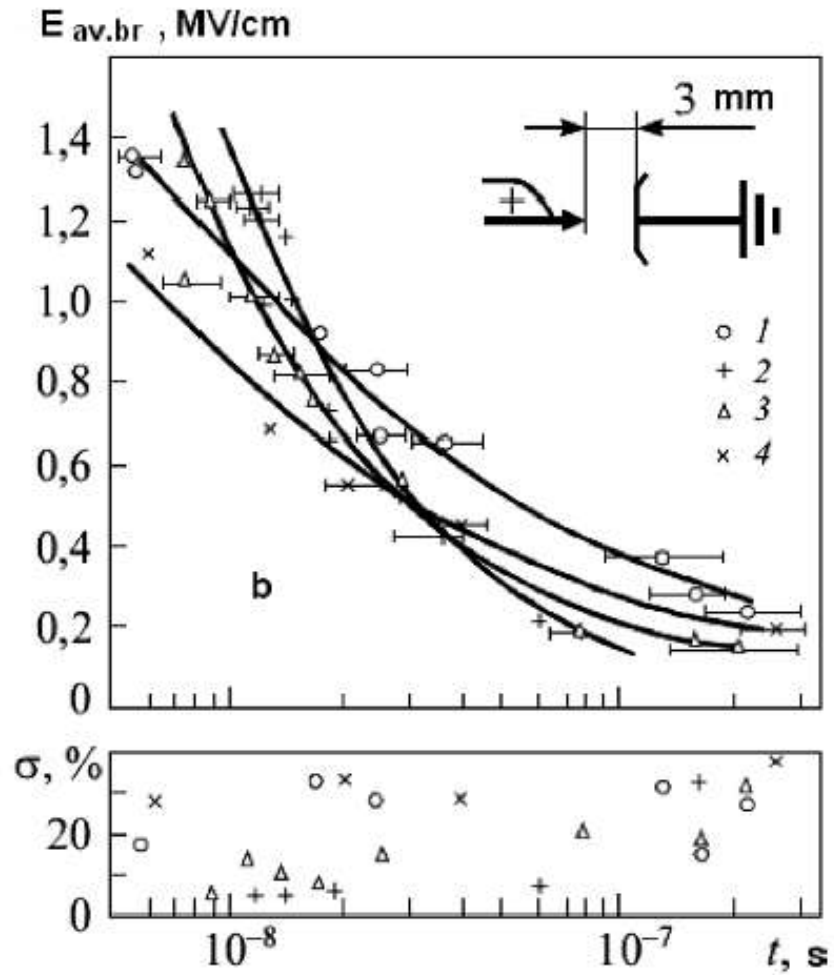
<sup>24</sup>(USHAKOV, 2007)

**Figura 10.** Relación entre el campo eléctrico de ruptura dieléctrica ( $E_{av,br}$ ) y la desviación estándar porcentual ( $\sigma\%$ ), en función del tiempo de duración del pulso eléctrico de rompimiento ( $t$ ).\*



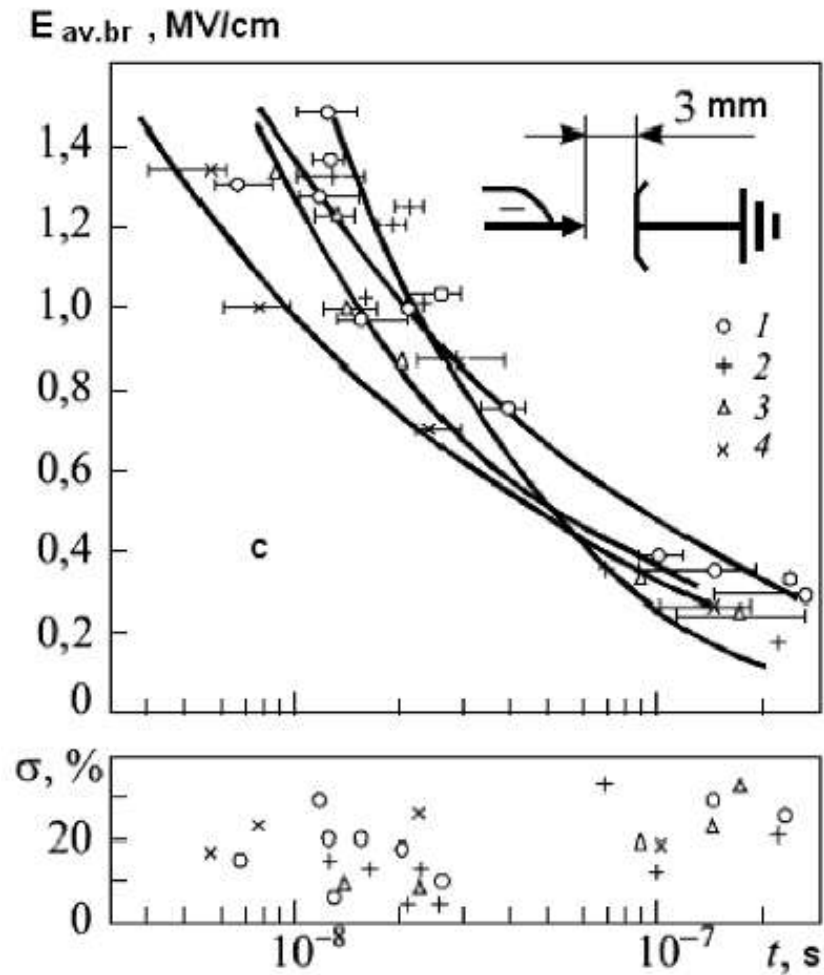
\*Para (1) aceite de transformador, (+) agua destilada, (Δ) glicerina y (x) aceite de castor; con electrodos tipo hongo y separación entre electrodos de  $d=1.25\text{mm}$ . **Fuente:** (USHAKOV, 2007)

**Figura 11.** Relación entre el campo eléctrico de ruptura dieléctrica ( $E_{av,br}$ ) y la desviación estándar porcentual ( $\sigma\%$ ) en función del tiempo de duración del pulso eléctrico de rompimiento ( $t$ ).



\*Para (1) aceite de transformador, (+) agua destilada, ( $\Delta$ ) glicerina y (x) aceite de castor; con electrodos tipo punta-placa (+/-) y separación entre electrodos de  $d=3$  mm. Fuente: (USHAKOV, 2007)

**Figura 12.** Relación entre el campo eléctrico de ruptura dieléctrica ( $E_{av,br}$ ) y la desviación estándar porcentual ( $\sigma\%$ ) en función del tiempo de duración del pulso eléctrico de rompimiento ( $t$ )\*.



\*Para (1) aceite de transformador, (+) agua destilada, ( $\Delta$ ) glicerina y (x) aceite de castor; con electrodos tipo punta-placa (-/+) y separación entre electrodos de  $d=3$  mm. **Fuente:** (USHAKOV, 2007).

La información de las figuras 10, 11 y 12 se puede modelar por la siguiente relación:

$$\log E_{br} = A - B \log t \quad (5.26)$$

Donde  $A$  y  $B$  son coeficientes específicos para cada líquido y tipo de separación de electrodos,  $E_{br}(t)$  es el campo eléctrico de ruptura dieléctrica de los líquidos evaluados (MV/cm) y  $t$  es el tiempo en nanosegundos.

Los coeficientes anteriormente citados se determinan según datos experimentales hallándose las siguientes expresiones:

$$A = k_1 - k_2 \log d \quad (5.27)$$

$$B = k_3 - k_4 \log d \quad (5.28)$$

Donde  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$  y  $k_4$  son coeficientes obtenidos de pruebas y  $d$  es la distancia de separación de los electrodos en centímetros. Los valores de estos coeficientes para líquidos típicos se consignan en la siguiente tabla:

**Tabla 3.** Valores experimentales de coeficientes utilizados en el modelo de campo eléctrico de ruptura dieléctrica ( $E_{br}$ ) en función del tiempo de duración del pulso eléctrico ( $t$ ), la separación ( $d$ ) y el tipo de electrodos.<sup>25</sup>

Líquido	Tipo de Gas	$k_1$	$k_2$	$k_3$	$k_4$
<b>Aceite de Transformador</b>	S-S	0.50	0.32	-0.41	0.029
	-N +P	0.41	0.49	-0.35	0.010
	+N -P	0.37	0.32	-0.35	0.042
<b>Agua Destilada</b>	S-S	0.28	0.82	-0.36	0.220
	-N +P	0.65	0.46	-0.22	0.060
	+N -P	--	--	--	--
<b>Glicerol</b>	S-S	0.25	0.50	-0.45	0.080
	-N +P	0.67	0.32	-0.11	0.320
	+N -P	0.53	0.35	-0.24	0.043
<b>Aceite de Castor</b>	S-S	0.38	0.35	-0.41	0.023
	-N +P	0.21	0.37	-0.44	0.110
	+N -P	0.23	0.39	-0.33	0.077

<sup>25</sup> (MESYATS, 2005)

Donde  $S$  es electrodo esférico,  $N$  es un electrodo puntiforme,  $P$  es un electrodo plano; los signos “+” y “-” corresponden a pulsos positivos y negativos respectivamente.

Para líquidos con propiedades de conductividad eléctrica moderada o alta (como el agua), la tensión de disrupción es aproximadamente igual que la tensión de ignición y el tiempo de ruptura puede calcularse de acuerdo a la siguiente relación:

$$t_d = \frac{C \cdot \rho}{0.24 \cdot a \cdot \gamma_o \cdot E_{br}^2} \quad (5.29)$$

Donde  $t_d$  es el tiempo de ruptura dieléctrica,  $E_{br}$  es el campo eléctrico de ruptura,  $C$  es la capacidad calorífica del líquido,  $\rho$  es la densidad del líquido,  $\gamma_o$  es la conductividad eléctrica del líquido,  $T_o$  la temperatura ambiente y  $a$  es un exponente que depende de la naturaleza del líquido. La ecuación anterior se desprende de la suposición que la temperatura de rompimiento dieléctrico tiende al infinito.

La conductividad eléctrica del líquido a una temperatura dada  $T$  se determina por la siguiente relación en la que  $T_o$  es la temperatura ambiente:

$$\gamma = \gamma_o \cdot e^{a(T-T_o)} \quad (5.30)$$

Para líquidos de alta conductividad eléctrica como el agua destilada se puede establecer la siguiente relación, teniendo en cuenta condiciones adiabáticas y una temperatura de rompimiento tendiente al infinito:

$$E_{br} = 10^3 \cdot t^{-\frac{1}{2}} \quad (5.31)$$

Con  $T=100^{\circ}\text{C}$ ,  $T_0=20^{\circ}\text{C}$ ,  $\gamma=2 \cdot 10^{-4} \Omega^{-4} \cdot \text{cm}^{-1}$  y  $a=0.011$ . Esta relación corresponde a condiciones de exposición a pulsos de no mayores a  $10 \mu\text{s}$  y distancias inter-electrodos en un rango de algunos milímetros hasta decenas de milímetros.

Para condiciones de exposición a pulsos de algunas decenas de microsegundos de duración, con electrodos con gran superficie efectiva (generando un campo eléctrico débil no uniforme), se puede expresar el campo eléctrico de ruptura por las siguientes expresiones:

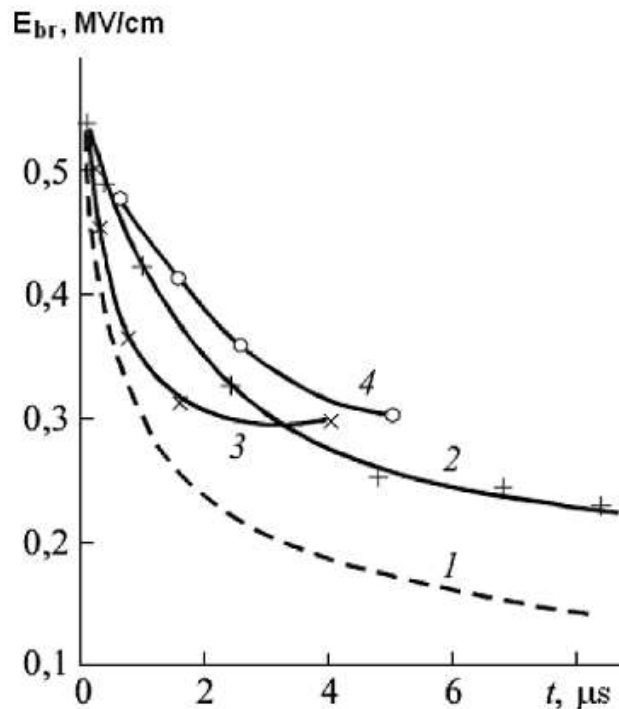
$$E_{br}^+ = \frac{0.3}{t^{1/3} S^{1/10}} \quad (5.32)$$

$$E_{br}^- = \frac{0.6}{t^{1/3} S^{1/10}} \quad (5.33)$$

Donde  $E_{br}^+$  y  $E_{br}^-$  son los campos eléctricos de ruptura para pulsos positivos y negativos respectivamente,  $t$  es el tiempo efectivo (en  $\mu\text{s}$ ) en el cual la fuerza del campo excede la cifra de  $0.63 \cdot E_{br}$ ,  $S$  es el área efectiva en  $\text{cm}^2$ . Las relaciones 5.32 y 5.33 son válidas siempre que la distancia inter-electrodos sea muy pequeña como para ignorar su influencia en el modelo del campo eléctrico presente.

Para distancias inter-electrodos grandes en combinación con campos eléctricos no uniformes débiles, la descarga se inicia sobre el ánodo. La figura 13 presenta los resultados experimentales correlacionados con las relaciones 5.32 y 5.33 para impulsos positivos y negativos respectivamente.

**Figura 13.** Relación de  $E_{br}$  vs.  $t$  para agua tratada (resistividad eléctrica:  $\rho=10^6\Omega\cdot\text{cm}$ ) en un campo uniforme.\*



\*Curva (1) para  $S_{eff}=50\text{ cm}^2$ , curva (2) para  $S_{eff}=45\text{ cm}^2$  y  $d=1.5\text{ cm}$ , curva (3) para  $S_{eff}=14\text{ cm}^2$  y  $d=0.5\text{ cm}$ , y curva (4) para  $S_{eff}=70\text{ cm}^2$  y  $d=1.5 - 5\text{ cm}$ .

Fuente: (USHAKOV, 2007)

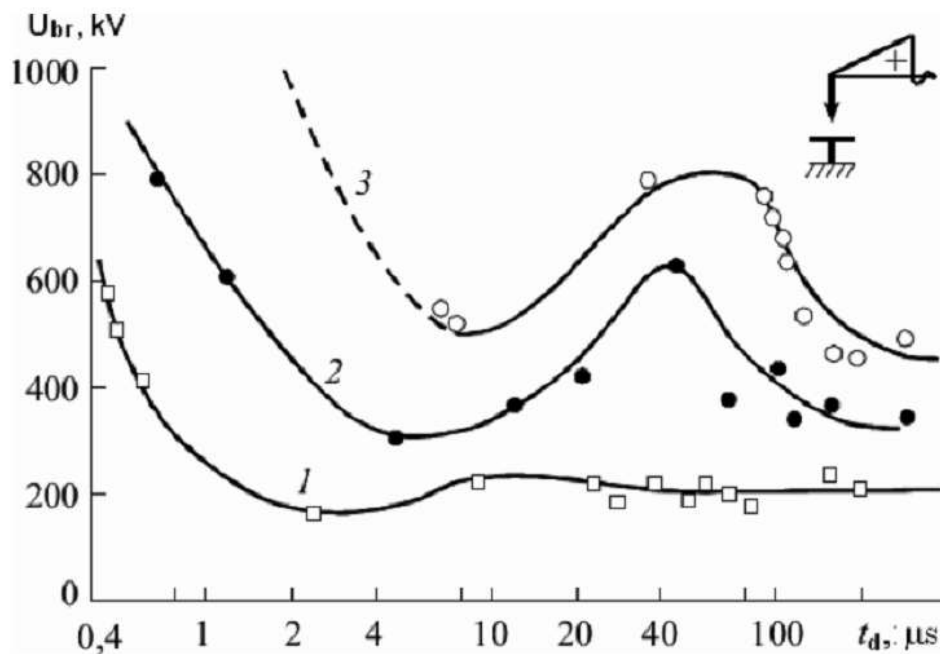
En la figura 13 se observa una mayor dependencia de  $E_{br}(t)$  con respecto a la duración de los pulsos en las relaciones 5.32 y 5.33 respecto a la data experimental. Las curvas teóricas y experimentales presentan una correlación más ajustada para tiempos de pulso entre 0.1 y 1 ns. Para tiempos de pulso del orden de los nanosegundos los valores de  $E_{br}$  experimentales son entre 2 y 5 veces mayores que los calculados por la relación 5.26.

Las condiciones de ruptura dieléctrica de los líquidos aislantes tienen fuerte dependencia con la forma (pendiente) y el ciclo útil de los pulsos.

Para pulsos de mayor duración (desde decenas a centenas de microsegundos) en medios líquidos de alta rigidez dieléctrica como los aceites aislantes de transformador, la relación entre el potencial de ruptura ( $U_{br}$ ) y el tiempo de duración de los pulsos ( $t$ ) tiene una forma más compleja que la de la figura 13.

La figura 14 muestra la característica potencial de ruptura-tiempo de pulso, para la descarga eléctrica en aceite aislante de transformador, en un sistema con electrodos tipo punta plano (+T -P), para distancias inter-electrodos de 5, 15 y 25 cm.

**Figura 14.** Característica tensión de ruptura-tiempo de duración de pulso, en un aceite de transformador para distancias inter-electrodos de  $d=5$  cm (1),  $d=15$  cm (2) y  $d=25$  cm (3).



**Fuente:** (USHAKOV, 2007)

Experimentalmente se ha determinado una tendencia al incremento de la tensión de ruptura-ignición con respecto a un decremento de la pendiente del pulso de tensión (incremento del tiempo de subida del pulso), para sistemas de

electrodos puntiformes de pequeño radio final. La tabla 4 ilustra el comportamiento de los coeficientes de pulso  $k$  con respecto al tiempo de subida y la duración total de un pulso de tensión aperiódico mayor al 50% de la tensión de ruptura de un aceite de transformador, en diferentes separaciones y configuraciones de electrodos.

**Tabla 4.** Valores del coeficiente de pulso  $k$  para electrodos aislados por un aceite de transformador.<sup>26</sup>

Configuración de separación de los electrodos	Longitud de separación Inter-electrodos [mm]	Coeficiente de pulso para relaciones de ancho de pulso [ $\mu$ s]				
		11/2600	150/3000	430/4000	2700/4400	50 Hz
<b>Electrodos Punta-Plano (Con un ángulo de barrido de 10° y un radio final de 1mm)</b>	10	1.01	1.04	1.07	1.09	0.51
	30	1.04	1.08	1.09	1.12	0.51
	50	1.02	1.05	1.06	1.08	0.48
	70	1.02	1.04	1.06	1.06	0.44
<b>Electrodos Punta-Punta</b>	10	1.1	1.2	1.27	1.32	0.5
	20	1.12	1.24	1.29	1.38	0.48
	40	1.11	1.25	1.31	1.41	0.5
<b>Cables enfrentados (20 x 20 mm) interceptados en un ángulo</b>	10	0.825	0.78	0.78	0.78	0.48
	20	0.844	0.82	0.82	0.82	0.38
<b>Cables enfrentados redondos (Diámetro de 20 mm)</b>	10	0.814	0.78	0.78	0.78	0.5

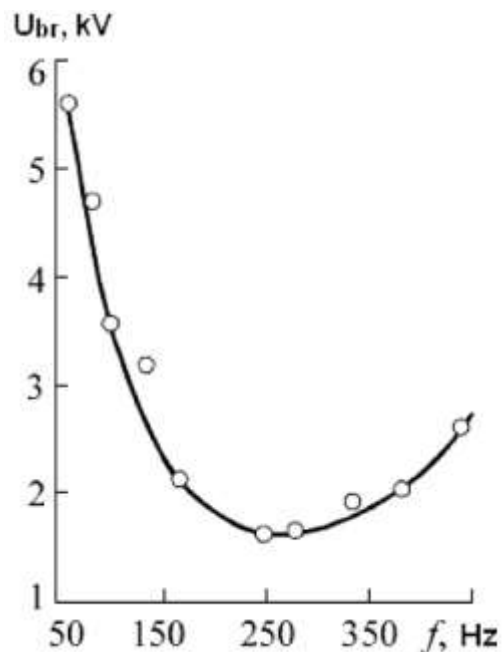
El coeficiente  $k$  es la relación entre el 50% de la tensión de ruptura dieléctrica del tipo de pulso dado con respecto al 50% de la tensión de ruptura para pulsos de forma 1.2/50 $\mu$ s.

<sup>26</sup> (USHAKOV, 2007)

De la tabla 4 se puede afirmar que la tensión de ruptura  $U_{br}$  depende solo débilmente de la forma de la cola de la señal pulsante (La tasa de disminución de la tensión). La influencia de oscilaciones de alta frecuencia sobre  $U_{br}$  superpuestas sobre la componente aperiódica del pulso o la tensión DC, es fuerte. El incremento en la componente de frecuencia más alta desde 0 a 100% (Como relación entre la componente RMS de la tensión AC y el valor medio de la componente DC de la tensión) reduce  $U_{br}$  por un factor de 1.5 a 2.

La figura 15 muestra la relación entre la tensión de ruptura dieléctrica versus la frecuencia  $f$  eléctrica de la tensión AC aplicada a los electrodos tipo punta-plano en un medio líquido de perfluorohexano.

**Figura 15.** Relación entre la tensión de ruptura dieléctrica ( $U_{br}$ ) y la frecuencia de la tensión AC ( $f$ ), aplicada a los electrodos tipo Punta-Plano en un medio líquido de perfluorohexano para una distancia inter-electrodos de 1.9mm.



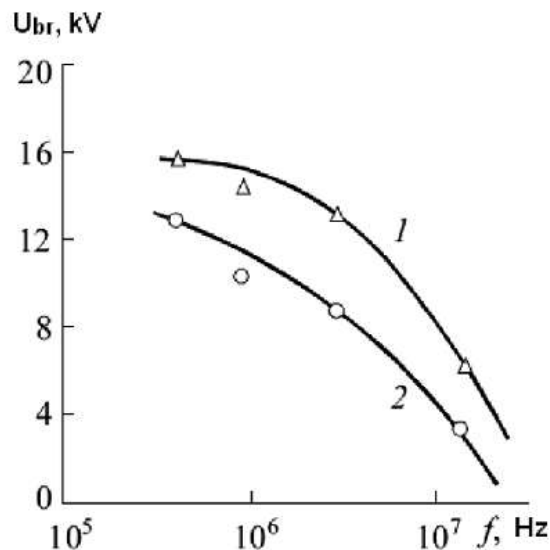
**Fuente:** (USHAKOV, 2007)

La dependencia de  $U_{br}$  para separaciones inter-electrodos que inducen un campo eléctrico altamente no uniforme con procesos intensos de formación de cavidades, como en los campos eléctricos AC de baja frecuencia, presenta la forma característica en “U” de la relación  $U_{br}$  versus  $f$ , con un punto de inflexión hacia frecuencias de varias centenas de Hertz.

Por otra parte a altas frecuencias (del orden de  $10^3$  hasta los  $10^6$  Hz) se presenta ruptura dieléctrica de líquidos polares con una significativa disminución de la rigidez dieléctrica del medio, a medida que el aumento de la frecuencia genera un incremento del calor liberado en el mismo.

La figura15 muestra la tendencia típica de la curva tensión de ruptura  $U_{br}$  respecto a la frecuencia  $f$ , para altas frecuencias en medios líquidos de diferente naturaleza química como el xileno y el aceite de transformador.

**Figura 16.** Relación entre la tensión de ruptura dieléctrica ( $U_{br}$ ) y la frecuencia eléctrica de la tensión AC ( $f$ ).\*



\*Aplicada a los electrodos esféricos en un medio líquido de Xileno (1) y aceite de transformador (2) para una distancia inter-electrodos de 1 mm.

**Fuente:** (USHAKOV, 2007)

Cabe señalar que el incremento de la frecuencia de la tensión altera las leyes que modela la rigidez dieléctrica del medio. Esto se ha manifestado experimentalmente al observar que la influencia de impurezas en el medio con respecto al campo eléctrico de ruptura  $E_{br}$  del mismo, se incrementa a medida que se incrementa la frecuencia de la tensión aplicada. Efectos similares se observan con la relación entre la temperatura ( $T$ ) del medio y la tensión de ruptura  $U_{br}$ , para la que ocurre un desplazamiento hacia altas temperaturas de la relación  $U_{br}(T)$  a medida que aumenta la frecuencia de la tensión aplicada.

### **5.3.8.2 Influencia de la polaridad de los pulsos de tensión**

El efecto de la polaridad de la tensión aplicada a los electrodos en la ruptura dieléctrica de los medios líquidos es significativo para algunos líquidos y su influencia es fuertemente dependiente de la naturaleza de los mismos, así como de la geometría del sistema.

Se puede decir que la variación de la polaridad de la tensión de ruptura del medio líquido genera dos valores distintos de la tensión de ruptura del material, que se simbolizan como  $U_{br}^+$  y  $U_{br}^-$ , para la tensión de ruptura ante pulsos positivos y negativos respectivamente.

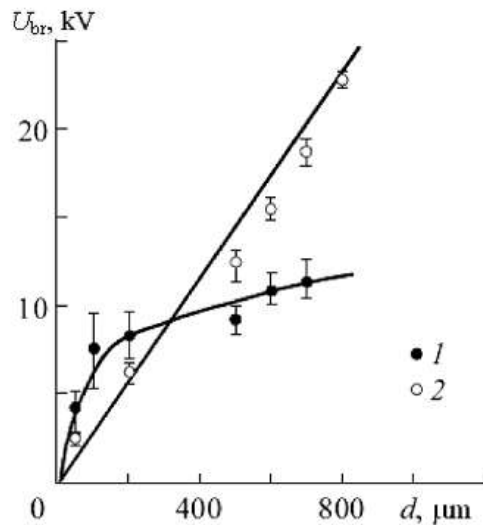
El comportamiento de los líquidos ante campos de distinta polaridad presenta tendencias documentadas. Se pueden citar por ejemplo las siguientes características del fenómeno:

- La ruptura dieléctrica de la mayoría de líquidos se presenta más fácilmente bajo impulsos de tensión con polaridad positiva que con negativa. Sólo para separaciones inter-electrodos del orden de decenas de micrones, es mayor la tensión de ruptura bajo polaridad positiva.

- El efecto de polaridad es mucho más notorio en líquidos de alta permitividad, siendo el caso contrario los de los líquidos con alta electronegatividad como el tetracloruro de carbono, el clorobenceno entre otros.

Estudios minuciosos han sido llevados a cabo sobre gases licuados e hidrocarburos líquidos con moléculas lineales y ramificadas. En tal sentido las figuras 17, 18 y 19; presentan los resultados de ensayos realizados en líquidos, con exposición a tensiones pulsantes del tanto del orden de los 0.1  $\mu$ s, como del orden de los 0.2 ns. Los electrodos empleados fueron punta-plano (radio final del electrodo tipo punta es del orden de los 0.3  $\mu$ m) y Plano-Esfera.

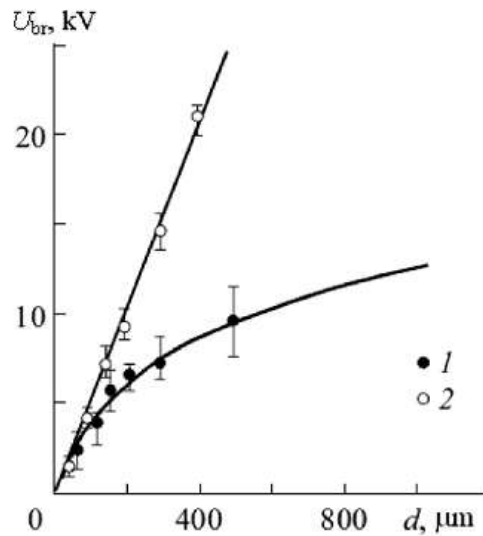
**Figura 17.** Relación entre la tensión de ruptura ( $U_{br}$ ) y la distancia inter-electrodos ( $d$ ) para un sistema de electrodos punta-placa en un medio líquido de hexano.\*



\*Con polaridades positiva (1) y negativa (2) de la señal de tensión aplicada en el electrodo tipo punta.  $r_0= 3 \mu$ m y  $\tau_p= 6 \mu$ s.

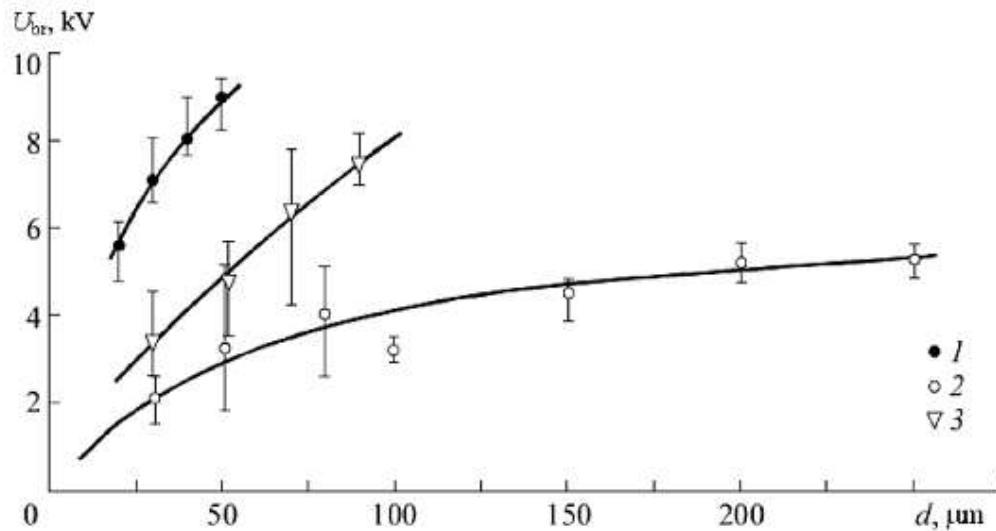
Fuente: (USHAKOV, 2007).

**Figura 18.** Relación entre la tensión de ruptura ( $U_{br}$ ) y la distancia inter-electrodos ( $d$ ) para un sistema de electrodos punta-placa en un medio líquido de neopentano.\*\*



\*\*Con polaridades positiva (1) y negativa (2) de la señal de tensión aplicada en el electrodo tipo punta.  $r_0 = 3 \mu\text{m}$  y  $\tau_p = 6 \mu\text{s}$ .  
Fuente: (USHAKOV, 2007).

**Figura 19.** Relación entre la tensión de ruptura ( $U_{br}$ ) y la distancia inter-electrodos ( $d$ ) para un sistema de electrodos punta-placa y esfera-placa (3) en un medio líquido de helio.\*



\*Con polaridades positiva (1) y negativa (2) de la señal de tensión aplicada en el electrodo tipo punta.  $r_0 = 3 \mu\text{m}$  y  $\tau_p = 6 \mu\text{s}$ .  
Fuente: (USHAKOV, 2007)

Las figuras 17, 18 y 19 permiten apreciar un comportamiento casi idéntico para el hexano en relación con el decano, para el cual se confirma la tendencia general de las tensiones de ruptura de  $U_{br}^+ > U_{br}^-$  para distancias inter-electrodos de menos de 400  $\mu\text{m}$  y de 550  $\mu\text{m}$  respectivamente. Para distancias mayores inter-electrodos la tendencia general se revierte, siendo  $U_{br}^+ < U_{br}^-$ . El neopentano por otra parte presenta la tendencia  $U_{br}^+ > U_{br}^-$  para casi cualquier distancia inter-electrodos.

**Tabla 5.** Efecto de la polaridad en la ruptura eléctrica iniciada en varios líquidos para un sistema de electrodos punta—plano y una temperatura ambiente de  $T=293\text{K}$ .<sup>27</sup>

Líquido	Tensión	Polaridad negativa		Polaridad positiva	
		$d$ [mm]	$U_{br}$ [KV]	$d$ [mm]	$U_{br}$ [KV]
Tolueno	0,9/40 $\mu\text{s}$	3	42,3	3	21,8
n-octano	0,9/40 $\mu\text{s}$	3	49,8	3	18,4
Clorobenceno	0,9/40 $\mu\text{s}$	3	27,3	3	25,5
Tetracloruro de carbono	0,9/40 $\mu\text{s}$	3	21,8	3	21
Aceite de Transformador	1,5/40 $\mu\text{s}$	12,7	86	25,4	60
Dodecibenceno	Tensión DC	9,6	100	9,6	42
	1,5/40 $\mu\text{s}$	12,7	175	25,4	122
	Tensión DC	9,6	110	9,6	62

### 5.3.8.3 Influencia de la distancia inter-electrodos

En sistemas aislantes como líquidos dieléctricos se presenta un fenómeno denominado *escalamiento*, el cual consiste en la relación directa entre la rigidez dieléctrica del medio con respecto a factores como la distancia inter-electrodos, el área efectiva de los electrodos y el volumen expuesto del medio aislante al campo eléctrico.

<sup>27</sup> (USHAKOV, 2007)

La relación que describe una aproximación a la influencia de la distancia inter-electrodos con respecto a la tensión de ruptura del medio se presenta a continuación:

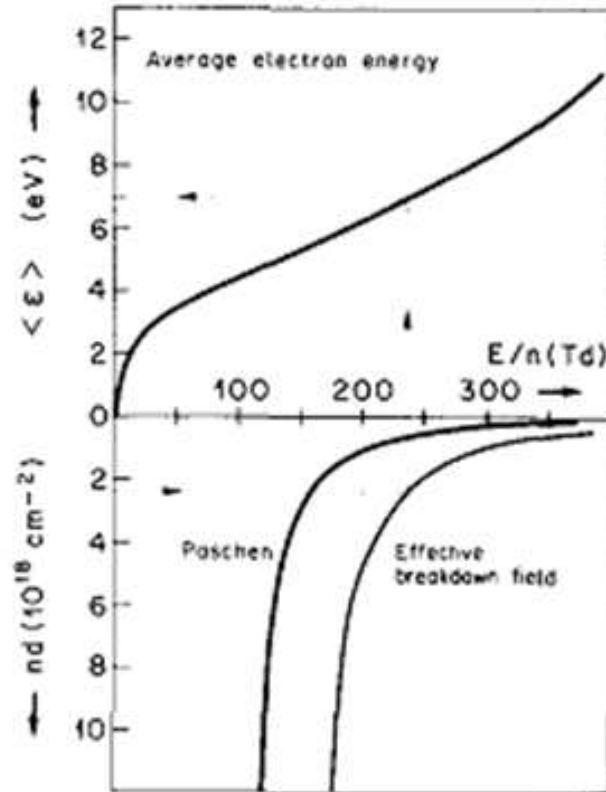
$$U_{br} = Bd^n \quad (5.34)$$

Donde  $B$  y  $n$  son constantes que dependen de las propiedades del medio dieléctrico y de las condiciones de ruptura de éste.

La ecuación 5.34 permite una aproximación al fenómeno estudiado, siendo los coeficientes  $B$  y  $n$ , valores particulares para la substancia estudiada. Se puede decir por ejemplo que  $n$  tiende a 1 para cambios de  $d$  en valores pequeños.

Los valores absolutos de la relación del campo de ruptura con respecto a la distancias inter-electrodo, se vuelven inexactos y de difícil modelado ante separaciones sub-milimétricas, donde las impurezas y otros factores de la naturaleza del medio, juegan un papel importante en el desarrollo del fenómeno. Este hecho no se presenta en medios gaseosos donde la relación entre distancia inter-electrodos y campo eléctrico de ruptura toma comportamientos más cercanos a los descritos por los modelos *Townsend*. La figura 20 muestra una relación tipo para este fenómeno en gases.

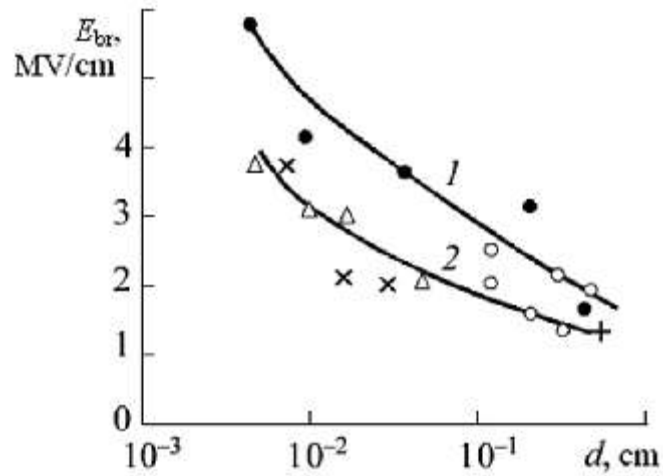
**Figura 20.** Dependencia del campo eléctrico y de la energía media del plasma generado por arco eléctrico, en función de la separación de los electrodos y de la densidad del gas pasa a estado plasmático.



**Fuente:** (ELIASSON, 1991)

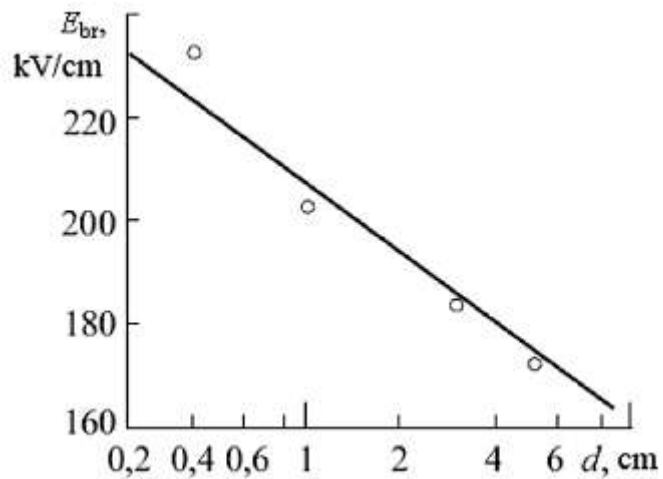
Las figuras 21 y 22 presentan los resultados experimentales del campo eléctrico en función de la distancia inter-electrodos para la ruptura para de un aceite de transformador y del agua destilada.

**Figura 21.** Relación entre el campo eléctrico de ruptura ( $E_{br}$ ) sobre la distancia inter-electrodos ( $d$ ).\*



\*Para el tiempo de pulso de tensión dado ( $t_d=10ns$ ) en un campo eléctrico uniforme, en los siguientes medios: (1) Aceite de transformador y (2) Agua destilada.  
Fuente: (USHAKOV, 2007).

**Figura 22.** Relación entre el campo eléctrico de ruptura ( $E_{br}$ ) sobre la distancia inter-electrodos ( $d$ ) en agua destilada.\*\*



\*\*Para tiempos de pulso de tensión del orden de microsegundos, en un sistema de electrodos planos.  
Fuente: (USHAKOV, 2007)

#### 5.3.8.4 Influencia del área de los electrodos

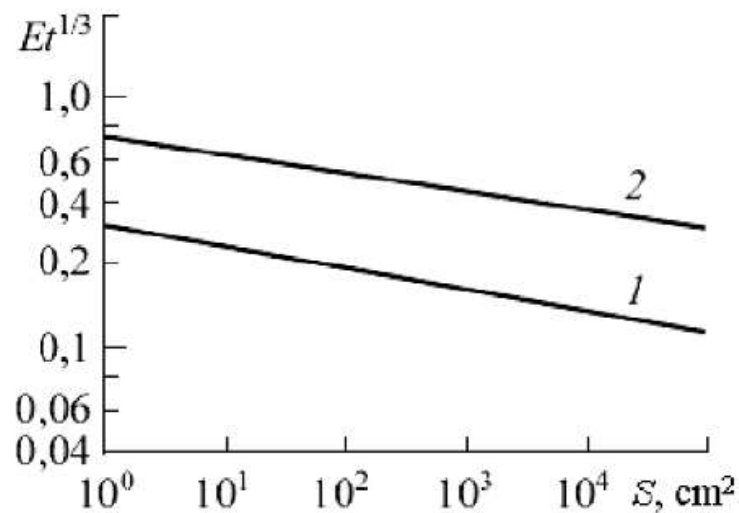
El área efectiva de los electrodos, por donde circula el arco eléctrico, constituye un factor de primer orden en el fenómeno, al definir en parte el camino del arco y la facilidad con que el mismo se presenta entre los electrodos ante un campo eléctrico.

$$E_{br} \approx S^{-n} \quad (5.35)$$

Donde  $n$  es un coeficiente que depende del tipo de electrodo y las condiciones de ruptura eléctrica del medio.

La figura 23 muestra la dependencia general de la rigidez dieléctrica de un aceite de transformador con respecto al área efectiva de los electrodos.

**Figura 23.** Relación entre la función  $E_{t1/3}$  y el área efectiva de los electrodos ( $S$ ) en aceite de transformador para campos débilmente uniformes (curva 1) y campos uniformes (curva 2).



Fuente: (USHAKOV, 2007).

### 5.3.8.5 Influencia de la naturaleza química de los líquidos

Los principales tipos de líquidos que se emplean en sistemas de aislamiento eléctrico son por lo general aceites minerales compuestos por parafinas, naftenos e hidrocarburos. Dichos líquidos manifiestan una ligera influencia de su densidad con respecto al fenómeno de formación del arco eléctrico. Una influencia más significativa la constituye la presencia de impurezas en el líquido, como factor de facilitación en la formación del arco eléctrico.

La conductividad eléctrica de los líquidos es otro factor en la facilidad relativa de ruptura eléctrica de los mismos ante campos eléctricos fuertes.

**Tabla 6.** Influencia de la naturaleza química de los líquidos en las conductividad eléctrica y rigidez dieléctrica de éstos, en condiciones de ruptura dieléctrica con electrodos punta placa (+T -P y -T +P) bajo pulsos de tensión de la forma 1.2/50  $\mu$ s\*.<sup>28</sup>

Líquidos	Fenol	Agua destilada	Etanol	Glicerol	Aceite para transformadores
$\gamma, \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-14}$
$v_1^+, \text{ cm/s}$	$2 \cdot 10^5$	$1,4 \cdot 10^6$	$2,5 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^5$	$1,3 \cdot 10^5$
$v_1^-, \text{ cm/s}$	$1,7 \cdot 10^5$	$6 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$3,3 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^6$

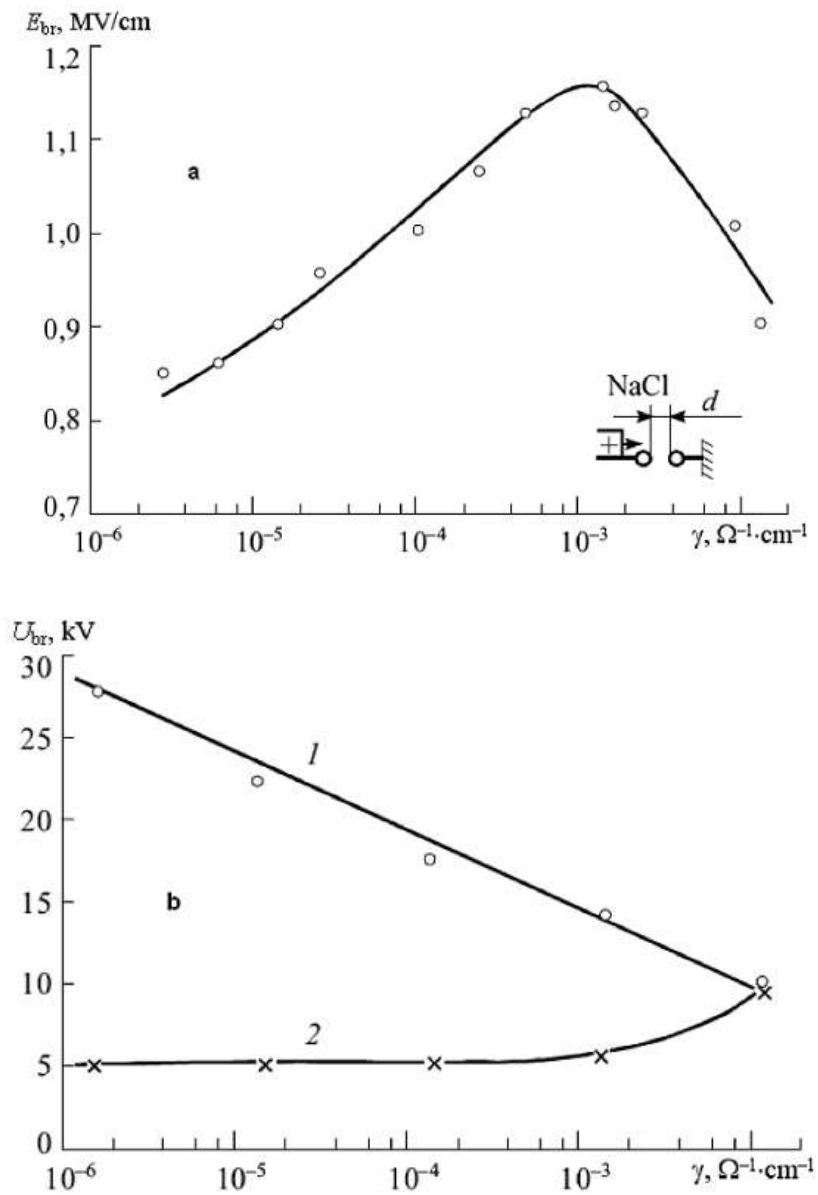
\*Para tiempos de duración  $t_d=30 \mu$ s y separación de electrodos  $d = 5 \text{ cm}$ .

Los electrolitos acuosos (como las sales) presentan un comportamiento más complejo que el resto de líquidos. Acá se pone de manifiesto que la tensión y el campo de ruptura eléctrica,  $U_{br}$  y  $E_{br}$  respectivamente), no depende solamente de la geometría de los electrodos y de otras condiciones físicas-químicas sino de la forma de los pulsos, los cuales se deforman considerablemente ante medios fuertemente electrolíticos.

La figura 24 muestra las curvas experimentales obtenidas de formación de arco eléctrico en cloruro de sodio acuoso (NaCl) para electrodos punta-plano.

<sup>28</sup>(USHAKOV, 2007)

**Figura 24** .Relación de dependencia entre la rigidez dieléctrica de una solución acuosa de NaCl con respecto a la conductividad eléctrica.\*



\*(a) En un campo uniforme para un periodo de pulso  $t_d = 70$  ns y una distancia inter-electrodos  $d = 0,02$  cm. En un campo no uniforme  $t_d = 90$  ns y  $d = 0,015$  cm para electrodos punta placa  $-T +P$  (curva 1) y  $+T -P$  (curva 2).

Fuente: (USHAKOV, 2007).

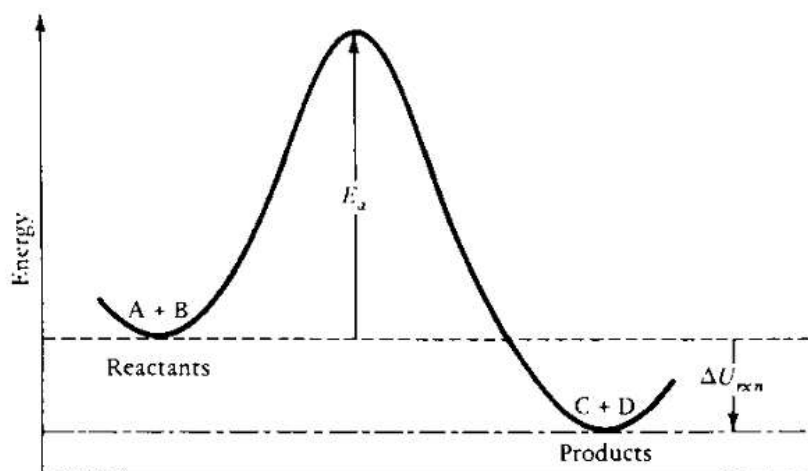
## 5.4 QUÍMICA DEL PROCESO ESTUDIADO

Un campo de importante desarrollo investigativo en la actualidad es el de los fenómenos plasma-químicos, campo sobre el que existe en la actualidad poca información experimental recabada. Esta carencia de información es determinante para la no disposición de modelos refinados sobre el fenómeno a nivel químico. A continuación se presenta una breve exposición de los modelos que existen sobre este tema.

Cada reacción plasma-química está caracterizada por unos factores y componentes principales, como son: Los reactivos, los productos, la presión, la temperatura, el calor de la reacción ( $H$  –entalpía- a presión constante,  $U$  –energía interna- a volumen constante) y el coeficiente de conversión  $\rho$ . El coeficiente de velocidad de reacción para las reacciones electrónicas (descritas en la tabla 7), puede calcularse una vez se conocen dos relaciones importantes:

- La distribución de energía electrónica.
- La “sección transversal”  $\sigma$  para el proceso.

**Figura 25.** Reacción  $A+B + C+D$ : Si uno de los reactivos es llevado a un estado excitado  $B = M^*$ , éste puede superar la energía de activación, iniciando la reacción.



**Fuente:** (ELIASSON, 1991).

Toda vez que la sección transversal se conoce como función de la energía o de la velocidad y la función de distribución electrónica se calcula al solucionar la ecuación de Boltzmann, el coeficiente de conversión se puede calcular mediante la resolución de la integral:

$$\rho = \langle v\sigma \rangle_f = \int_0^{\infty} v \cdot \sigma \cdot f(\varepsilon) d\varepsilon \quad (5.36)$$

Donde la función de distribución de energía electrónica ha sido normalizada como:

$$\int_0^{\infty} f(\varepsilon) d\varepsilon = 1 \quad (5.37)$$

En el caso de una reacción entre dos átomos o moléculas, el procedimiento de cálculo de la energía del proceso es básicamente igual. Para este caso se tienen que tener en cuenta los movimientos de ambas especies involucradas  $A$  y  $B$ , las cuales tienen sus funciones de distribución de cada especie.

La tabla 7 muestra las principales reacciones químicas generadas por efecto del plasma en el (los) reactivo (s). En este caso las especies excitadas están marcadas con asterisco (\*), los iones están signados (+o -),  $M$  es una especie intermedia temporal de colisión,  $A$  y  $B$  son átomos.

**Tabla 7.** Tipos de reacciones plasma-químicas más comunes.<sup>29</sup>

Reacciones Electrónico/Moleculares	
Excitación	$e + A_2 \rightarrow A_2^* + e$
Disociación	$e + A_2 \rightarrow 2A + e$
Acoplamiento	$e + A_2 \rightarrow A_2^-$
Acoplamiento Disociativo	$e + A_2 \rightarrow A^- + A$

<sup>29</sup>(ELIASSON, 1991)

Ionización	$e + A_2 \rightarrow A_2^+ + 2e$
Ionización Disociativa	$e + A_2 \rightarrow A^+ + A + e$
Recombinación	$e + A_2^+ \rightarrow A_2$
Desacople	$e + A_2^- \rightarrow A_2 + 2e$

---

**Reacciones Atómicas/Moleculares**

---

Disociación en Encierro	$M^* + A_2 \rightarrow 2A + M$
Ionización en Encierro	$M^* + A_2 \rightarrow A_2^* + M + e$
Transferencia de Carga	$A^+ + B \rightarrow B^+ + A$
Recombinación Iónica	$A^- + B^+ \rightarrow AB$
Recombinación Neutra	$A + B + M \rightarrow AB + M$

---

**Descomposición**

---

Electrónica	$e + AB \rightarrow A + B + e$
Atómica	$A^* + B_2 \rightarrow AB + B$

---

**Síntesis**

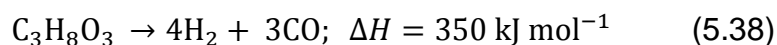
---

Electrónica	$e + A \rightarrow A^* + e$
	$A^* + B \rightarrow AB$
Atómica	$A + B \rightarrow AB$

Para describir la familia de electrones de una descarga volumétrica no equilibrada, la mayoría de las 4 familias de reacciones anteriores son importantes. En situaciones estacionarias, las pérdidas de electrones por acoplamiento y recombinación tienen que ser balanceadas por procesos de ionización y desacople. Para el tratamiento de estos sistemas se requieren computadores con suficiente capacidad de cálculo para resolver la ecuación de Boltzmann en los

sistemas generados, así como las ecuaciones diferenciales que describen las principales reacciones. (ELIASSON, 1991)

El proceso estudiado en este trabajo presenta una relación estequiométrica y de entalpía de formación según la siguiente ecuación <sup>30</sup>



Estudios diversos sobre la cinética de las reacciones plasma-químicas en medios líquidos muestran una gran influencia del pH del líquido en el fenómeno de formación del arco eléctrico y las reacciones químicas que ello conlleva. La tabla 8 ilustra este fenómeno, mostrando algunas constantes típicas de velocidades de reacción.

**Tabla 8.** Velocidad de reacción típica para reactores de Descarga Eléctrica en Fase Líquida.<sup>31</sup>

Reacción	Constante de velocidad de reacción [M <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
Formación de radical H <sub>2</sub> O → H + OH	10 <sup>-8</sup> -10 <sup>-10</sup>
Reacción radical-molécula OH· + compuesto orgánico → productos	10 <sup>9</sup> -10 <sup>10</sup>
Reacciones fotoquímicas (Agua natural) O <sub>2</sub> + compuesto orgánico → productos	10 <sup>9</sup> -10 <sup>10</sup>
Reacción electrón-molécula e <sub>aq</sub> <sup>-</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → OH· + OH	10 <sup>10</sup>
Reacción de Fenton Fe <sup>2+</sup> + H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> → OH· + OH + Fe <sup>3+</sup>	10 <sup>2</sup>
Reacción ozono – molécula	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>4</sup>

<sup>30</sup> (ZHU, 2009)

<sup>31</sup> (LOCKE, 2006)

---

**O3 + compuesto orgánico → productos**

<b>Reacción electrónica en medio acuoso</b>	$10^{10}$
$e_{aq}^- + \text{cloroformo} \rightarrow \text{productos}$	$<10^7$
$e_{aq}^- + \text{benceno} \rightarrow \text{productos}$	

Aparte de las reacciones que ocurren en el líquido sometido a un arco eléctrico, suceden reacciones en la interfaz entre gases y líquidos, las cuales ocurren por la interacción entre las moléculas de la atmósfera del sistema y las de la superficie del líquido con el arco eléctrico precursor de la formación del plasma.

Se han detectado especies formadas en las interfaces líquido-gas donde el ozono ( $O_3$ ), como especie estabilizada, es una de las más representativas.

## 5.5 METODOLOGÍA IDEF0<sup>32</sup>

La metodología *IDEF* (Integration Definition for Function Modeling) nació en la década de los años sesenta en el marco de la investigación de las Fuerzas Aéreas de Estados Unidos para mejorar la productividad de sus procesos. Su origen se remonta a la técnica llamada *SADT* (Structured Analysis and Design Technique), usada para la documentación, análisis y mejora de los procesos.

La utilidad de esta metodología radica en la posibilidad de representar las funciones que componen un proceso y relacionarlas entre sí de forma flexible, estructurada y jerarquizada, pudiendo prescindir de la duración temporal del proceso. La metodología IDEF0 es un tipo particular dentro de la familia de metodologías IDEF, de las cuales se pueden citar metodologías que van del IDEF0 hasta IDEF14. Entre éstas, el IDEF0 se destaca por la facilidad de trabajo y la generalización para el manejo e integración de todo tipo de procesos productivo.

---

<sup>32</sup>(GUEVARA, 2011)

### **5.5.1 Concepto de modelo**

Un modelo se puede definir como una representación de los diversos componentes de un sistema y su interacción en el mismo. El modelo desarrollado permite entender, analizar, mejorar, optimizar o reemplazar un sistema.

Por otra parte, los sistemas se constituyen mediante la interconexión de piezas interdependientes que al trabajar unidas realizan una función de utilidad. El modelo describe total o parcialmente el comportamiento de un sistema. Un modelo IDEF0 es una serie jerárquica de diagramas que desarrollan gradualmente niveles diferentes de detalle, la descripción de funciones y sus interfaces dentro del contexto de un sistema.

### **5.5.2 Componentes de modelado IDEF0**

- **Estructura Gráfica**

1. Cajas de Procesos o Funciones
2. Flechas
3. Diagramas

- **Cajas de Procesos o Funciones**

Un proceso o función es algo que ocurre en un periodo de tiempo y produce un resultado gracias a una entrada. Su representación gráfica es una caja.

#### **1) Flechas**

Las flechas (ICOM) representan la información que definen una actividad, actúan sobre la actividad o salen de ella para actuar en otra. Una actividad involucra las funciones dentro del modelo citadas en la tabla 9.

**Tabla 9.** Relación entre función en el modelo y ubicación en el diagrama IDEF0.

<b>Función</b>	<b>Ubicación en diagrama</b>
Transformación	Entradas
Normas específicas	Controles
Salidas	Salidas
Usado por	Mecanismos
Unión o Vínculos	Interfases

Se pueden distinguir los siguientes tipos de flechas empleadas en un diagrama IDEF0:

**a. Flechas de Entrada**

Representan información o material que será procesado o transformado por el proceso, función o actividad; produciendo como resultado una salida. Las flechas de entrada son opcionales, debido a la presencia de los controles que también son considerados como datos de entrada. *Las flechas de entrada son ubicadas a la izquierda de la caja.*

**b. Flechas de Control**

Son flechas que gobiernan o regulan el proceso, función o actividad permitiendo que las salidas tengan un mejor comportamiento y resultado dentro de la organización. Las flechas de control son considerados como datos de entrada para el modelo. Las flechas de control se ubican en la parte superior de la caja.

**c. Flechas de Salida**

Son consideradas como material o información producida por el proceso, función o actividad. Las salidas se consideran producto de la información de entrada. Las flechas de salida son ubicadas a la derecha de la caja.

#### **d. Flechas de Mecanismo**

Estas flechas identifican al recurso humano o físico necesario para llevar a cabo la función o actividad. Las flechas de mecanismo se ubican en la parte inferior de la caja.

#### **e. Flechas de Interface**

Se llama flechas de interface porque permiten unir 2 procesos, funciones o actividades a través de un flujo de información. Este tipo de unión se puede presentar de 4 formas distintas:

- Flecha de salida que se convierte en entrada para otra función o actividad.
- La salida puede representar controles necesarios para una determinada función o actividad.
- La salida de una actividad puede ser útil como control para otra, con la finalidad de permitir un funcionamiento correcto.
- La salida se puede transformar en una entrada necesaria para procesar datos y obtener otros.

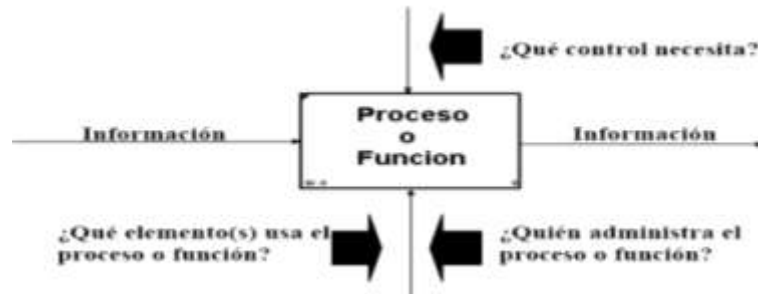
#### **o Diagramas**

Los diagramas se pueden clasificar de acuerdo a su nivel jerárquico y funcionalidad.

##### **1) Diagrama de Contexto**

Este diagrama permite definir todo el proceso o la función principal modelada. Por su papel en el formato es conocido como diagrama principal o diagrama padre.

**Figura 26.** Diagrama padre ejemplo.

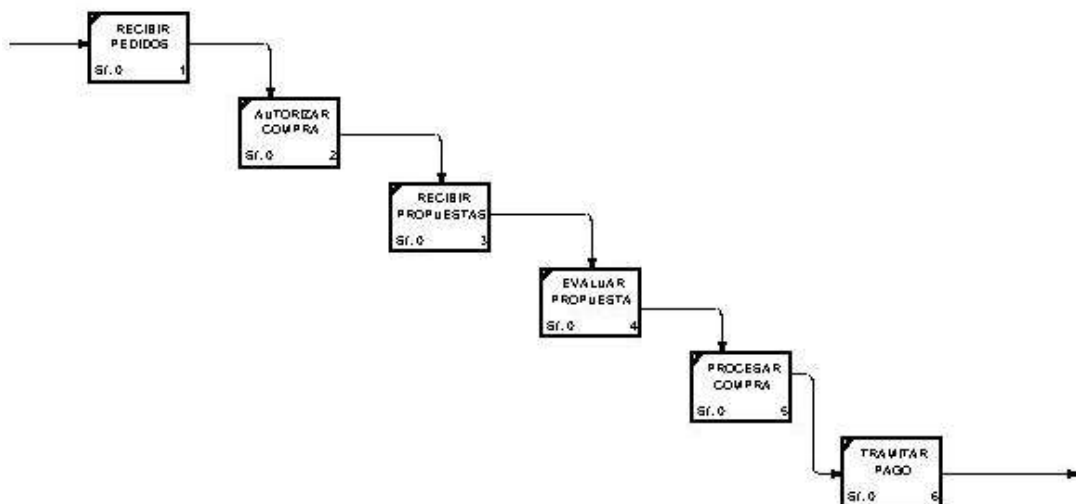


Fuente: (GUEVARA, 2011).

## 2) Diagrama de Descomposición

También conocido como diagrama de descomposición funcional. Este diagrama muestra los detalles del diagrama padre.

**Figura 27.** Diagrama de descomposición.



Fuente: (GUEVARA, 2011).

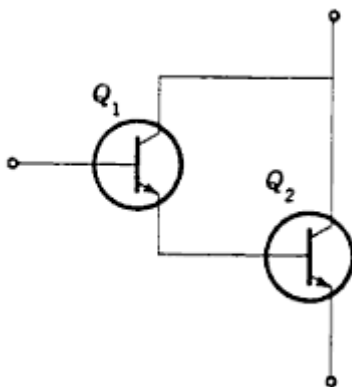
## 5.6 ELECTRÓNICA ASOCIADA

Los circuitos desarrollados en el prototipo de pruebas requirieron elementos electrónicos específicos, cuya funcionalidad pretendida se basaba en la necesidad de generar, amplificar y suministrar establemente una señal pulsante al sistema generador de arco eléctrico, la cual debía contar con la suficiente corriente, frecuencia y nivel de tensión para provocar este fenómeno sin sobresaltos, durante el desarrollo de las pruebas.

Con base en lo anterior se describe someramente el funcionamiento de los componentes eléctricos y electrónicos más importantes que fueron empleados a lo largo de la investigación.

### 5.6.1 Conexión Darlington

**Figura 28.** Esquema típico de conexión Darlington para 2 transistores BJT tipo NPN.



**Fuente:** (BROPHY, 1990).

La combinación de dos transistores iguales según la llamada *conexión Darlington* (figura 28) tiene muchas propiedades de circuito favorables. Obsérvese que  $Q_2$  está conectado directamente a  $Q_1$ , y que la tensión de base a colector de  $Q_2$

proporciona la tensión emisor-colector de  $Q_1$ . Además la intensidad de emisor de salida de  $Q_1$  es la intensidad de base de entrada de  $Q_2$ .

El circuito puede considerarse como un emisor seguidor  $Q_1$ , seguido por un amplificador de emisor común  $Q_2$ . La combinación proporciona una gran ganancia de intensidad. El circuito tiene también la ganancia de tensión del emisor común con la gran impedancia de entrada del emisor seguidor, propiedades que son, ambas, muy deseadas.

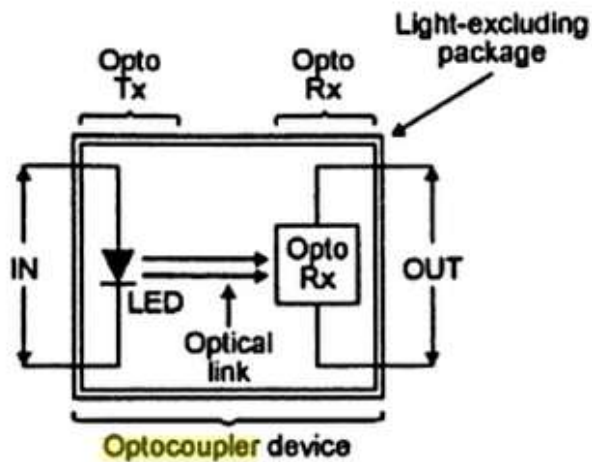
Para la mayoría de fines, la combinación puede considerarse como un solo dispositivo. En el mercado se encuentran unidades que encierran los dos transistores en una misma cápsula. Los potenciales de polarización adecuados se aplican mediante un circuito de polarización de transistor convencional, en el cual la combinación de  $Q_1$  y  $Q_2$  sustituye al transistor con emisor común.

### **5.6.2 El Optoacoplador**

El optoacoplador es un dispositivo que permite la transmisión de señales eléctricas vía transmisión óptica interna, permitiendo dentro de rangos de tensión y corriente dados la conexión de dos secciones de un circuito sin que haya conexión eléctrica entre ellos distinta a la del propio dispositivo.

La figura 29 muestra un esquema de la forma básica de un optoacoplador, donde la unidad Tx puede ser un diodo LED, y la unidad Rx puede ser un fototransistor, foto-FET, opto-TRIAC u otro dispositivo similar.

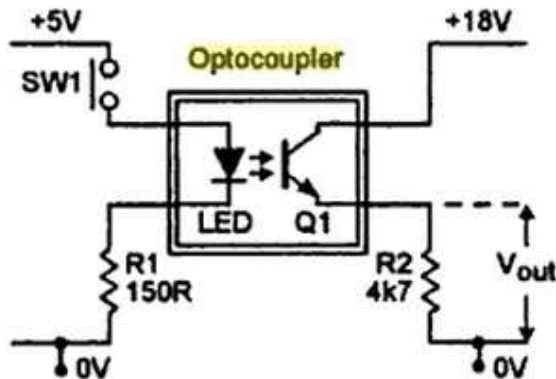
**Figura 29.** Forma básica de un dispositivo optoacoplador.



**Fuente:** (MARSTON, 1999)

Un esquema tipo de conexión de este dispositivo se presente en la figura 30, en la que SW1 está abierto y no circula corriente en el LED. La corriente de salida es controlada por la corriente de entrada, la cual se conecta al sub-circuito de control que compone el sistema. R1 y R2, mientras tanto, son resistencias que controlan las corrientes de entrada y salida respectivamente.

**Figura 30.** Esquema típico de conexión Darlington para 2 transistores BJT tipo NPN.



**Fuente:** (MARSTON, 1999)

## 5.7 ENSAYOS PARA CARACTERIZACIÓN DE TRANSFORMADORES

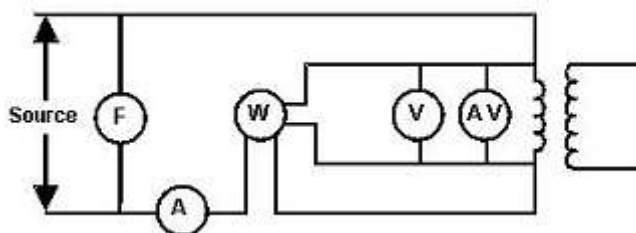
El prototipo eléctrico de pruebas utilizado en la presente investigación requirió la utilización de transformadores para la elevación de la tensión en las diversas etapas del circuito eléctrico que requerían de esta acción.

La caracterización del comportamiento eléctrico de un transformador, requiere numerosas pruebas, dentro de las cuales los ensayos de vacío y de cortocircuito suelen ser los más significativos.

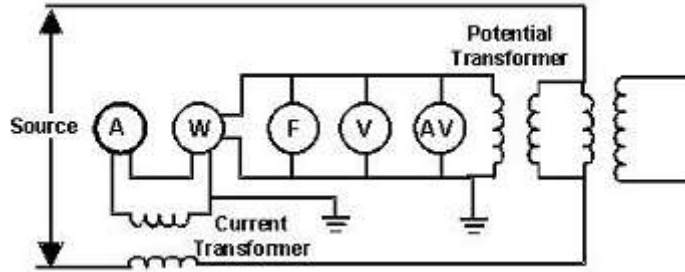
1. **Ensayo sin carga:** Por medio de este ensayo se determinan las pérdidas del núcleo del autotransformador, siguiendo el protocolo de ensayo de vacío descrito a continuación.

  - **Ensayo de Vacío:** Para este fin se realiza la conexión siguiendo el esquema de la figura 31 y se procede a la medición de la potencia en la entrada de alta tensión, la corriente en el lado de alta tensión y la tensión en bornes de los terminales de alta tensión.

**Figura 31.** Medición de pérdidas en el núcleo para un transformador monofásico.



a)



b)

a) Sin transformadores de instrumentación. b) Con transformadores de instrumentación  
**.Fuente:** (IEEE Std c57.123-2010, p. 10).

Para la figura 31, A es un amperímetro, W es un Wattmetro, F es un frecuencímetro, V es un Voltmetro y AV es un Voltmetro que mide valores de tensión RMS.

$$P_{FE} \approx P_0 = V_{bajanominal} \cdot I_a \quad (5.39)$$

$$R_{02} = \frac{V_{bajanominal}}{I_a} \quad (5.40)$$

$$X_{02} = \frac{V_{bajanominal}}{I_{vacío}} \quad (5.41)$$

La corrección por frecuencia se realiza teniendo en cuenta la frecuencia nominal de diseño del autotransformador y la frecuencia de operación del mismo durante el ensayo, según las siguientes expresiones:

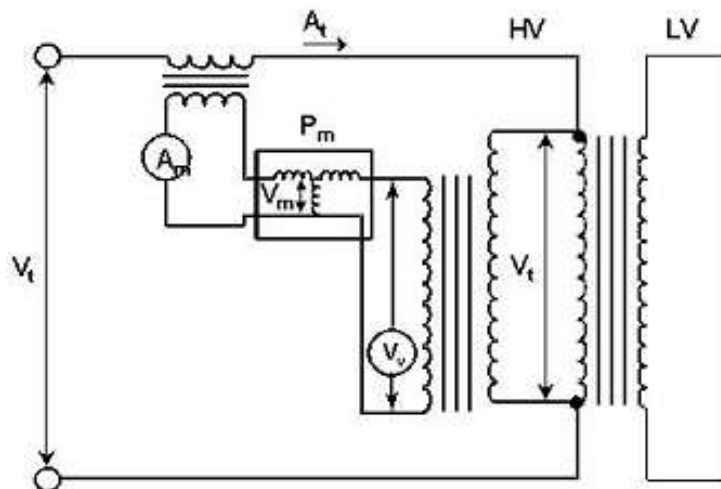
$$P_1 = k_1 \cdot f_1 + k_2 \cdot f_1 \quad (5.42)$$

$$P_2 = k_1 \cdot f_2 + k_2 \cdot f_2 \quad (5.43)$$

2. **Pérdidas en carga:** Por medio de este ensayo se determinan las pérdidas en los devanados del autotransformador, siguiendo el protocolo de ensayo de cortocircuito descrito a continuación.

- **Ensayo de Cortocircuito:** Para este fin se realiza la conexión siguiendo el esquema de la figura 32 y se procede a la medición de la potencia en la entrada de alta tensión, la corriente en el lado de alta tensión y la tensión en bornes de los terminales de alta tensión. Estas medida permite la valoración de las pérdidas por conducción del transformador.

**Figura 32.** Medición de pérdidas en los devanados para un transformador monofásico.



Fuente: (IEEE Std c57.123-2010, p. 19).

## 6 DISEÑO METODOLÓGICO

El presente trabajo de investigación contempla entre su alcance, el establecer la viabilidad del proceso de obtención de syngas a partir de la glicerina proveniente de la producción de biodiesel, utilizando un arco eléctrico como fuente de transformación. Lo anterior visto como una alternativa para el aprovechamiento de un recurso en sobreoferta (glicerina cruda), proponiendo un proceso

comparativamente más sencillo y económico que otros usados para el mismo fin y reseñados anteriormente.

Grosso modo se plantea la obtención del producto deseado a partir de la glicerina como materia prima y la energía eléctrica como agente transformador de la misma.

Considerando que una corriente eléctrica (que sería la manifestación más común de la energía eléctrica), por si misma no transformaría en syngas la glicerina, lo que se realiza es generar, a partir de la energía eléctrica, las condiciones necesarias para el rompimiento de los enlaces en el compuesto (glicerina cruda) y la eventual formación del gas de síntesis. Según la literatura revisada, en estas condiciones el plasma permite este rompimiento molecular y la posterior formación de los productos mayoritarios y termodinámicamente más estables (hidrógeno y monóxido de carbono).

Es bien sabido que cuando en un medio no conductor se produce una descarga por rompimiento de la rigidez dieléctrica del mismo se presenta lo que llamamos arco eléctrico que básicamente es el paso de dicho medio (en una región limitada) al estado de plasma, para el cual la conductividad eléctrica se incrementa en gran medida con respecto a la conductividad del material en condiciones normales. Aunque el arco eléctrico no es la única forma de obtener plasma, comparativamente con otros mecanismos es más sencillo y económico, y es por esto principalmente que se ha optado por esta alternativa.

Como ya se dijo lo que se requiere para obtener el arco eléctrico es romper la rigidez dieléctrica del mismo, es decir someter el material a una diferencia de potencial para la cual se producirá la descarga.

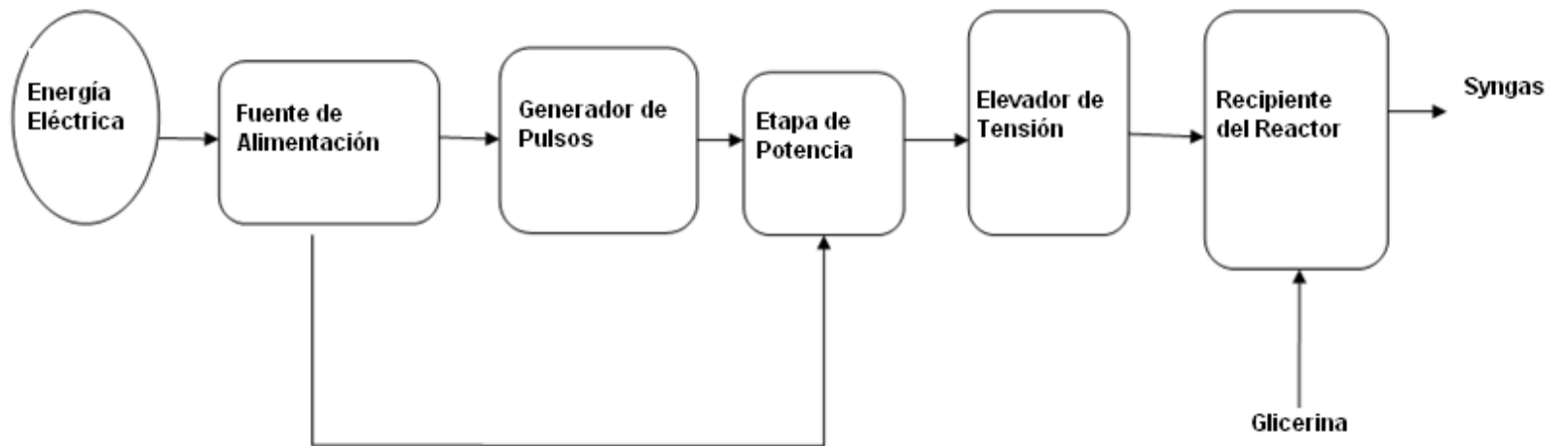
En este punto igualmente existen gran cantidad de alternativas que producirían estas condiciones, y es claro que para un eventual proyecto de desarrollo tecnológico sería imperante considerar y evaluar muchas de las mismas, sin

embargo en el marco del presente trabajo de pregrado, considerando la disponibilidad de equipos y recursos, y revisando la bibliografía correspondiente así como los resultados obtenidos de los experimentos de prueba para la medición de la tensión de disrupción aproximada de la muestra. Se determinó que el arco eléctrico se obtendría de un tren de pulsos de frecuencia variable los cuales se elevarían al nivel de tensión requerido por medio de un transformador.

Teniendo en cuenta lo anterior, el presente trabajo busca plantear un proceso preliminar que permita ser evaluado y cualitativamente establecer las condiciones y variables que resultarían determinantes para tener en cuenta un posterior desarrollo tecnológico.

A partir del análisis de la documentación disponible en el estado del arte y una revisión de la bibliografía correspondiente, y considerando la disponibilidad de recursos y equipos se estableció de manera preliminar que el proceso constaría de los elementos mostrados en la siguiente figura:

**Figura 33.** Mapa preliminar del proceso propuesto.



**Fuente:** Propia.

## 6.1 DESARROLLO EXPERIMENTAL

El experimento fue llevado a cabo siguiendo el diseño metodológico y teniendo en cuenta las limitaciones de los equipos de medida y de la infraestructura utilizada para la experimentación. Dichas limitaciones abarcaban las inherentes a los equipos de medición, las debidas al sistema de generación del plasma, y aquellas propias del sistema de aislamiento y captura de muestra del producto.

El objetivo del experimento es en última instancia el de obtener valores de energía eléctrica de entrada al sistema y de la energía de salida, representada en la cantidad de syngas producido. La correlación de los valores de energía de entrada y salida, así como la correlación del costo del funcionamiento proceso y del costo del producto obtenido, permiten tener una estimación de la viabilidad de este proceso, para las condiciones y limitantes con que se realizaron los experimentos.

El sistema de medida empleado se puede clasificar según la naturaleza de las variables a medir, como:

- Sistema de medición eléctrica.
- Sistema de medición química.
- Sistema de medición física.

El sistema de medición eléctrica consta de un wattmetro, un voltmetro, un amperímetro, un osciloscopio; los cuales se conectan a la entrada del circuito de generación de la señal pulsante (wattmetro, voltmetro y amperímetro) y a la salida del sistema de generación de señales (osciloscopio). En este apartado cabe mencionar que el wattmetro y el amperímetro son instrumentos analógicos que tienen limitada resolución, por lo que esto puede incidir en la precisión y exactitud de cálculos posteriores.

El sistema de medición química consta de dos medidores de gases para la detección y cuantificación del producto principal obtenido. El primer medidor es un analizador de hidrógeno que succiona muestra de gas por un puerto de entrada, acoplado con manguera a la salida del reactor. El segundo medidor es un analizador de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HCs); desarrollado para la medición de gases de combustión provenientes de automóviles. Éste último analizador de gases tiene un poder de succión de muestra mayor que el del primer medidor, llegando en menor tiempo a un estado de saturación del detector.

## **6.2 PRESENTACIÓN DE RESULTADOS**

Los resultados obtenidos son presentados como una función de la energía de entrada al sistema en función de la cantidad de syngas generado. El producto final de la investigación es la relación costo de energía de entrada vs. costo de energía de syngas producido, relación que muestra la viabilidad del proceso estudiado.

## **6.3 HIPÓTESIS PROPUESTAS**

La base fundamental del trabajo es establecer, considerando el planteamiento del problema, la exhaustiva revisión bibliográfica y el estado del arte realizado; la viabilidad de obtener syngas a partir de la glicerina usando un arco eléctrico como fuente de transformación. Con base en la consideración anterior se plantean las hipótesis siguientes:

### 6.3.1 Hipótesis general

Es posible determinar la viabilidad del proceso de obtención de gas de síntesis a partir de glicerol subproducto del biodiesel, mediante generación de plasma por arco eléctrico en un prototipo de pruebas que permita variaciones de la frecuencia de la tensión suministrada, la variación de la distancia entre electrodos y el tiempo de operación del proceso.

### 6.3.2 Hipótesis derivadas

Conociendo la tensión requerida para la generación de arco eléctrico y la cantidad producto obtenido con respecto a la distancia entre electrodos, se considera posible determinar experimentalmente la relación de la cantidad de producto obtenido y la energía consumida para el proceso realizado en el prototipo de pruebas; según el diseño experimental que incluya ensayos a diferentes distancias de los electrodos, según un rango de valores permitido.

## 6.4 TRATAMIENTO DE LAS MUESTRAS

- **Selección de las muestras:** Las muestras de glicerol remanente del proceso del biodiesel fueron obtenidas de una de las empresas más importantes de la región: BIDESAN. Estas muestras fueron solicitadas a las empresas y se almacenaron y dispusieron de las mismas considerando las mayores precauciones para mantener su integridad y propiedades originales
- **Rotulado de las muestras:** Se rotularon las muestras indicando los siguientes ítems: Origen, lote, fecha de obtención de la matriz, fecha de

recepción de la muestra, cantidad de la muestra, técnica de muestreo, observaciones.

- **Almacenamiento:** Se mantuvo las muestras en un recinto cerrado, resguardadas de la luz y la humedad, guardándolas en recipientes herméticos, nuevos y de plástico.

## 6.5 CONTEXTO DEL EXPERIMENTO GENERAL

### 6.5.1 Variables de interés

Las variables que fueron monitoreadas para los tratamientos estudiados son: tiempo de operación, potencia de entrada, tensión RMS de entrada, corriente RMS de entrada y la concentración del monóxido de carbono (CO), hidrógeno gaseoso (H<sub>2</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e hidrocarburos gaseosos (HCs) producidos.

- **Variables eléctricas:**

Se requiere la medición de potencia de entrada del circuito generador de arco eléctrico del reactor. Se propone la utilización de un wattmetro que mida la potencia eléctrica a la entrada del sistema. Para la medición de dichas variables se listo los equipos que se estimó convenientes y/o necesario para una correcta lectura las mismas:

- **Wattmetro:** Equipo destinado a la medición de potencia del sistema generador de alta tensión (En la entrada). El equipo se usa para tomar el consumo de energía (en watts) de todo el sistema.
- **Osciloscopio digital:** Equipo usado para monitorear la forma de onda y medir las tensiones.

- **Ampere-metro:** Equipo para determinación de corrientes en circuito generador de formas de onda y en el arco eléctrico
- **Multímetro convencional:** Equipo destinado a la medición de tensiones en baja tensión en el circuito generador de arco eléctrico, además de otras variables eléctricas para monitorear el funcionamiento del sistema.

- **Variables químicas:**

Dentro de las variables químicas de interés en el experimento está la cantidad de syngas y de otras especies químicas producidas durante cada ensayo. Enmarcado lo anterior en la disponibilidad de los equipos de medición, se procedió a medir la concentración de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos gaseosos e hidrogeno presentes en el recipiente del reactor al concluir cada ensayo.

Para medir la concentración del CO, CO<sub>2</sub> y los HCs. Presentes se empleó un analizador de gases marca HORIBA<sup>33</sup> propiedad del CEIAM (Centro de investigaciones ambientales de la UIS.

Para medir el hidrógeno gaseoso se utilizó un detector de Hidrógeno marca CROWCON<sup>34</sup> propiedad de la Escuela de Ingeniería Química de la UIS.

- **Variables físicas:**

- **Cantidad de muestra:** Se registró la cantidad de muestra empleada en cada ensayo, mediante la medición de la altura ocupada en el reactor de dimensiones conocidas de manera que se obtenga el volumen de la muestra que hay dentro del reactor.

---

<sup>33</sup> <http://www.horiba.com/us/en/automotive-test-systems/products/emission-measurement-systems/portable-emission-analyzers/details/mexa-584i-826/>

<sup>34</sup> <http://www.sgequipos.com.ar/documentos/tetra.pdf>

- **Tiempo de operación:** Tiempo de duración de cada ensayo. Esto significa tiempo en que hay generación de producto o tiempo de conexión del reactor. Se empleó un cronómetro convencional con precisión de centésimas de segundo.

### **6.5.2 Protocolo de Experimentos**

El objetivo de los experimentos planteados fue recabar datos que mostrasen la interrelación de las variables del proceso. Esto último fue obtenido en parte, al estar el experimento enmarcado dentro de las contingencias de los ensayos realizados. Se plantearon diversos escenarios y tratamientos para un ejercicio de proyección del proceso tipo en un proceso piloto. Los resultados de cada escenario y tratamiento se tabularon siguiendo un orden establecido para su posterior análisis.

Las tablas obtenidas de cantidades de producto medido (syngas) en relación a la energía de entrada, para condiciones específicas de cada ensayo, corresponden a tratamientos preseleccionados del experimento para valores representativos de las variables de interés. Esta data se correlacionó con los costos de entrada y salida del sistema para escenarios de precios igualmente representativos, permitiendo calcular para cada ensayo (correspondiente a un tratamiento y escenario particulares), los valores de la eficiencia energética y económica del proceso.

### **6.5.3 Cuantificación del Syngas generado**

Se buscó determinar, bajo condiciones controladas, la cantidad y proporción de especies del syngas generado, por medio de ensayos ideados para el monitoreo integral del proceso y sus resultados.

#### 6.5.4 Materiales y equipos utilizados

Para la realización de la experimentación se requirió el uso de materiales y equipos específicos, los cuales se reseñan a continuación:

- Muestras de glicerol (2).
- Glicerol de alta pureza (2),
- Circuito generador de alta tensión.
- Reactor plasma-químico.
- Wattmetro convencional.
- Multímetro convencional (2).
- Amperímetro.
- Osciloscopio digital.
- Analizadores de gases (2).
- Fuente de corriente alterna de 120V.
- Generador de señales.

**Tabla 10.** Equipos empleados en los ensayos realizados.

<b>Equipo</b>	<b>Maca / modelo</b>	<b>Finalidad</b>
<b>Generador de Señales</b>	HeeHitech	Generación de señal pulsante en baja tensión
<b>Analizador de Gases</b>	HORIBA / MEXA-584L	Medición de CO, CO2 y HCs
<b>Analizador de Hidrógeno</b>	CROWCON / Tetragas - Detector H2	Medición de H2 generado
<b>Wattmetro</b>	De Lorenzo	Medición de potencia de entrada
<b>Ampermetro</b>	De Lorenzo	Medición de corriente de entrada
<b>Voltmetro</b>	MaxTech / Digital	Medición de tensión de entrada

<b>Osciloscopio</b>	Gentek / Analógico	Monitoreo de forma de señal pulsante generada
---------------------	-----------------------	---

### **6.5.5 Variables controladas**

Como se presenta en el capítulo 5, la formación del fenómeno de plasma en líquidos vía arco eléctrico tiene múltiples factores influyentes, que van desde el sistema mismo de generación del plasma, hasta la naturaleza de la muestra y las variables ambientales del entorno de las pruebas.

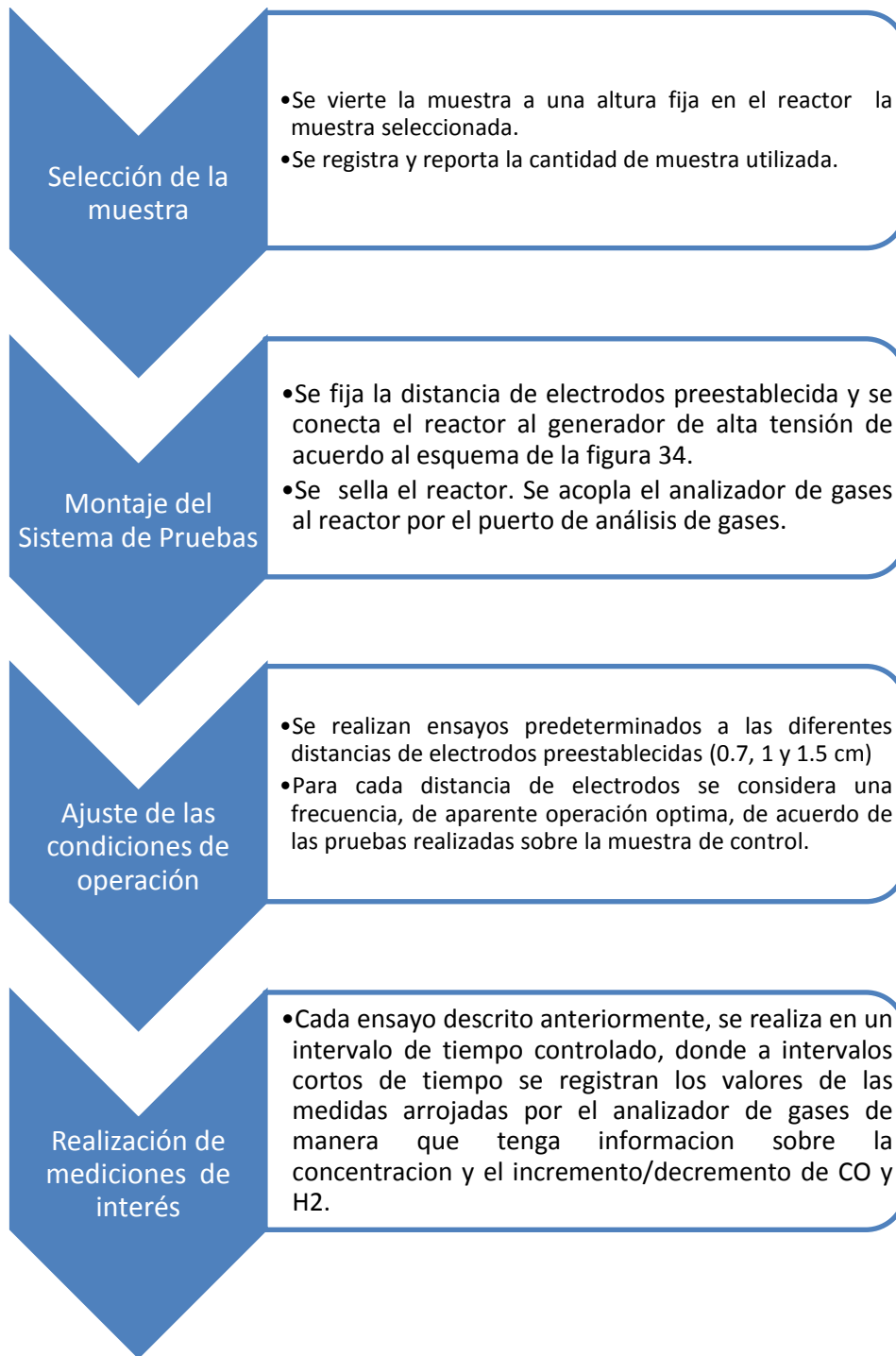
Cabe anotar la importante influencia en el comportamiento del fenómeno de factores como la separación y el área efectiva de los electrodos, la frecuencia, polaridad y forma de onda de la señal de tensión precursora del arco eléctrico; la naturaleza fisicoquímica de la muestra; entre otros. En tal sentido se monitorearon con los equipos de medida disponibles las siguientes variables y características de interés: La forma de onda, frecuencia y amplitud de la señal de entrada; la separación de electrodos; el tiempo de duración de las pruebas y la configuración de los electrodos.

### **6.5.6 Procedimiento**

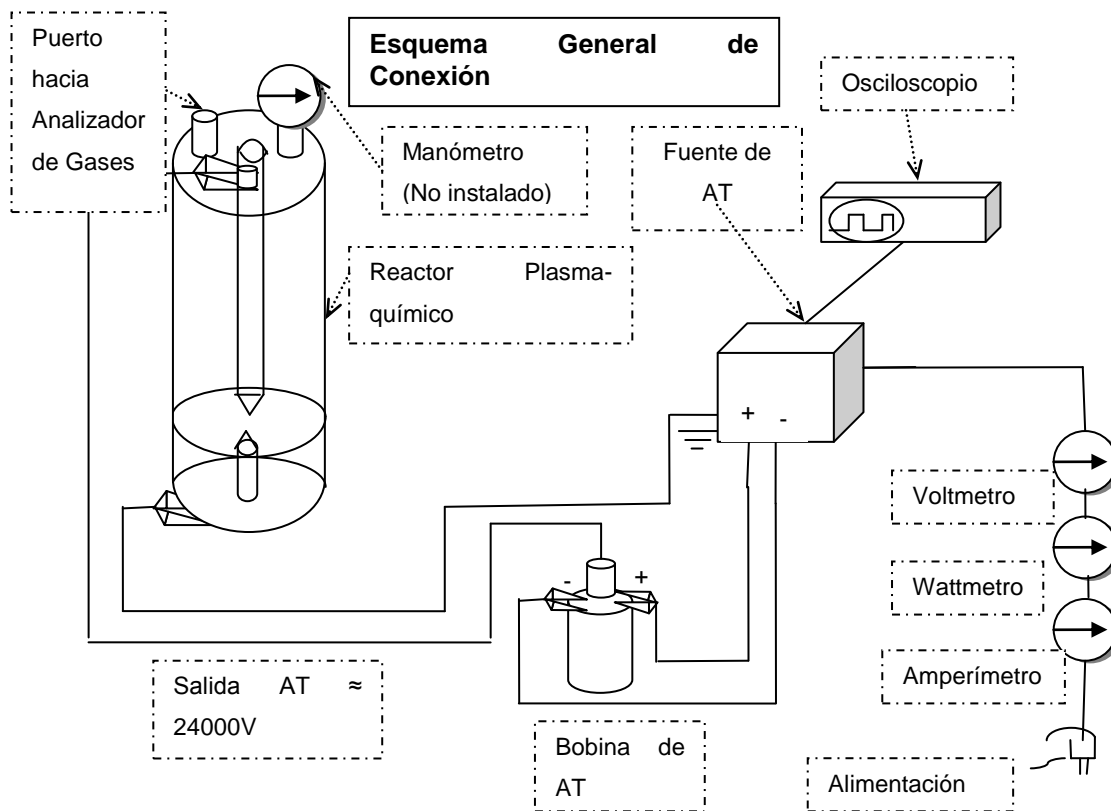
En aras de comprobar las hipótesis planteadas para la medición de las variables de interés se realizó un diseño experimental y un protocolo de pruebas general derivado del diseño experimental.

La figura 34 muestra dicho protocolo de ensayos, cuyas directrices, son de carácter flexible y sujeto a modificaciones que a bien surgieran a lo largo de la realización de los ensayos. En el mismo sentido la figura 35 muestra un esquema general de conexión del experimento realizado.

**Figura 34.** Diseño metodológico de cuantificación del syngas generado.



**Figura 35.** Esquema general de conexión del sistema empleado para experimentación.



**Fuente:** Propia.

- **Manejo Estadístico de Resultados:** En este apartado se presenta una metodología de análisis e interpretación de resultados de los ensayos realizados. Se tienen en cuenta modelos de influencia de hasta 3 variables para el modelado del proceso, los cuales son frecuencia de la tensión, tiempo de operación y distancia de los electrodos. Las variables de interés monitoreadas son: La potencia de entrada y la cantidad de Syngas obtenida de cada ensayo.
- **Valoración de influencia de la forma de la tensión de entrada:** La verificación de la influencia de la tensión de entrada tendrá en cuenta por la

toma de medidas de cantidad de Syngas generado ante las diferentes frecuencias de operación que permite la fuente.

- **Valoración de influencia de la separación entre electrodos:** La verificación de la influencia de la separación de los electrodos se tiene en cuenta por un procedimiento análogo al de la influencia de la forma de la tensión de entrada. El sustento para tener en cuenta la influencia de esta variable de control, lo proporciona la literatura, y los diferentes modelos de disrupción eléctrica en medios líquidos reportados a la fecha.
- **Valoración de influencia del tiempo del proceso:** Para este efecto se busca tener un registro en intervalos de tiempo predefinidos del syngas generado en cada tipo de ensayo realizado y de la energía de entrada al sistema, para la determinación y el contraste de la influencia de esta variable en el proceso, en relación al resto de variables de control consideradas.
- **Verificación de influencia conjunta de las tres variables de control principal:** En este análisis se presenta una valoración estadística del efecto combinado de las tres variables de control: separación de los electrodos, frecuencia de tensión de entrada y tiempo de duración del proceso.

### **6.5.7 Criterio de selección de equipos**

Dentro de los posibles diseños conocidos de circuitos de alta tensión se presentan múltiples opciones disponibles para la consecución de unas tensiones y corrientes adecuadas (dentro del rango suministrado por las pruebas de disrupción eléctrica del material en estudio), cuyas diferencias principales son los costos y la robustez del diseño.

Desde ese punto de vista se procedió a construir un circuito simple pero eficaz, de dos etapas: Una etapa de baja tensión para generación de pulsos variables en

frecuencia y una etapa subsiguiente de potencia para la amplificación de los pulsos en corriente. Este circuito se acopla finalmente a un transformador elevador adecuado para tal fin en cuanto a aislamiento y relación de conversión.

### **6.5.8 Diseño del sistema eléctrico propuesto**

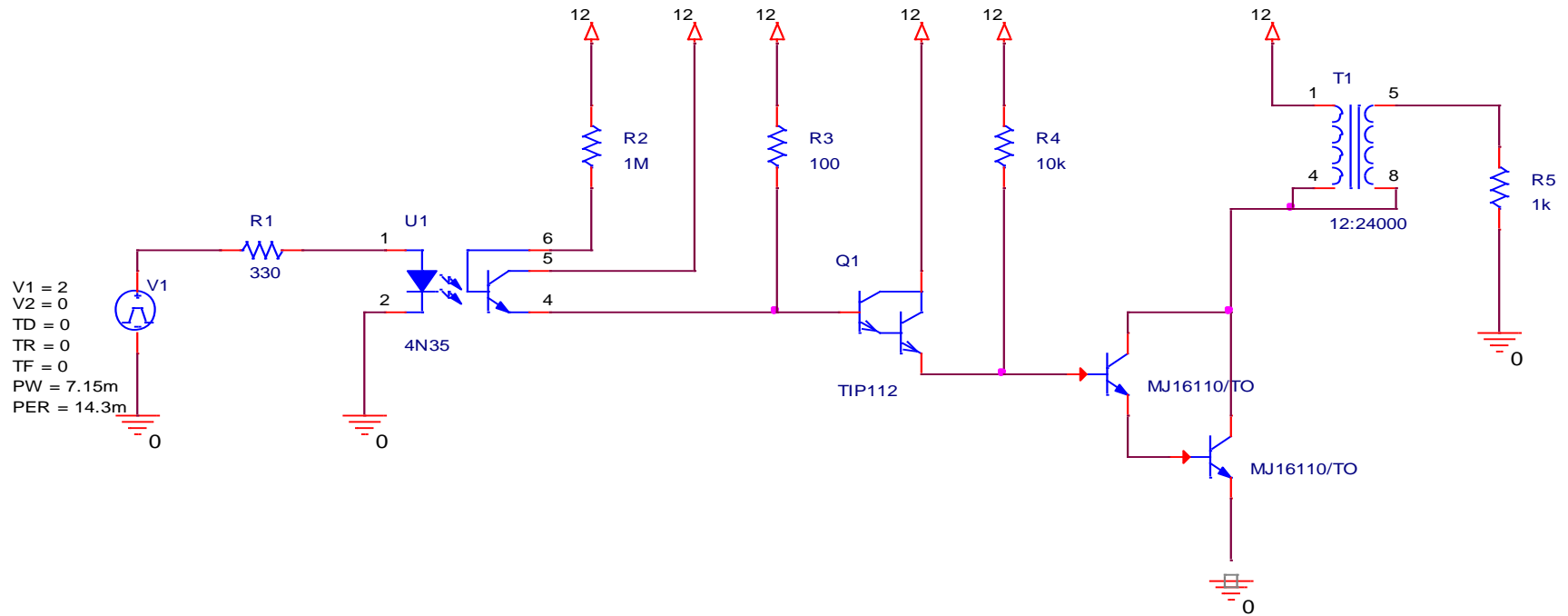
Con base en las etapas descritas anteriormente, se realiza la simulación del circuito en el programa ORCAD ® PSPICE de acuerdo a los componentes comerciales necesarios para la construcción del mismo.

Los elementos electrónicos empleados en el circuito son:

- Resistencias de 100, 330, 10k y 1M $\Omega$ .
- Optoacoplador 4N35.
- Sistema Darlington TIP 112.
- Transistores de potencia BJT tipo NPN., 15022 (2).
- Generador de señales.
- Puente rectificador de 12 V.
- Condensador electrolítico de 2200  $\mu$ F

Las hojas de características de los componentes electrónicos más representativos se presentan en el apéndice K. El circuito implementado para los ensayos finales se muestra en la figura 36.

**Figura 36.** Diagrama esquemático del circuito final empleado.



**Fuente:** Propia.

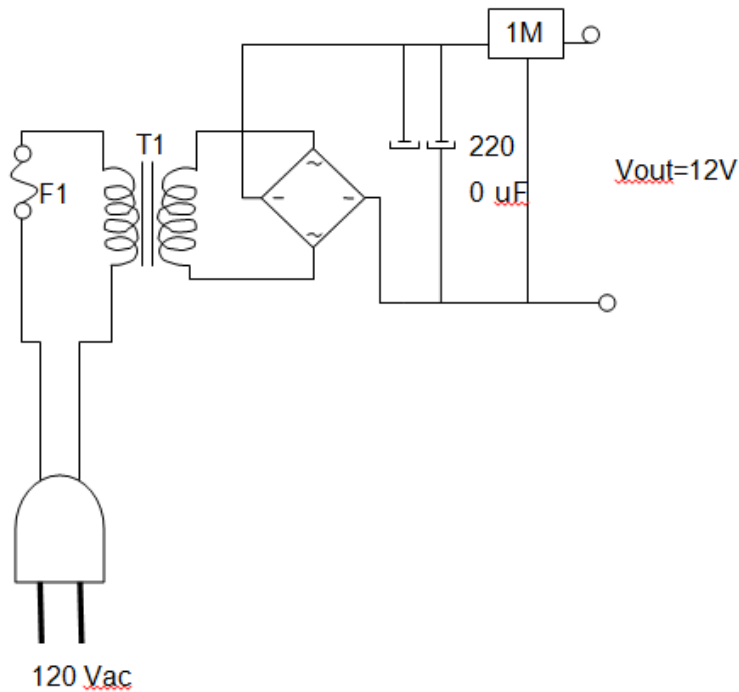
Los resultados obtenidos de la simulación de la corriente y tensión de salida se muestran en la sección 7.1. Cabe notar que se obtienen valores satisfactorios de tensión y corriente a la salida del circuito para una carga y un transformador estimados, según sea el comportamiento experimental del material de prueba (glicerina impura), el diseño de electrodos y reactor del sistema; así como sea el comportamiento del transformador construido.

El circuito diseñado y construido se puede analizar de acuerdo a la funcionalidad de sus etapas, las cuales se presentan a continuación:

1. ***Etapas de alimentación:*** En esta etapa se tiene una fuente de alimentación de DC de 12 V (Como rectificador de onda completa y filtro subsiguiente) la cual se usa para alimentar los sistemas de amplificación de corriente.

La alimentación del sistema consiste en un transformador que reduce el nivel de tensión de alterna proveniente de la red (120 Vrms AC) a 12 V AC, el cual se conecta a un puente rectificador de onda completa a la salida de este 2 condensadores de 2200 uF c/u que cumplen la función de filtrar el rizado de la onda obteniéndose así un nivel de c.c. (corriente continua) de alrededor de los 13Vdc. Para efectos de mantener un nivel de tensión adecuado a los dispositivos del circuito generador de pulsos se coloca a esta salida un regulador de tensión que mantendrá la misma a 12Vdc. Adicionalmente a la entrada del transformador hay un fusible de 1A que opera como protección del sistema.

**Figura 37.** Diagrama esquemático de la fuente de alimentación del circuito.

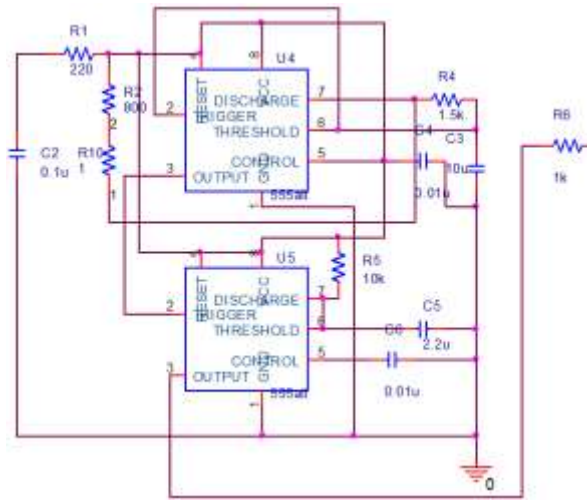


**Fuente:** Propia

## 2. Etapa generación de Onda:

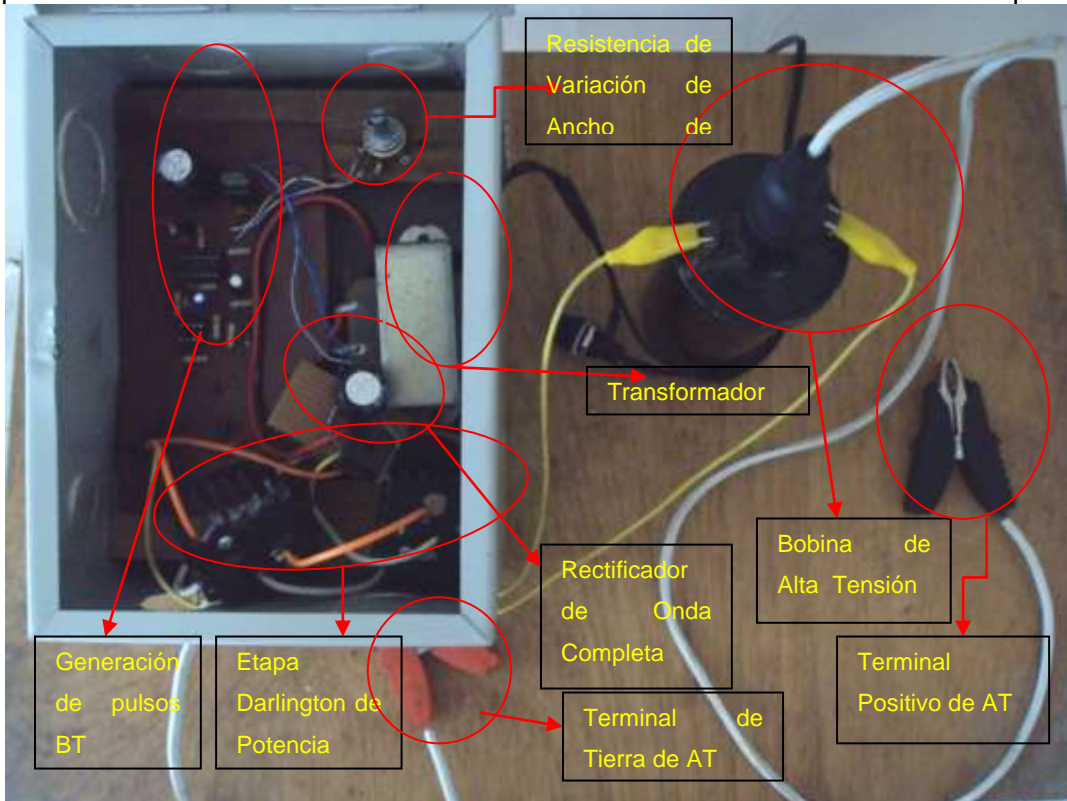
Para el funcionamiento del dispositivo en cuestión lo que se desea es una señal cuya forma es un tren de pulsos de alto voltaje de frecuencia variable, para obtener estos pulsos en las primeras etapas de experimentación lo que se utilizó fue una pareja de elementos multivibradores monoestables (Contenida en el circuito integrado IC1 556) y sus elementos asociados. Este montaje es de uso muy generalizado para aplicaciones de electrónica básica y su funcionamiento está ampliamente estudiado. En síntesis se tiene la posibilidad de variar la frecuencia de los pulsos variando la resistencia  $R2^*$  y el condensador  $C4$  (ver figura 38), el cual se ha fijado en  $1\mu F$  para pruebas iniciales, mientras que  $R2$  está constituida por una resistencia variable de  $150 K\Omega$ .

**Figura 38.** Diagrama esquemático del generador de pulsos.



**Fuente:** Propia

**Figura 39.** Vista y descripción del primer circuito generador de alta tensión usado en pruebas preliminares.



**Fuente:** Propia

**Figura 40.** Vista general de la conexión entre el circuito generador de arco eléctrico diseñado inicialmente y el reactor preliminar de gasificación de glicerina por plasma.



**Fuente:** Propia

Para las pruebas definitivas que permitieron la experimentación continuada y la obtención de los resultados utilizados para el análisis se hicieron modificaciones substanciales al método de obtención de la señal de entrada; se cambió el circuito generador de pulsos por un generador de señales de tensión, el cual confiere versatilidad y variabilidad a las características de la onda. Paralelamente y debido a que este equipo no estaba especificado para entregar una corriente suficiente al sistema, se implementó una interfaz que permitiera un acople seguro de éste con el resto del sistema, a manera de protección del generador el cual por sus especificaciones no puede entregar la corriente requerida por el sistema.

### 3. Etapa de potencia:

Durante el desarrollo del montaje que se iba a implementar para obtener los pulsos de alta tensión rápidamente se encontró que la corriente que se estimó a partir de la bibliografía y las pruebas hechas en el laboratorio de alta tensión, referida al lado de baja del transformador elevador de tensión resultaría muy alta para el circuito y generador descritos en el apartado anterior considerando que la relación de transformación  $a$  es:

$$a = \frac{24.000 \text{ V}}{12 \text{ V}} = 2.000$$

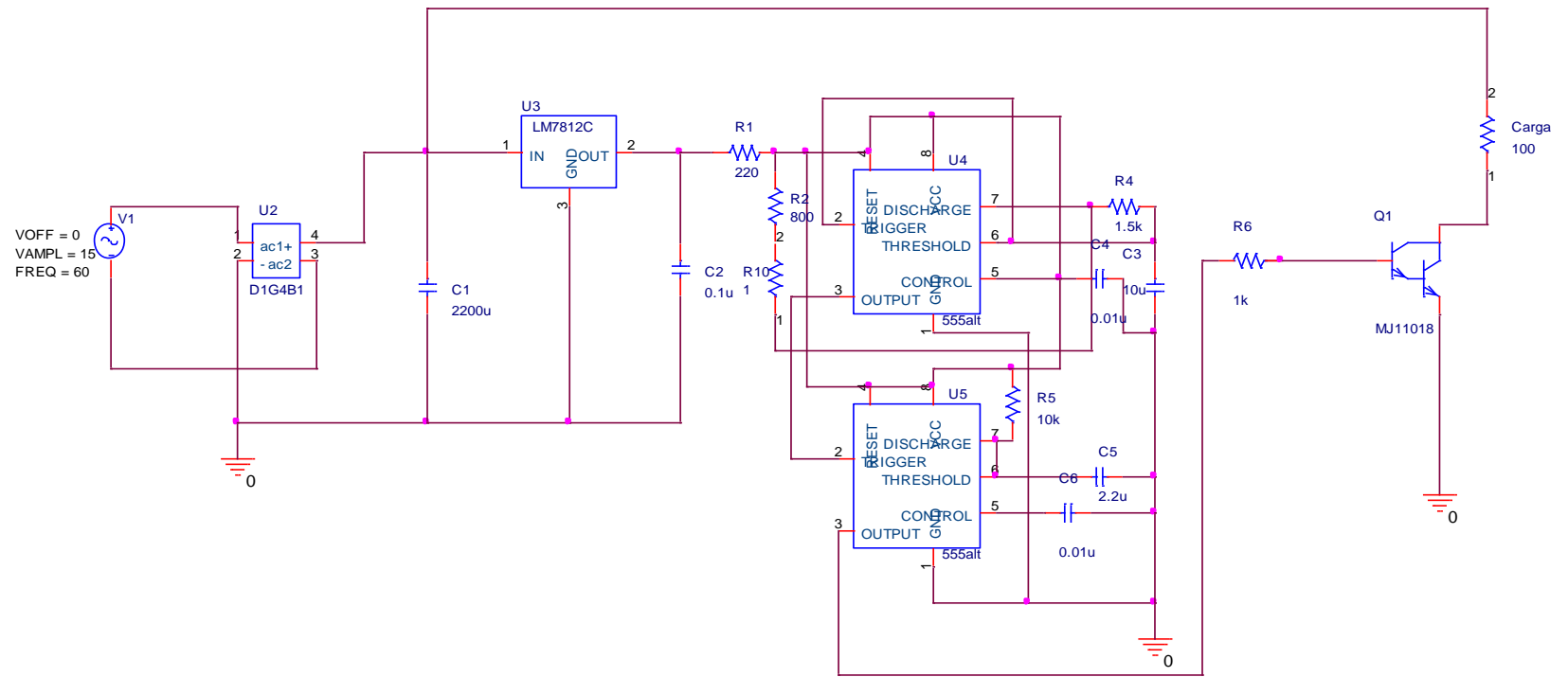
Por lo cual para una corriente en el lado de alta estimada de

$I_{alta} = 10 \text{ mA} \equiv 0.01 \text{ A}$ , se tendrían en baja:

$$I_{baja} \cdot a = 0.01 \text{ A} \cdot 2000 = 2 \text{ A}.$$

Para sopesar este inconveniente se optó por implementar una etapa de potencia que permitiese que circule la corriente necesaria para operar la bobina de alta tensión sin perjudicar el circuito generador de pulsos o posteriormente el generador de señales. Después de una exhaustiva búsqueda de los múltiples dispositivos electrónicos y la posterior simulación en ORCAD PSPICE para esta etapa de potencia, se encontró que un arreglo Darlington de 2 transistores BJT de potencia permitiría la corriente deseada, por lo que se usaron transistores comerciales BJT tipo NPN considerando que la bobina de alta tensión está mejor especificada para operar con pulsos de polaridad inversa.

**Figura 41.** Diagrama esquemático del circuito construido para el sistema generador de pulsos de alta tensión precursor de la formación del arco eléctrico.

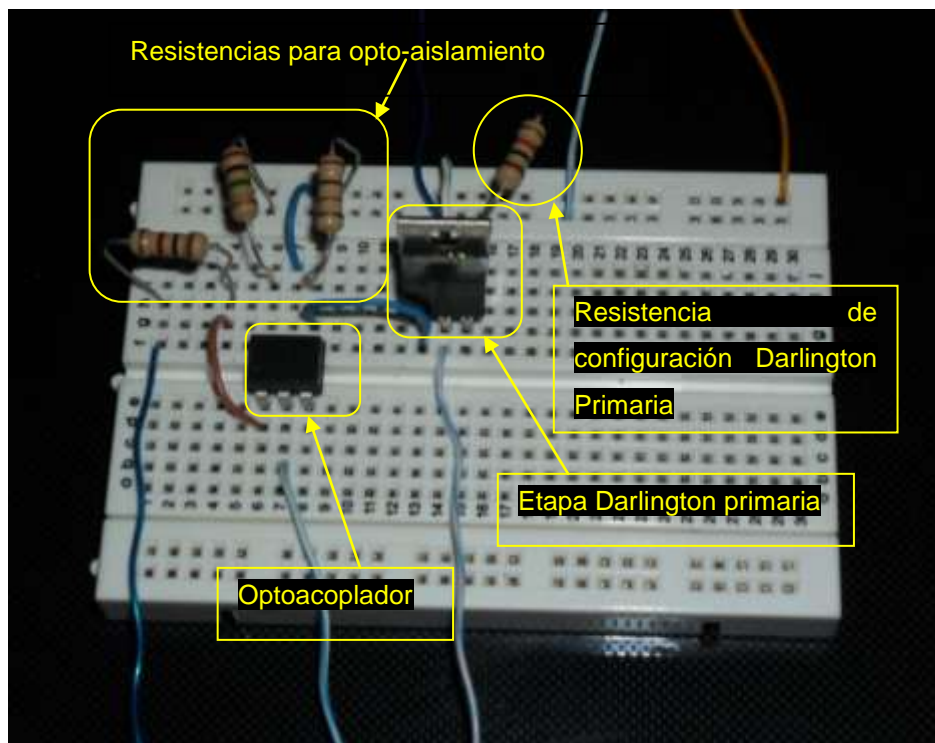


Fuente: Propia.

Al optarse por el uso de un generador de señales para la obtención de la onda de entrada se modificó sustancialmente la etapa de potencia de manera que hubiera un aislamiento efectivo que protegiera el generador el cual no podría suplir en su salida la corriente que requiere el sistema.

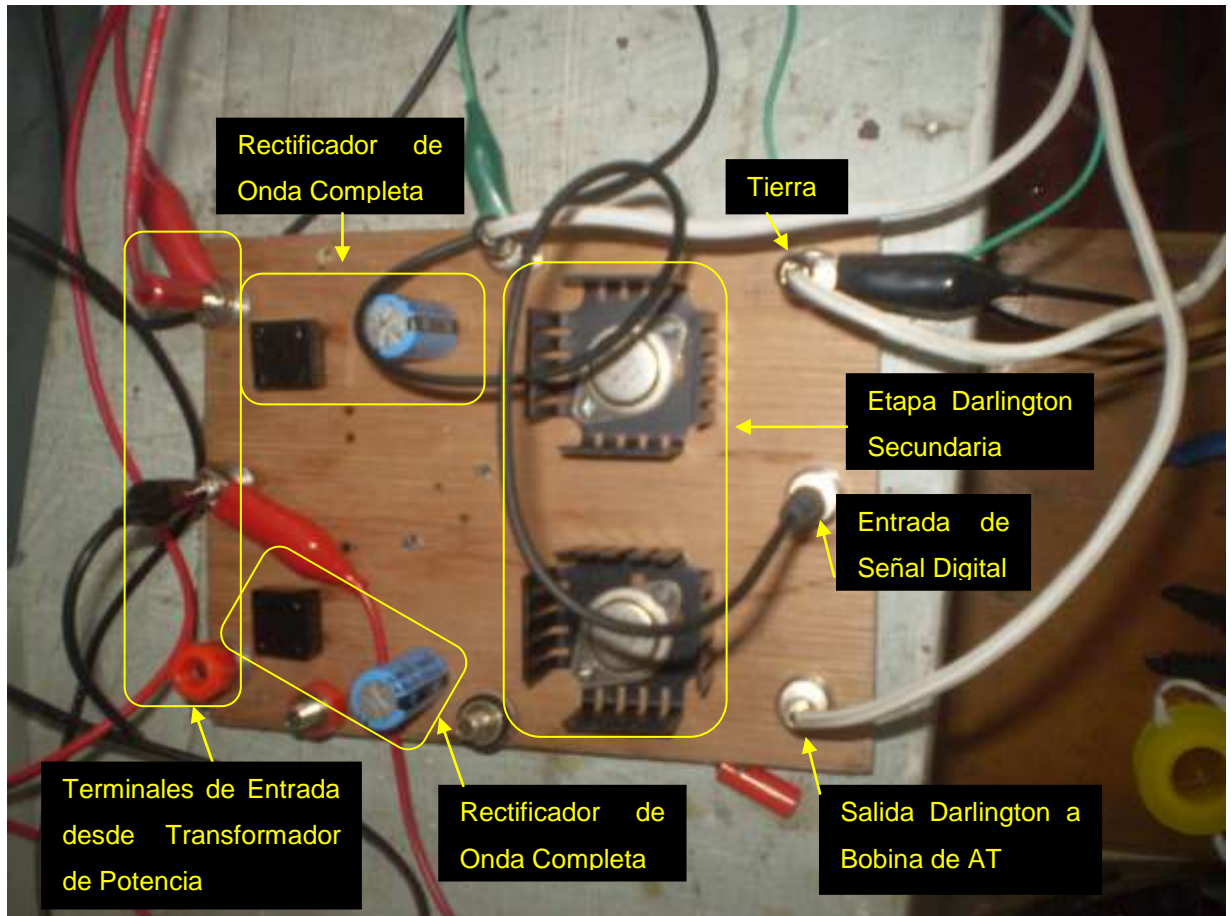
Finalmente se eligió implementar un opto-acoplador y una etapa Darlington previa a la etapa de potencia propiamente dicha (dos arreglos Darlington en cascada), de manera que la corriente drenada desde el generador fuera mínima (del orden de microamperios). El primer arreglo Darlington hace una pre-amplificación de la señal de entrada y el segundo consistente de dos transistores BJT de Potencia tipo NPN, permitiendo entregar una señal de hasta de 20 A, dependiendo de la carga conectada en el secundario del transformador de alta tensión. El circuito implementado finalmente, se presenta en las figuras 42 y 43:

**Figura 42.** Detalle de circuito de opto-aislamiento para señal digital.



**Fuente:** Propia.

**Figura 43.** Circuito de potencia implementado.



**Fuente:** Propia.

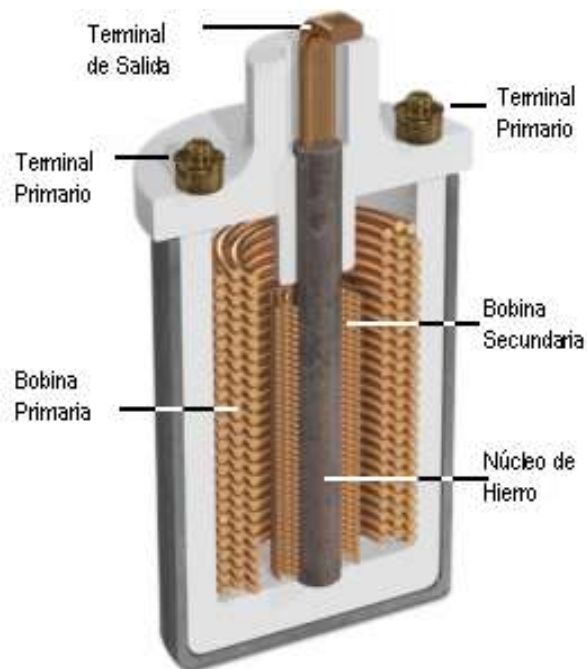
#### **4. Transformador de Prueba:**

Se utilizó para los ensayos, un autotransformador del mismo tipo que el empleado para elevar la tensión en los sistemas de arranque de vehículos de combustión interna; el cual tiene una relación de tensión estimada en 12/26000V y una construcción con aislamiento en aceite, para soportar tales niveles de tensión en bornes sin presentar fallas superficiales durante un uso prolongado.

Este autotransformador está diseñado para entregar corrientes considerablemente altas durante periodos de tiempo largo y resulta idóneo para la aplicación de la presente investigación, ya que está especificado para elevar la tensión en señales con forma de pulsos cortos (similares a impulsos), del orden de los 12 V en baja tensión, y con un uso durante periodos continuos sin que se comprometa su aislamiento.

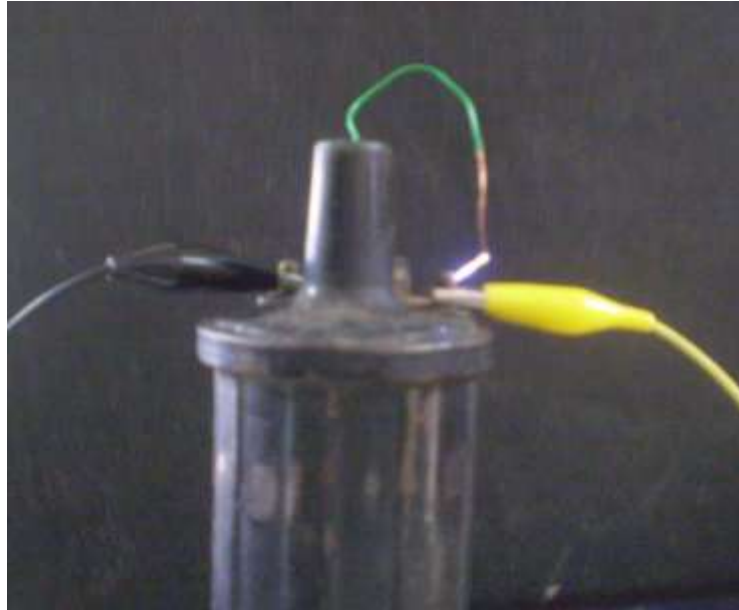
La carga que se tiene a la salida del transformador resulta de la impedancia dinámica del medio en el que se encuentran los electrodos en cada prueba. Para el caso del proceso estudiado dicho medio fue aire, glicerol y/o una combinación de los dos medios anteriores.

**Figura 44.** Vista interna de una bobina de ignición automotriz típica.



**Fuente:** (NATIONAL HIGH MAGNETIC FIELD LABORATORY, 2011)

**Figura 45.** Detalle del arco eléctrico presentado en los terminales de la bobina de alta tensión operando con el circuito implementado.



**Fuente:** Propia.

### 6.5.9 Diseño del reactor

El reactor empleado en el experimento es un sistema de múltiples componentes, cuyo objetivo es el de permitir desarrollar el experimento y tomar medidas de las variables de interés lo más fiablemente posible, en un contexto de trabajo seguro y flexible.

Atendiendo a los objetivos de diseño del experimento se construyó el reactor, teniendo en cuenta que el mismo dispusiera de las condiciones necesarias para el éxito del experimento, las cuales son entre muchas otras, las siguientes:

- Espacio de confinamiento del reactivo (glicerol) y del gas generado.
- Hermeticidad general para líquidos y sólidos contenidos.

- Posibilidad de soporte de los electrodos conectados al circuito generador de la tensión pulsante, contando con un aislamiento eléctrico adecuado entre los electrodos y el recipiente.
- Facilidad de ajuste de espacio inter-electrodos.
- Posibilidad de visualización del fenómeno.
- Puerto de salida para equipos de medición del gas generado.

La revisión del estado del arte, permitió apreciar gran variedad de configuraciones para reactores de que suplían este tipo de requerimientos y que fueron implementadas en estudios similares sobre compuestos diferentes al glicerol residual de la producción de biodiesel. A partir de esta revisión se estableció, teniendo en cuenta la facilidad, practicidad y disponibilidad de recursos; la construcción y utilización de un recipiente cilíndrico de acrílico, en el cual los electrodos (entre los cuales se presentaría el arco eléctrico) estarían sujetos a las tapas del reactor y permitirían la variabilidad limitada de configuraciones.

**Figura 46.** Vistas generales del reactor de gasificación.



**Fuente:** Propia.

**Figura 47.** Vista superior del reactor de gasificación.



**Fuente:** Propia.

#### **6.5.10 Diseño de los electrodos**

A partir de la información disponible en la revisión bibliográfica, los experimentos realizados con muestras de glicerina con el primer sistema de generación de arco eléctrico y de entre las diversas alternativas disponibles para la construcción de los electrodos se diseñó el sistema de electrodos que se incorporó al reactor.

Se estableció la utilización de electrodos de acero inoxidable (aleación 308), con sistema superficial de cromado para la protección redundante contra la corrosión. El acero inoxidable empleado en el sistema de electrodos tiene una conductividad eléctrica aceptable y una resistencia química apropiada para la exigencia a las que se sometió por exposición continuada a las muestras y al ambiente, dadas las condiciones moderadamente drásticas dentro del reactor. En el anexo X se consignan algunas propiedades relevantes de este material.

La forma de los electrodos que se escogió fue de configuración punta-punta, para de esta forma controlar la trayectoria del arco eléctrico de mejor manera que otras configuraciones de electrodos. El sistema de electrodos está constituido de la siguiente manera:

- Un cilindro recto de 20 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro terminado en forma de un cono truncado de 1 cm de altura, que se mueve dentro de un cilindro hueco (a manera de émbolo), de manera que se pueda cambiar la distancia entre los electrodos. Este electrodo está sujeto a la parte superior del recipiente y se asegura a la misma mediante 2 discos de acero aleación 308, entre los cuales se colocan empaques de caucho y se atornillan con tornillos de bronce de alta conductividad eléctrica, buscando garantizar la hermeticidad y conducción eléctrica adecuadas.
- El electrodo inferior puede constituirse por un cilindro fijo a un disco de 9 cm de longitud y 1.5 cm de diámetro terminado en un cono de las mismas dimensiones que el electrodo superior, atornillado mediante un tornillo de bronce de alta conductividad eléctrica; así mismo, el cilindro se puede separar del disco para dejarlo solo como electrodo inferior y de esta manera contar con una configuración distinta para los electrodos.

El material seleccionado presenta un adecuado punto de fusión en función de los requerimientos por efecto de fenómenos como los de puntos calientes en electrodos, el cual se describe en el apartado 5.3.4. Las propiedades generales del material se presentan en el apéndice G.

Los gráficos con información referente a la forma y dimensiones de los electrodos se presentan en el anexo B.

**Figura 48.** Primer plano de los electrodos en el reactor.



**Fuente:** Propia.

**Figura 49.** Detalle del electrodo superior cromado y graduado.



**Fuente:** Propia.

**Figura 50.** Vista frontal de la zona de plasma entre los electrodos del sistema.



**Fuente:** Propia.

### **6.5.11 Sistema de sellado y aislamiento**

Para brindar la hermeticidad necesaria al reactor y permitir un entorno de reproducibilidad experimental adecuado, se diseñaron sendos empaques en material nitrilo de espesor 0,5 cm, cuya naturaleza brinda las condiciones de partida esperadas tanto para aislamiento de gases como de líquidos en el sistema.

El reactor se selló a presión, mediante múltiples tornillos acoplados a la tapa y un posterior reforzamiento de las juntas con silicona líquida. Este proceso se repitió antes de cada ensayo. En el anexo B se presenta un esquema de los empaques del sistema.

## **7 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO**

El diseño metodológico planteado en la sección anterior suministra los parámetros y pasos necesarios dentro de la planificación inicial para la caracterización de la muestra, lo más fiable posible, según la disponibilidad de recursos y equipos para tal empresa.

Siguiendo este lineamiento se presenta a continuación una exposición de las simulaciones, los ensayos y los experimentos realizados en la investigación, los cuales permiten desarrollar un mapa del proceso en formato IDEF0 y desarrollar un análisis, desde distintas aristas, sobre la viabilidad del desarrollo de un proceso piloto de obtención de syngas vía plasma a partir de glicerina residual de la producción de biodiesel.

### **7.1 SIMULACIÓN ELÉCTRICA DEL PROCESO**

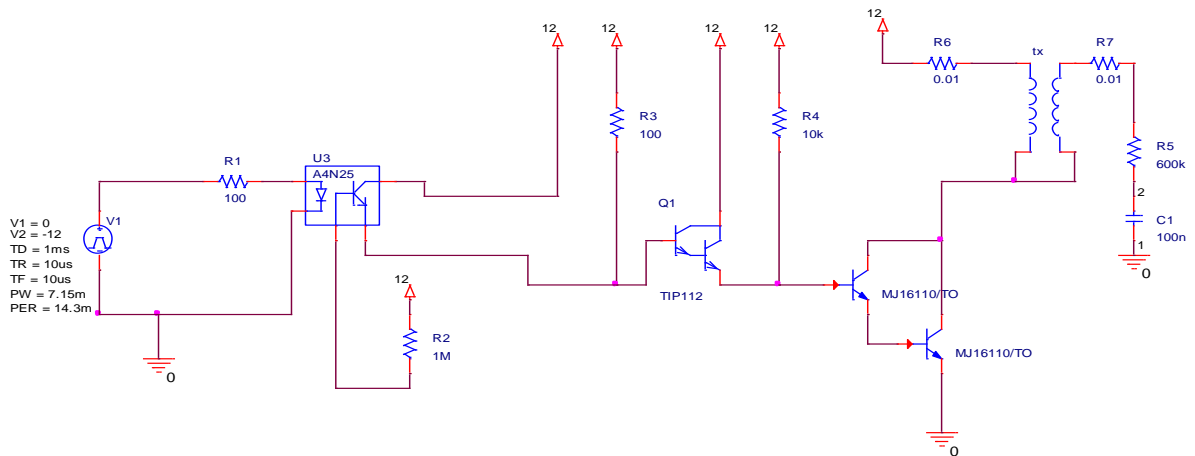
Con el fin de servir de apoyo en la selección y diseño del sistema de generación de arco eléctrico se procedió a realizar simulaciones sobre el mismo utilizando ORCAD PSPICE, de manera que los resultados sirvieran de apoyo en la selección de los elementos a usar y su configuración.

Considerando que se optó por el uso de un generador de señales para obtener la forma de onda de tren de pulsos, que después sería elevada a un nivel de tensión que permitiera la obtención de un arco eléctrico, y que dicho equipo tiene limitaciones en cuanto a la corriente que puede entregar, fue necesaria la adaptación e implementación de una interfaz de potencia que permitiera elevar la tensión de la onda cuadrada sin comprometer los equipos digitales como el generador de señales.

Dicha interfaz o etapa de potencia se constituyó a partir de un opto acoplador que proveyera un aislamiento efectivo entre el generador y la etapa que consumiría la potencia propiamente dicha; seguidamente se implementaron 2 arreglos Darlington en cascada con el fin de obtener la forma de onda drenando muy poca corriente (del orden de micro amperes) desde la fuente de la señal. Seguidamente se conecto el transformador elevador de tensión que corresponde a un autotransformador (de los utilizados para la inducir la chispa que enciende el combustible en vehículos a gasolina sin sistema de inyección electrónica), cuya relación de transformación es 12 / 26000 V aproximadamente.

A continuación se muestra el diagrama esquemático del circuito implementado el cual también fue el implementado para el prototipo de pruebas con la salvedad que para este se utilizó una fuente de DC consistente en un transformador de 115/12 V y un puente rectificador de onda completa con un condensador de 4700uF para filtrar el rizado.

**Figura 51.** Diagrama esquemático del circuito usado para la simulación y para el prototipo de pruebas.



**Fuente:** Propia.

Como señal de entrada se tomó una señal cuadrada de 70Hz con un ciclo útil del 50% como se muestra en la figura 52.

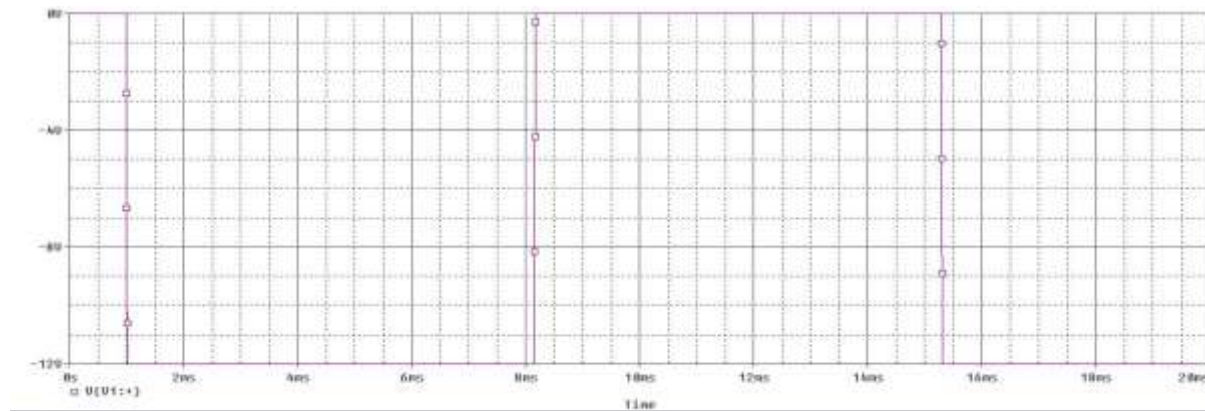
La punta de prueba para la medida de tensión la cual se muestra en la siguiente figura se ubica en la carga la cual correspondería a la brecha entre los electrodos y está representada por una resistencia de alto valor ( $600\text{k}\Omega$ ) y un condensador en serie representando el comportamiento esperado de una carga consistente en líquido orgánico de baja conductividad eléctrica. Hay que tener en cuenta que esta representación de la carga en el momento que se presenta la disrupción no es adecuada dado que las propiedades eléctricas del medio cambian sustancialmente en el momento que ocurre dicha disrupción y ocurre el arco eléctrico.

Como se aprecia en la figura 53 la onda queda formada por picos positivos y negativos que coinciden con la subida y la bajada de los pulsos de la señal de entrada; el transitorio subsiguiente se debe al efecto de descargue de la inductancia del transformador elevador de tensión una vez ocurre el cambio abrupto en la onda (sea este de subida o de bajada).

Además se hizo una estimación de la corriente que consumiría la carga, que aunque los valores obtenidos de la simulación son similares a los estimados en el estado del arte, es claro que la forma de onda en realidad es diferente, dado que el comportamiento del arco eléctrico se aleja del de una impedancia RC cuando ocurre la disrupción.

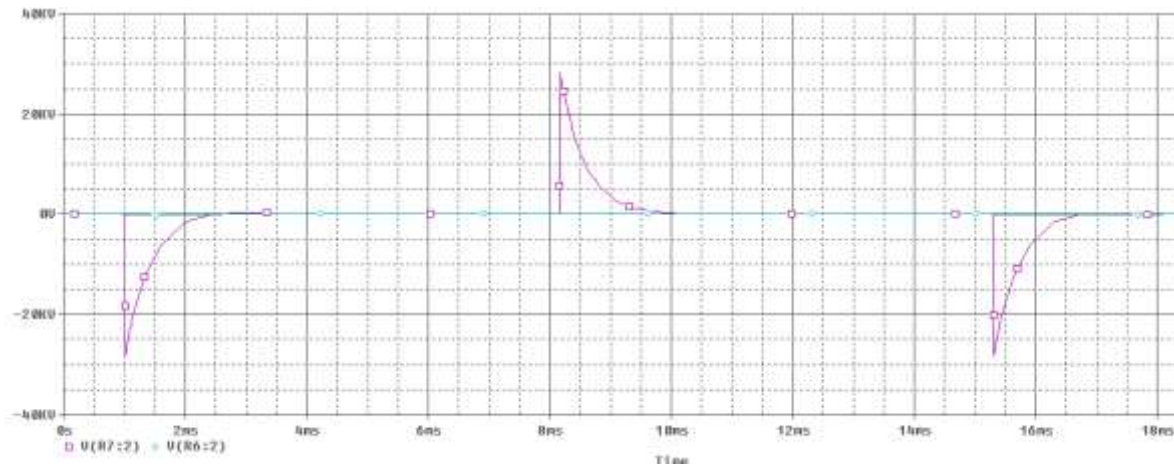
Los resultados arrojados por la simulación presentan valores de tensión de salida sobre los  $4\text{kV}$  pico-pico, los cuales son superiores a los obtenidos para la disrupción de glicerina muestra en chispómetro (presentados en el apartado 7.2.1). Esto indicaba que el diseño circuital en teoría era capaz de provocar la disrupción de la muestra, siempre que el sistema de electrodos y las condiciones así lo permitieran.

**Figura 52.** Señal de entrada tomada para la simulación.



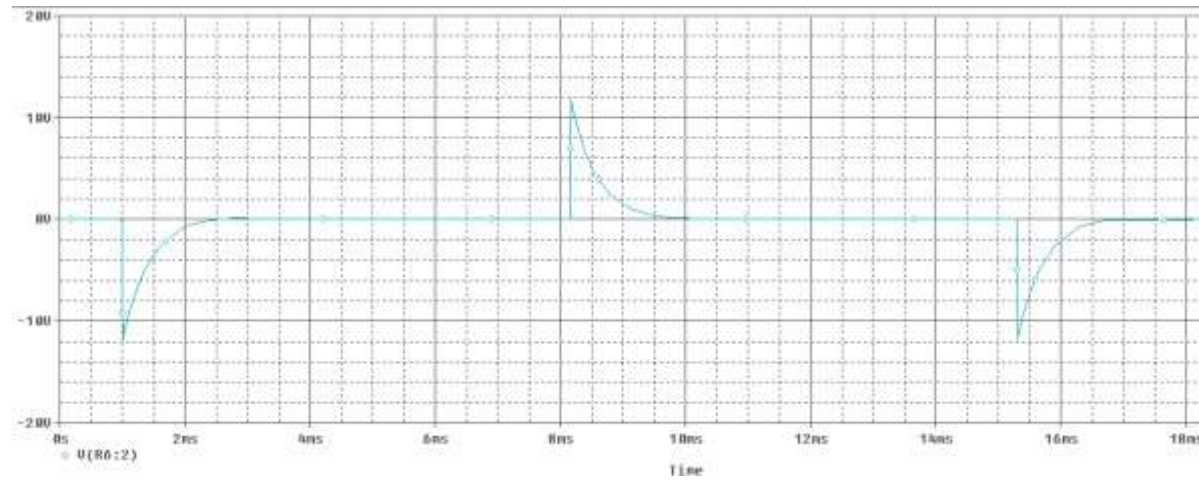
**Fuente:** Propia.

**Figura 53.** Gráfica de la tensión en el lado de alta tensión del transformador de tensión.



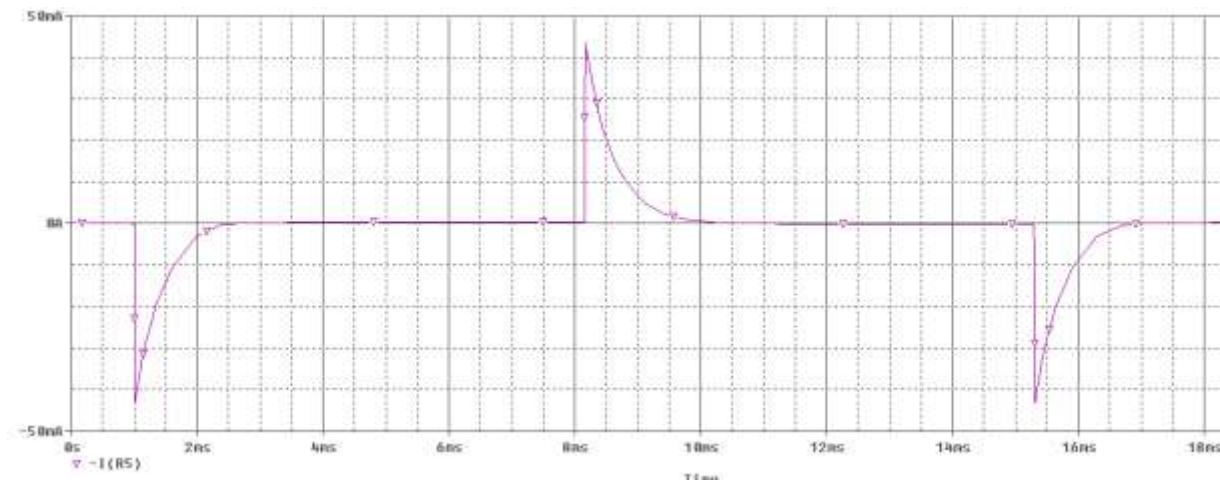
**Fuente:** Propia.

**Figura 54.** Gráfica de la tensión en el lado de baja tensión del transformador de tensión.



**Fuente:** Propia.

**Figura 55.** Gráfica de la corriente en la carga simulada para tener una estimación de este valor.



**Fuente:** Propia

## **7.2 PRUEBAS PRELIMINARES**

Los objetivos de la investigación requirieron la realización de sendas pruebas encaminadas a caracterizar la respuesta eléctrica de la muestra, los componentes determinantes del sistema eléctrico de generación de plasma y medir los valores de energía de entrada en relación con cantidad de producto generado.

Para tal fin se presentan los resultados de la respuesta eléctrica de la muestra, de las pruebas al autotransformador elevador de tensión y los relativos al experimento tipo realizado para gasificación de la muestra.

### **7.2.1 Determinación de la respuesta eléctrica de la muestra**

La investigación, tal como estaba planificada, requería como punto de partida la obtención de valores base de la tensión aplicada al sistema de gasificación para los cuales el glicerol probado presenta disrupción y posterior formación de plasma. Este valor base fue el empleado como punto de partida para el diseño del sistema eléctrico del prototipo experimental.

Existen diversos documentos y normas que describen y presentan los requisitos generales relacionados con los objetos y los procedimientos de ensayo para la generación y medición de tensiones y corrientes, específicamente referidos al establecimiento de la tensión de disrupción en aceites.<sup>35</sup>

Los elementos constitutivos de los generadores de altas tensiones o altas corrientes se utilizan, entre otras aplicaciones, para medir el nivel de aislamiento de diversos materiales, estableciendo las condiciones (distancia de electrodos,

---

<sup>35</sup> (IEEE, Std 4 – 1995, 1995)

tensión, corrientes, etc.) para las cuales se rompe la rigidez dieléctrica del material y se produce la descarga o arco eléctrico.<sup>36</sup>

Un elemento típico usado en este tipo de procedimientos constaría en esencia de un arreglo de dos electrodos los cuales se les puede variar su separación; estos electrodos son sometidos a una diferencia de potencial la cual produce un campo eléctrico entre los mismos sometiendo el material a esfuerzos dieléctricos ocasionando eventualmente una descarga dentro del material alterando sus características eléctricas y químicas.

Con esta perspectiva se procedió a utilizar el chispómetro (Aparato diseñado para pruebas de capacidad de aislamiento eléctrico de aceites aislantes) disponible en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Industrial de Santander, para realizar pruebas específicas sobre el glicerol objeto de estudio.

**Figura 56.** Chispómetro comercial.



**Fuente:** <http://www.amperis.com/productos/pruebas-transformadores/portatest/>.

---

<sup>36</sup>(INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS - 4591)

Considerando que el equipo de medida a utilizar para la determinación de las características eléctricas de la glicerina consistió en el chispómetro disponible en el laboratorio de alta tensión para las pruebas de aislamiento de aceites en transformadores, se determinó que era necesario obtener un factor de escala que permitiera tener valores con un grado de precisión aceptable para las pruebas que se deseaba hacer.

El chispómetro empleado es básicamente un sistema que eleva la tensión entre electrodos a una tasa de 0,5 o 3kV/s, hasta detectar una corriente considerada de disrupción (40mA para el caso del chispómetro utilizado) para la cual suspende el crecimiento de la tensión y retorna el tap del transformador a su posición inicial, quedando preparado así para una siguiente prueba.

Este chispómetro cuenta con dos dispositivos de medida de la tensión uno análogo y otro digital, sin embargo, el dispositivo digital por su construcción no ofrece un grado de confiabilidad aceptable en la precisión y exactitud.

Estos dos medidores miden indirectamente la tensión a través de un transformador de tensión. Razón por la cual y considerando que la dinámica del experimento no permitía tomar una medida adecuada del indicador análogo, se optó por hacer la medida indirecta a través de un medidor digital (multímetro del laboratorio) conectado a este mismo transformador de potencial. Dado que no se contaba con la ficha técnica del transformador de medida con datos como su relación de transformación, se realizaron pruebas sobre aceites dieléctricos donde con ayuda de video digital se tomaron simultáneamente las medidas arrojadas por el medidor análogo y el multímetro digital acoplado, de manera que de su correlación se estableciera la escala del transformador para así obtener una medida digital de un valor más aceptable para los propósitos del proyecto.

### **7.2.1.1 Ensayos realizados**

Teniendo en cuenta que el chispómetro tenía tanto un medidor analógico propio de fábrica, como uno digital acoplado, producto de un trabajo de pregrado realizado hacia el año 1981, se realizaron un conjunto de ensayos encaminados a determinar una escala válida y los valores de la tensión de disrupción de la muestra estudiada, a una distancia inter-electrodos escogida de 1mm para electrodos tipo hongo, según se aprecia en la figura 57.

**Figura 57.** Recipiente empleado en el chispómetro con electrodos en forma de hongo.



- **Determinación de la escala del chispómetro:**

Se realizaron ensayos sobre aceite dieléctrico en primera instancia, teniendo en cuenta que el chispómetro está diseñado para pruebas rutinarias sobre este tipo de muestras. Los resultados consignados en la tabla 10, permiten determinar que tasa de crecimiento utilizar en el equipo.

**Tabla 11.** Ensayo sobre aceite aislante dieléctrico: Tensión registrada en el indicador LED acoplado al chispómetro.

Ensayo	Tensión en Alta del Chispómetro [kV]	Tasa de Crecimiento [kV/s]
1	38.7	
2	42.2	3
3	42.5	
4	36,8	
5	44,9	0,5
6	41,5	

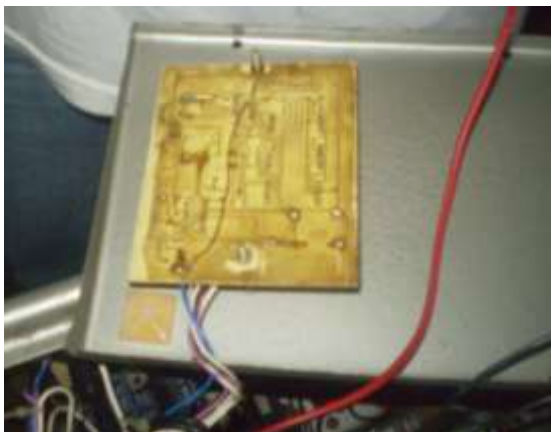
Se emplearon tasas de crecimiento de 3 kV/s y de 0.5 kV/s y una separación de electrodos de 2mm para estos ensayos.

La tabla muestra los valores tomados del medidor del chispómetro para una prueba tipo sobre un aceite dieléctrico convencional. Para correlacionar los valores reportados del medidor analógico del chispómetro con los del multímetro conectado en baja, se realiza un ensayo tipo para aceite dieléctrico y las mismas condiciones del ensayo con muestra. Registrando los valores obtenidos simultáneamente de tensión en el multímetro y en el chispómetro en el multímetro se tiene la siguiente tabla:

**Tabla 12.** Ensayo sobre aceite aislante dieléctrico: Lecturas registradas en multímetro por baja tensión y en el medidor análogo propio del chispómetro por alta tensión.

V Multímetro (V)	V Chispómetro (kV)
0	0
19.6	5
35.8	10
54.3	15
70	20
89.7	25
108.8	30

**Figura 58.** Detalle de la conexión realizada en baja tensión del transformador de potencial al chispómetro.



**Fuente:** Propia.

- **Determinación de la tensión de ruptura de la glicerina de muestra:**

Una siguiente instancia permitió medir la tensión de ruptura de la muestra ante la tasa de crecimiento más óptima de la tensión (3kV/s. Los resultados de los valores de tensión en el medidor añadido al chispómetro para la muestra se presentan a continuación:

**Tabla 13.** Ensayo sobre muestra de glicerol remanente del biodiesel: Lecturas de la tensión de disrupción registradas por el medidor analógico del chispómetro y de la corriente de disrupción registrada por un amperímetro digital conectado al chispómetro.

Ensayo	Tensión en Chispómetro [kV]	Tasa de Crecimiento [kV/s]
1	2.9	
2	2.8	
3	2.8	3
<b>Promedio</b>	<b>2.83</b>	

- **Determinación de la corriente y tensión de disrupción de segunda muestra de la glicerina de muestra**

Se determinó la corriente de ruptura de la muestra y se registraron los valores de tensión en el medidor analógico del chispómetro, así como las corrientes registradas en un amperímetro digital conectado en serie al chispómetro. Las señales capturadas en el osciloscopio Fluke arrojaron una amplitud observada de alrededor de  $14 V_{\text{pico-pico}}$ .

**Tabla 14.** Ensayo sobre muestra de glicerol crudo: Lecturas de la tensión de disrupción registradas por el medidor analógico del chispómetro y de la corriente de disrupción registrada por un amperímetro digital conectado al chispómetro.

Ensayo	Tensión en medidor chispómetro [kV]	Corriente Medida [A]	Tasa de Crecimiento [kV/s]
1	2.5	0.40	
2	2.8	0.41	
3	2.3	0.39	3
<b>Promedio</b>	<b>2.53</b>	<b>0.4</b>	

**Tabla 15.** Ensayo sobre segunda muestra de glicerol crudo: Lecturas de la tensión de disrupción registradas por el medidor analógico del chispómetro y de la tensión de disrupción registrada por un osciloscopio digital FLUKE conectado al chispómetro.

Ensayo	Tensión en medidor de chispómetro [kV]	Tensión en el Fluke pico [V]	Tasa de Crecimiento [kV/s]
1	4.1	13.6	
2	4.1	13.6	
3	4.0	13.6	
4	4.1	13.7	
5	4.0	13.6	3
<b>Promedio</b>	<b>4.07</b>	<b>13.62</b>	

- **Prueba de control con glicerol de alta pureza:**

Estas pruebas se realizaron para contrastar la respuesta de la muestra, con respecto a una sustancia blanco, que para el caso es glicerol de alta pureza calidad USP. Se presentan los resultados en la tabla siguiente:

**Tabla 16.** Ensayo sobre muestra de glicerol de alta pureza calidad USP: Lecturas de la tensión de disrupción registradas por el medidor analógico del chispómetro y de la tensión de disrupción registrada por un osciloscopio digital FLUKE conectado al chispómetro.

Ensayo	Tensión de medidor de chispómetro [kV]	Tensión pico registrada en el Fluke [V]	Tasa de Crecimiento [kV/s]
1	4	14.28	3
2	4	15.61	
3	4	15.05	
4	4	13.61	
5	4	14.39	
<b>Promedio</b>	<b>4</b>	<b>14.59</b>	

### 7.2.1.2 Análisis de los resultados del experimento

- **Criterio de consistencia estadística:**

Siguiendo la norma técnica colombiana para pruebas de aislantes dieléctricos, (*INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS, 1999*), se procedió a verificar con los datos de interés de la tabla 14 el criterio de consistencia estadística; el cual permite aceptar o rechazar una serie de datos experimentales para tensión de disrupción, según sea el valor de la relación entre la media y la desviación estándar de los mismos. Las relaciones para el empleo de este criterio se citan a continuación:

$$\bar{X} = \frac{1}{5} \sum_{I=1}^5 X_I \quad (7.1)$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{4} \cdot \sum_{I=1}^5 (X_I^2 - 5\bar{X}^2)} \quad (7.2)$$

Donde  $\bar{X}$  es la media de los cinco valores individuales,  $X_I$  la tensión de ruptura registrada (medida en baja tensión), y  $s$  la desviación estándar del conjunto de datos.

Con la condición de que se cumpla la siguiente desigualdad, para efecto de cumplimiento del criterio:

$$\frac{s}{\bar{X}} \leq 0,1 \quad (7.3)$$

Para este fin se procede a calcular la media y la desviación estándar de la muestra para los valores de tensión de ruptura registrados en la tabla 14:

$$\bar{X} = 13.62 [V]$$

$$s = 0,004$$

Una vez obtenidas la media y la desviación estándar se aplica el criterio de consistencia estadística que se define por la siguiente expresión condicionante, la cual debe ser satisfecha para el cumplimiento del mismo:

$$\frac{s}{\bar{X}} = 0,00029$$

Luego se puede afirmar que los datos cumplen el criterio de consistencia estadística.

- **Función de ajuste para los datos obtenidos:**

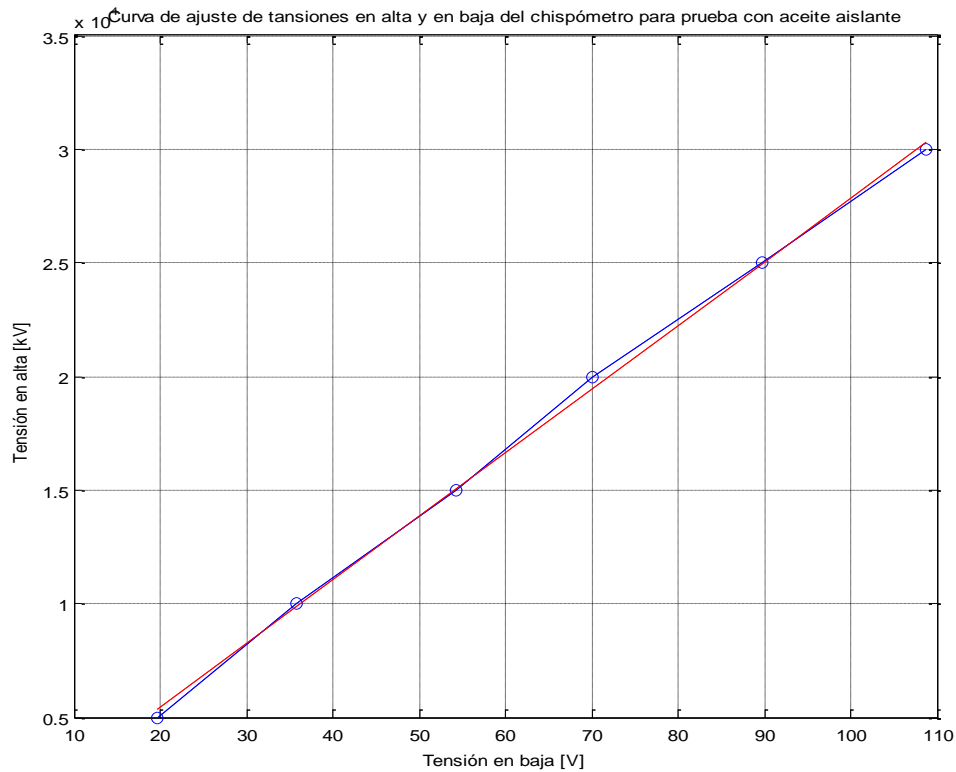
Teniendo en cuenta los valores de prueba con aceite aislante de la tabla 12, se obtuvo la siguiente curva de ajuste lineal:

$$V_{alta} = 279,33 \cdot V_{baja} - 91,96 \quad [V]$$

$$R^2 = 0,9994$$

La figura 59 muestra la comparación entre los datos experimentales (azul) y los obtenidos de la ecuación de ajuste obtenida (rojo), para la relación entre tensión en alta y baja del autotransformador del chispómetro.

**Figura 59.** Curva de ajuste de los valores obtenidos de las tensiones en alta y en baja en el chispómetro.



**Fuente:** Propia.

Teniendo en cuenta la curva de ajuste de la prueba con aceite aislante de transformador, se aplica esta función obtenida al promedio de todos los datos de los ensayos con la muestra en baja tensión registrados en la tabla 16 (dado que son los mayores en promedio), obteniendo el siguiente valor de tensión de ruptura del glicerol de:

$$V_{ruptura\ muestra} = 3640,1 \text{ [V]}$$

- **Discusión de resultados:**

Teniendo en cuenta los valores obtenidos de tensión y corriente de disrupción para la muestra, se construyó la fuente de alimentación del sistema generador de plasma, teniendo en mente que tuviera la suficiente flexibilidad, operatividad y eficiencia que se requieran en el proceso, dentro del límite presupuestal del proyecto de investigación.

Es claro que el prototipo experimental requiere tener en cuenta un crecimiento de las tensiones de al menos 3500 V, considerando que hacia un tope mayor se encuentra una ocurrencia apreciable y significativa del arco eléctrico precursor de la reacción plasma-química buscada.

La corriente promedio de ruptura encontrada en este experimento sobrepasa los 400mA, la cual es la corriente que admite la protección eléctrica del equipo utilizado. Esto indica que su valor solo puede ser un estimado, más no un dato fiable para correlacionar con la tensión de disrupción de la muestra.

### **7.2.2 Caracterización del transformador elevador de tensión utilizado**

El transformador empleado en elevar la tensión, como se mencionó en el apartado de diseño metodológico, es una bobina de ignición automotriz cuyo modelo circuital corresponde al de un autotransformador.

En el contexto del sistema eléctrico empleado y teniendo en cuenta para efectos de estimar las pérdidas de energía inherentes a este dispositivo, se realizaron ensayos estandarizados de vacío con el fin de obtener un circuito equivalente del dispositivo.

Los ensayos de cortocircuito no pudieron realizarse como se contempló en un principio, dado que el fabricante de este tipo de dispositivos no acostumbra a reportar los valores nominales de corriente de la bobina. Por este motivo fue necesario emplear valores reportados en literatura sobre impedancias típicas de la bobina, para efectos de obtención del modelo circuital completo y el cálculo posterior de pérdidas por conducción eléctrica del dispositivo.

El valor nominal de tensión en baja para la bobina de ignición ensayada es de 12 V según el fabricante Prestolite.

La figura 60 muestra el esquema de conexión para el ensayo de vacío que se realizó con el dispositivo (bobina de ignición automotriz).

**Figura 60.** Esquema de conexión general para el ensayo de vacío de la bobina de ignición empleada.



**Fuente:** Propia.

Los materiales empleados en este ensayo fueron:

- Wattmetro
- Voltmetro
- Amperímetro
- Transformador de medición de corriente

El ensayo se realizó teniendo en cuenta el protocolo descrito por la norma IEEE para pruebas a transformadores. (IEEE, 1995) Se tomaron los valores por triplicado para el cálculo posterior de la impedancia equivalente del ensayo de vacío.

La tabla 16 arroja los valores promedio de la prueba de vacío realizada:

**Tabla 17.** Resultados de mediciones en ensayos de vacío de la bobina de ignición.

Medición	Tensión en baja [V]	Corriente en baja [A]	Potencia en baja [W]
1	11,97	4,03	8
2	12,06	3,87	8
3	11,93	4,07	8
<b>Promedio</b>	11,99	3,99	8

Reformulando las ecuaciones 5.38, 5.39 y 5.40 referentes al cálculo de la impedancia equivalente del autotransformador para ensayos de vacío, y que corresponden a una estimación de las pérdidas del núcleo del mismo, se tienen los siguientes valores calculados:

$$P_{FE} \approx P_0 = V_{bajanominal} \cdot I_a$$

$$I_a = \frac{8 \text{ W}}{11,99 \text{ V}} = 0,67 \text{ A}$$

$$R_{02} = \frac{V_{bajanominal}}{I_a} = \frac{11,99 \text{ V}}{0,67 \text{ A}} = 17,97 \Omega$$

$$X_{02} = \frac{V_{bajanominal}}{I_{vacío}} = \frac{11,99 \text{ V}}{3,99} = 3,01 \Omega$$

Donde  $P_{FE}$  son las pérdidas reales en el núcleo del transformador,  $P_0$  es la potencia promedio medida del ensayo de vacío,  $I_a$  corresponde a la magnitud de la corriente fasorial que representa las pérdidas por calor en el núcleo del transformador,  $V_{bajanominal}$  es la tensión nominal promedio por baja para el ensayo de vacío,  $I_{vacío}$  es la corriente promedio de vacío,  $R_{02}$  y  $X_{02}$  son la resistencia e inductancia equivalentes del núcleo del transformador respectivamente, para el modelo utilizado .

El valor de la resistencia equivalente de las pérdidas de vacío es un insumo importante para la estimación de las pérdidas energéticas del sistema y el ajuste de las mismas bajo parámetros más realistas.

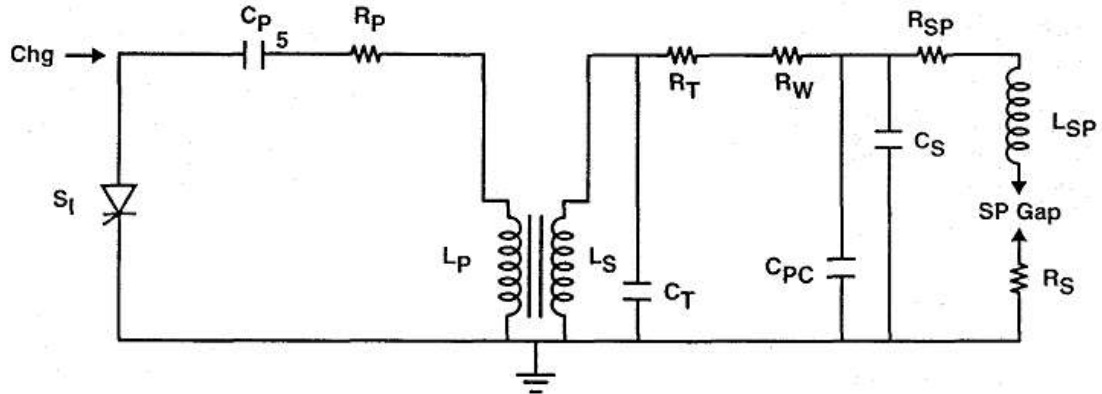
La tabla 17 presenta valores tipo de parámetros del modelo circuital (referidas al modelo de la figura 61) ampliado de la bobina de ignición, los cuales permiten estimar las pérdidas en el cobre de la ésta, para efectos de ajuste de las pérdidas energéticas netas del sistema.

**Tabla 18.** Valores típicos de impedancias para bobinas de ignición comerciales. Para todos los circuitos  $C_p=1\mu F$ ;  $C_1=40pF$ ;  $C_s=10pF$ ;  $L_{sp}=25nH$ .<sup>37</sup>

CONFIGURACIÓN DEL CIRCUITO	PARÁMETROS UNIDADES								
	Rp $\Omega$	Lp mH	Ls H	Cpc pF	Rf $\Omega$	Rw $\Omega$	Rsp $\Omega$	Rs $\Omega$	$\eta$ %
STD Coil, HiR Wire, Res Spark Plug	1	3	30	0	10k	8k	5k	50	0,15
STD Coil, HiR Wire, Non-R Spark Plug	1	3	30	0	10k	8K	0	50	10,1
STD Coil, HiR Wire, Non-R Plug, Pk Cap	1	3	30	80	10k	8K	0	10	49
80:1 Lo R Coil, Lo R Wire, R Plug, PkCap	0,005	0,008	0.5	0	12	100	5K	50	0,38
80:1 Lo R Coil, Lo R Wire, Non-R Plug, PkCap	0,005	0,008	0.5	80	12	100	0	10	56
80:1 Lo R Coil, Lo R Wire, Non-R Plug, Pk Cap (Matched CKT)	0,005	0,008	0.5	110	12	100	0	10	60
50:1 Lo R Coil, Lo R Wire, R Plug, PkCap	0,005	0,24	0,62	0	8	100	5K	50	0,38
50:1 Lo R Coil, Lo R Wire, Non-R Plug, PkCap	0,005	0,24	0,62	80	8	100	0	10	41,5
50:1 Lo R Coil, Lo R Wire, Non-R Plug, Pk Cap (Matched CKT)	0,005	0,24	0,62	360	8	100	0	10	78

<sup>37</sup>(ROHWEIN, 1995)

**Figura 61.** Circuito equivalente tipo para una bobina de ignición donde se ignora las pérdidas en el núcleo de la bobina.  $C_{pc}$ ,  $C_s$ ,  $R_{sp}$ ,  $L_{sp}$  y  $R_s$  son valores de resistencias, inductancias y capacitancias propias del sistema de conexión aislado de la bobina.



**Fuente:** (ROHWEIN, 1995).

Para la bobina empleada se suponen los valores de las inductancias como  $L_p = 3\text{mH}$  y  $L_s = 30\text{H}$ .

### 7.3 EXPERIMENTO GENERAL

Se procedió a construir un circuito de prueba con los elementos requeridos por el diseño y según la disponibilidad de los mismos y el limitado presupuesto lo permitieran.

Las muestras de glicerina cruda utilizadas corresponden a dos muestras, de más de dos litros cada una, obtenidas de BIDESAN en distinto momento en los años 2009 y 2010, y almacenadas según el protocolo planteado en la sección de diseño metodológico. Por otra parte las muestras de glicerina de alta pureza son dos galones de calidad USP (United States Pharmacopeia), adquiridas en el año 2010 a Laboratorios León.

Las muestras de glicerina cruda presentaban en ambos casos, una apariencia desnaturalizada en comparación con la de calidad USP, con una turbidez característica, color marrón oscuro y partículas de gran tamaño flotando en la superficie. Estas características son determinantes en el comportamiento eléctrico de dicha muestra, ya que la presencia de sustancias de polaridad y conductividad eléctrica significativa (como restos de metanol del proceso catalítico previo), así como de partículas sólidas dispersas en la muestra, permiten una ruptura dieléctrica con una menor energía invertida, según se presentó en los apartados 5.3.8 del marco referencial.

La figura 62 presenta una muestra en los envases de almacenado.

**Figura 62.** Muestra tipo de glicerina cruda (izquierda) y de glicerina de alta pureza (derecha), empleados en los ensayos.



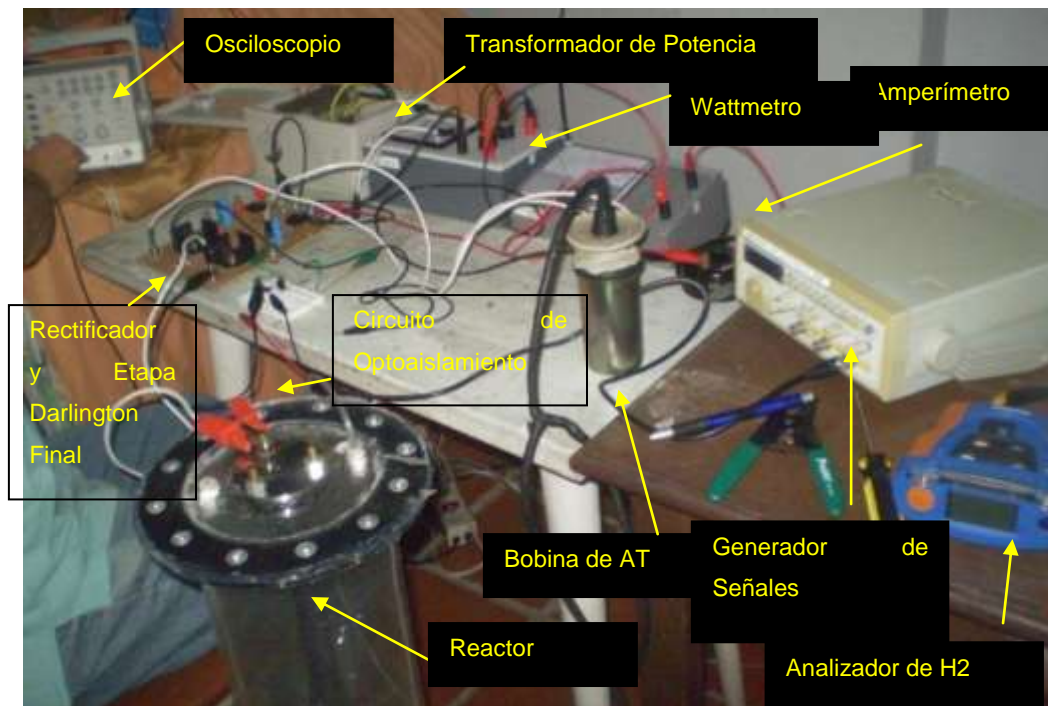
**Fuente:** Propia.

Los resultados preliminares para el sistema conectado en vacío (con aire como medio dieléctrico entre electrodos), mostraban observaciones cualitativas de interés para el comportamiento del mismo. Vale la pena citar por ejemplo, que el arco eléctrico tiene considerable mayor fuerza y ruido a frecuencias de entre 60 y

90 Hz. Esto puede deberse a la construcción de la bobina de ignición y su respuesta en frecuencia. También es de notar que sobre 1 cm de separación de los electrodos aparenta formarse el arco eléctrico más fuerte.

Con base en el diseño metodológico se realizó el montaje presentado en las imágenes siguientes:

**Figura 63.** Detalle del montaje final general del experimento.



**Fuente:** Propia.

**Figura 64.** Detalle de los equipos de análisis de gases.



**Fuente:** Propia.

**Figura 65.** Detalle de los equipos de medición eléctrica y el circuito general.



**Fuente:** Propia.

### 7.3.1 Experimentación con glicerina de alta pureza

Teniendo en mente las consideraciones sobre el diseño experimental se plantea el conjunto de tratamientos para los ensayos con glicerina blanco de alta pureza, el cual se presenta en la tabla 18. Los resultados obtenidos con esta glicerina sirven de base para el ajuste óptimo de condiciones para el experimento con la muestra de glicerina cruda.

**Tabla 19.** Tratamientos estudiados en el experimento con glicerina de alta pureza.

Tratamiento	Separación de electrodos [cm]	Frecuencia de tensión [Hz]	Duración tipo [min]
A	1	60	0,5
B	1	115	0,5
C	0,7	60	0,5
D	0.7	115	0,5

La muestra utilizada es glicerina de apariencia transparente y consistencia viscosa, la cual fue almacenada y utilizada según el protocolo del diseño metodológico.

**Figura 66.** Reactor con muestra de glicerina de alta pureza.



**Fuente:** Propia.

Las tablas 19, 20, 21 y 22 presentan los resultados promedio obtenidos de los ensayos tipo para muestras de glicerina de alta pureza según los tratamientos prefijados. El reporte completo de cada ensayo se presenta en el anexo D.

**Tabla 20.** Resultados promedio de ensayos para glicerina de alta pureza y tratamiento A.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	Promedio Tratamiento A	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3696
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,53	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,18
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]			Nominales: 30	Medidos: 31
CO Medido (Analizador gases) [%]			0,0130	
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]			62,00	
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]			0,1370	
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]			108,3330	
Potencia de Entrada [Watt/rms]			30,00	
Tensión Entrada Total [Vrms]			12,81	
Corriente Entrada Total [Arms]			4,33	

**Tabla 21.** Resultados promedio de ensayos para glicerina de alta pureza y tratamiento B.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	Promedio Tratamiento B	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3669
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,9	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,18
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30	Medidos: 31	
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,01667		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		22,33		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,09333		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		53,67		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		29,33		
Tensión Entrada Total [Vrms]		12,82		
Corriente Entrada Total [Arms]		4,40		

**Tabla 22.** Resultados promedio de ensayos para glicerina de alta pureza y tratamiento C.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	Promedio Tratamiento C	Temperatura ambiente media [°C]	23
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3706
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,6	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2.21
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30	Medidos: 30	
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,03333		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		27		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,18		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		39		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		26		
Tensión Entrada Total [Vrms]		13,33		
Corriente Entrada Total [Arms]		2,93		

**Tabla 23.** Resultados promedio de ensayos para glicerina de alta pureza y tratamiento D.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	Promedio Tratamiento D	Temperatura ambiente media [°C]	23
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3706
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,5	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2.21
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 / 50%
Tiempo [segundos]			Nominales: 30	Medidos: 29
CO Medido (Analizador gases) [%]			0,3200	
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]			18,33	
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]			0,1333	
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]			39,33	
Potencia de Entrada [Watt/rms]			30,33	
Tensión Entrada Total [Vrms]			12,88	
Corriente Entrada Total [Arms]			2,67	

Las tablas 19, 20, 21 y 22 mostradas anteriormente, permiten inferir algunas tendencias en el experimento. Vale citar que el tratamiento A presenta la mayor producción de hidrógeno con respecto a los demás tratamientos estudiados. Luego, se puede inferir que para frecuencias del orden de 60 Hz y separación de electrodos del orden de 1 cm, el sistema tiene una mayor generación de producto con una energía invertida del orden de los 30 Watt.

### 7.3.2 Experimentación con glicerina cruda

Los resultados obtenidos con la glicerina de alta pureza, permitieron inferir varias tendencias en el comportamiento del proceso para con la glicerina cruda que se empleó en la segunda etapa del experimento. Con lo anterior en mente, se dispuso un conjunto de tratamientos para ser realizados con los ensayos, de los cuales solo fue posible realizar los consignados en la tabla 23, por causa de la inutilización final del reactor.

**Tabla 24.** Tratamientos estudiados en el experimento con glicerina cruda.

Tratamiento	Separación de electrodos [cm]	Frecuencia de tensión [Hz]	Duración tipo [min]
A	1	70	1
B	1.5	70	1

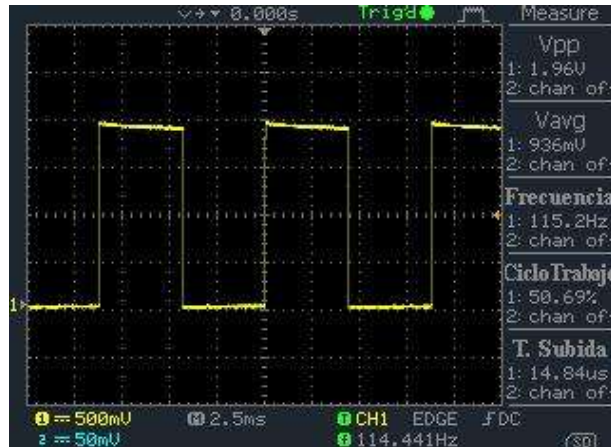
Para las pruebas se utilizó la glicerina cruda de la muestra número 2, vertiéndola en el recipiente del reactor y registrando la altura que ocupaba en el mismo en la etapa pre y post ensayo. Una imagen representativa de la apariencia de la muestra en el reactor se presenta en la figura 67.

**Figura 67.** Reactor con muestra de glicerina cruda.



**Fuente:** Propia.

**Figura 68.** Señal de entrada tipo suministrada por el generador de señales.



**Fuente:** Propia.

A nivel cualitativo se obtuvieron algunas importantes observaciones del experimento. Cabe señalar por ejemplo, la obtención de un arco eléctrico de apariencia notable con un sonido característico de buena intensidad. La presencia de gas en el reactor también fue un hecho notorio desde el primer momento. Lo anterior a contrapelo de un comportamiento menos energético del sistema para la muestra de glicerina de alta pureza.

Merecen mención especial la presencia de una llama notoria en el entorno cercano de los electrodos, así como la posibilidad de obtención de arco estable con dos medios (aire y muestra) y sin llegar en ocasiones a generar arco eléctrico desde la superficie de la muestra, hasta la punta del electrodo sumergido. Estos fenómenos, que no se presentaron en los ensayos con glicerina de alta pureza, pueden indicar tanto el hecho de consumir parte del hidrógeno generado por combustión en el entorno del plasma, como el carácter conductor de la muestra cruda, respectivamente.

La determinación de las cantidades de las especies de gases medidas en el experimento, requiere del cálculo de un sistema de ecuaciones, para el cual se

suponen condiciones de equilibrio y estabilidad de las especies generadas en el experimento, así como la no presencia de otras sustancias generadas dentro del reactor. Esta última suposición se hace necesaria para poder estimar las cantidades de gas generado, y en opinión de los autores no constituyen un riesgo para la exactitud de los valores, dada la poca contribución de otras especies al número total de moles del sistema gaseoso.

Las expresiones utilizadas se reseñan a continuación:

$$\frac{ppmH_2}{1.000.000} = \frac{n_{H_2f}}{n_{gas_i} + n_{H_2f} + n_{CO_f} + n_{HCS_f} + n_{CO_2f}} \quad [7.4]$$

$$\frac{ppmCO}{1.000.000} = \frac{n_{CO_f}}{n_{gas_i} + n_{H_2f} + n_{CO_f} + n_{HCS_f} + n_{CO_2f}} \quad [7.5]$$

$$\frac{ppmHCS}{1.000.000} = \frac{n_{HCS_f}}{n_{gas_i} + n_{H_2f} + n_{CO_f} + n_{HCS_f} + n_{CO_2f}} \quad [7.6]$$

$$\frac{ppmCO_2}{1.000.000} = \frac{n_{CO_2f}}{n_{gas_i} + n_{H_2f} + n_{CO_f} + n_{HCS_f} + n_{CO_2f}} \quad [7.7]$$

Reorganizando las ecuaciones anteriores se puede escribir la expresión matricial del sistema de ecuaciones:

<b>nH<sub>2</sub></b>	<b>nCO</b>	<b>nCO<sub>2</sub></b>	<b>nHCs</b>	<b>RTA.</b>
$1 - \frac{ppmH_2}{1.000.000}$	$\frac{ppmH_2}{1.000.000}$	$\frac{ppmH_2}{1.000.000}$	$\frac{ppmH_2}{1.000.000}$	$= \frac{ppmH_2}{1.000.000} \cdot n_{gas_i}$
$\frac{ppmCO}{1.000.000}$	$1 - \frac{ppmCO}{1.000.000}$	$\frac{ppmCO}{1.000.000}$	$\frac{ppmCO}{1.000.000}$	$= \frac{ppmCO}{1.000.000} \cdot n_{gas_i}$
$\frac{ppmHCs}{1.000.000}$	$\frac{ppmHCs}{1.000.000}$	$1 - \frac{ppmHCs}{1.000.000}$	$\frac{ppmHCs}{1.000.000}$	$= \frac{ppmHCs}{1.000.000} \cdot n_{gas_i}$
$\frac{ppmCO_2}{1.000.000}$	$\frac{ppmCO_2}{1.000.000}$	$\frac{ppmCO_2}{1.000.000}$	$1 - \frac{ppmCO_2}{1.000.000}$	$= \frac{ppmCO_2}{1.000.000} \cdot n_{gas_i}$

Donde las cantidades  $ppmH_2$ ,  $ppmCO$ ,  $ppmHCs$  y  $ppmCO_2$  corresponden a las concentraciones en partes por millón (ppm) de hidrógeno, monóxido de carbono, hidrocarburos gaseosos y dióxido de carbono, respectivamente; valores que fueron medidos en cada ensayo con los analizadores de gases disponibles. Por otra parte el valor  $n_{gas_i}$  corresponde al número de moles calculadas de gas antes de iniciar cada ensayo.

De la Ley de Gases Ideales se obtiene un valor estimado confiable dentro de condiciones de presión y temperatura dadas para el número de moles presentes al inicio del experimento. Dicho valor se calcula a partir de la siguiente expresión:

$$n_{gas_i} = \frac{P \cdot V_{gas}}{R \cdot T} \quad (7.8)$$

Donde  $P$  es la presión dentro del reactor,  $V_{gas}$  es el volumen efectivo donde se confina el gas en el reactor,  $T$  es la temperatura promedio del sistema y  $R$  es la constante de gases ideales ( $R = 8.3144 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). Para el momento inicial del proceso la presión interna es igual que la presión atmosférica ( $P = P_{Atm}$ ).

El volumen efectivo del gas en el reactor es una cantidad dinámica dependiente tanto de la geometría del recipiente y de las piezas expuestas al gas, como de la cantidad de glicerina contenida en el reactor.

Las expresiones para determinar dicha variable de interés se presentan a continuación:

$$V_{gas} = V_{resctor} - V_{glicerol} - V_{partes\ expuestas} \quad (7.9)$$

$$V_{glicerol} = \pi \cdot (h_{glicerol}) \cdot (r_{reactor})^2 \quad (7.10)$$

$$V_{partes\ expuestas} = V_{empaquete\ menor} + V_{soporte\ electrodo\ sup.} + V_{electrodo\ sup.} \quad (7.11)$$

Los detalles de la geometría de construcción del reactor se citan en las tablas 24 y 25 y las figuras del apéndice B presentan las diferentes vistas de las piezas del reactor.

**Tabla 25.** Características de las piezas empleadas en el reactor.

Pieza	Forma	Material	Dimensiones [cm]
Electrodo superior <sup>38</sup>	Cilíndrica con punta en forma de segmento de cono	Acero aleación 308	$r=0,95$ $h_1=25$ $r_{cono1}=0,95$ $r_{cono2}=0,1$ $h_2=1,5$
Soporte electrodo superior <sup>39</sup>	Cilíndrica hueca unida a disco conector de forma cilíndrica	Acero aleación 308	$r_1=1,4$ $h_1= 1,1$ $r_2=3,55$ $h_2=25,4$
Electrodo inferior	Cilíndrica con punta en forma de segmento de cono	Acero aleación 308	$r= 0,95$ $h_1=9$

<sup>38</sup>Dependiente de la distancia inter-electrodos para el volumen efectivo expuesto al gas del reactor.

<sup>39</sup>Pieza cilíndrica hueca que para efectos del cálculo del volumen expuesto al reactor se considera como sólida.

			$r_{cono1}=0,95$ $r_{cono2}=0,1$ $h_2=1,5$
Disco de conexión	Cilíndrica	Acero aleación 308	$r=3,55$ $h=1,1$
Empaque menor	Cilíndrica	Nitrilo	$r=3,55$ $h=0,5$
Empaque mayor	Cilíndrica	Nitrilo	$r=20$ $h=0,3$
Recipiente	Cilíndrica	Acrílico	$r=15$ $h=60$
Tapa	Cilíndrica	Acrílico	N/A

**Tabla 26.** Características de las piezas empleadas en el reactor (2).

Pieza	Fórmula de volumen efectivo	Volumen calculado [cm <sup>3</sup> ]	No. de piezas / Piezas en el gas
Electrodo superior <sup>40</sup>	$V_{punta} = \frac{1}{3} \cdot (h \cdot \pi \cdot r_{cono1}^2 - h \cdot \pi \cdot r_{cono2}^2)$ $V_{cilindro} = (h_{recipiente} - 2 \cdot h_{empaquete} - h_{2soporte} - 2 \cdot h_{disco} - d) \cdot \pi \cdot r^2$ $V_{total} = V_{cilindro} + V_{punta}$	Dependiente de la separación de electrodos	1/1
Soporte electrodo superior <sup>41</sup>	$V_{cilindro} = h_1 \cdot \pi \cdot r_1^2$ $V_{base} = h_2 \cdot \pi \cdot r_2^2$	215.79	1/1

<sup>40</sup>Dependiente de la distancia inter-electrodos para el volumen efectivo expuesto al gas del reactor.

<sup>41</sup>Pieza cilíndrica hueca que para efectos del cálculo del volumen expuesto al reactor se considera como sólida.

Electrodo inferior	$V_{punta} = \frac{1}{3} \cdot (h \cdot \pi \cdot r_{cono1}^2 - h \cdot \pi \cdot r_{cono2}^2)$ $V_{cilindro} = h \cdot \pi \cdot r^2$ $V_{total} = V_{cilindro} + V_{punta}$	26.92	1/0
Disco de conexión	$V = h \cdot \pi \cdot r^2$	43,55	3/0
Empaque menor	$V = h \cdot \pi \cdot r^2$	1,564	4/1
Recipiente	$V = h \cdot \pi \cdot r^2$	42.411,50	1/1
Tapa	Despreciable	Despreciable	1/1

Donde  $r$  es el radio de la pieza cilíndrica,  $r_{cono1}$  es el radio mayor y  $r_{cono2}$  es el radio menor del segmento de cono,  $d$  es la distancia inter-electrodos.

La energía de entrada del proceso fue calculada como el producto de la potencia activa medida (con el wattmetro) y el tiempo de duración del experimento, en segundos. El costo del syngas producido fue calculado teniendo en cuenta tanto el coeficiente energético del hidrógeno denominado Valor de Calentamiento más Bajo (LHV, por sus siglas en inglés), el cual es de 120,971 MJ/Kg; así como el peso molecular de la molécula de hidrógeno: 2,01589 g/mol.

Finalmente tanto la eficiencia energética como la económica fueron calculadas por la relación de energía de entrada vs. energía de salida (del hidrógeno generado) y por el costo de la energía de entrada vs. costo de producto (syngas), respectivamente.

Teniendo en cuenta diversos factores incidentes en el desarrollo del experimento, como son los relativos al comportamiento de los equipos de medición y del funcionamiento de éstos a lo largo de los ensayos (Por ejemplo la saturación dinámica del detector y el efecto de succión en el medidor a una tasa mayor que la propia de generación de los gases), se procedió a determinar valores promedio para los intervalos de velocidades de producción de los gases con tasas de crecimiento positivas. Dichos valores son reportados en el presente trabajo y

utilizados como apoyo en los cálculos de cantidades esperadas de producto para efectos estimativos y comparativos.

Los valores promedio de los ensayos realizados a la muestra de glicerina cruda para los dos tratamientos, se presentan en las tablas 26 y 27 y los valores de todos los ensayos se presentan en el apéndice E.

Para las tablas 26 y 27 los valores reportados corresponden a:

- Las cantidades finales de cada gas medido para la columna de *Datos Finales*.
- Las cantidades proyectadas para valores de velocidad máxima de generación de cada gas medido en la columna *Velocidad Máxima*.
- Las cantidades proyectadas para valores de velocidad promedio neta de generación de cada gas medido en la columna *Velocidad Promedio Neta*.
- Las cantidades proyectadas para valores de velocidad promedio de intervalos crecientes de generación de cada gas medido en la columna *Velocidad Promedio Parcial*. Este último caso como una corrección a los errores por saturación del medidor de CO, CO<sub>2</sub> y HCs, y la sobre-extracción de producto por dicho medidor.

**Tabla 27.** Resultados promedio del experimento para el tratamiento A.

Variables	Muestra	Representativa Cruda		Ensayo [Número]		PROMEDIO TRATAMIENTO A	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]		0,37	Separación electrodos [cm]		1
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,6	Valor pico/pico tensión entrada pulsante [V]		2,21	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima [ppm/s]	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta [ppm/s]	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial [ppm/s]
CO		8.900		130.000	2.166,67	3.857,14	64,29	3.6983,33	616,39
H <sub>2</sub>		4.209,67		7.725,83	128,76	2.664,07	44,40	1.884,46	31,41
CO <sub>2</sub>		6.000		121.460	2.024,33	1.698,31	28,30	7.269,88	121,16
HCs		936,33		70.400	1.173,33	5.279,22	87,98	2.0759,52	345,99
Potencia de entrada [Watt/rms]		35		35		35		35	
Tensión entrada total [Vrms]		11,80		11,80		11,76		11,80	
Corriente entrada total [Arms]		3,47		3,47		3,47		3,47	
Factor de potencia		0,86		0,86		0,85		0,86	
Altura de glicerina final [cm]		7,6		7,6		7,6		7,6	
Cantidad de glicerina gastada [L]		0,00		0,00		0,00		0,00	
Volumen de gas [L]		8,98		8,98		8,98		8,98	
H <sub>2</sub> [moles]		0,001591		0,004268		0,0010002		0,0007480	
CO [moles]		0,003364		0,07182		0,001448		0,01468	
Energía de entrada total [J]		<b>2.100</b>		<b>2.100</b>		<b>2.100</b>		<b>2.100</b>	
Energía de salida total (H2) [J]		<b>387,98</b>		<b>1.040,81</b>		<b>243,90</b>		<b>182,40</b>	

**Tabla 28.** Resultados promedio del experimento para el tratamiento B.

Variables	Muestra	Representativa Cruda		Ensayo [Número]		PROMEDIO TRAT. B	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]		0,37	Separación electrodos [cm]		1,5
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,7	Valor pico/pico tensión entrada pulsante [V]		2,21	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima [ppm/s]	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta [ppm/s]	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial [ppm/s]
CO		3733,33		168000	2800	4580	76,33	34441,01	719,70
H <sub>2</sub>		5023,67		2780	46,33	1160,84	19,35	938,90	15,65
CO <sub>2</sub>		5833,33		21153,33	352,56	713,6	11,89	6182,54	103,04
HCs		1336		100666,67	1677,78	4180	69,67	33406,35	556,77
Potencia de entrada [Watt/rms]		39,33		39,33333333		39		39,33333333	
Tensión entrada total [Vrms]		11,7		11,7		11,695		11,7	
Corriente entrada total [Arms]		3,9		3,9		3,9		3,9	
Factor de potencia		0,86		0,86		0,86		0,86	
Altura de glicerina final [cm]		7,6		7,6		7,6		7,6	
Cantidad de glicerina gastada [L]		0,03534		0,03534		0,03534		0,03534	
Volumen de gas [L]		8,99		8,99		8,99		8,99	
H <sub>2</sub> [moles]		0,001887		0,001453		0,0004338		0,0003752	
CO [moles]		0,001403		0,08780		0,001711		0,01376	
Energía de entrada total [J]		2360		2360		2340		2360	
Energía de salida total (H2) [J]		460,23		354,29		105,78		91,51	

Los experimentos se detuvieron antes de completar los ensayos con una segunda muestra de glicerol crudo para valores de separación de electrodos menores a 1cm. Lo anterior debido a una explosión controlada que inutilizó el reactor y pone de manifiesto la necesidad de incorporar más controles a un diseño futuros, los cuales deben tener en cuenta la necesidad de incorporar sistemas de seguridad como los de alivio de presión, entre otros.

Este evento inesperado pudo tener causa en la presencia de trazas de sustancias combustibles en la muestra (Como el metanol derivado del proceso de producción del biodiesel) y a la acumulación de gases generados en el proceso, dentro de los cuales el hidrógeno pudo generar una reacción de explosión con el arco eléctrico del sistema.

Los resultados obtenidos en las pruebas y promediados en las tablas 27 y 28 permitieron confirmar la formación de gas de síntesis durante la experimentación realizada de gasificación vía plasma inducido por arco eléctrico de muestras selectas de glicerol crudo.

El análisis de estos resultados permitió evaluar el proceso estudiado desde el punto de vista energético y económico, según se presenta a continuación.

- **Análisis económico**

La determinación de la viabilidad del proceso de generación de syngas mediante plasma generado por arco eléctrico, implica el balance económico neto, teniendo en cuenta las variables determinantes para los escenarios de interés.

Dada la volatilidad de los precios de materias primas, insumos y productos, se decidió tener en cuenta dos escenarios económicos en base a los precios estimados de las variables más representativas el cálculo de precios y costos. Los costos inherentes a equipos, materias primas, mano de obra y demás

factores que influyen directamente en el costo del proceso fueron obviados en el presente análisis, debido a que constituyen tema de un estudio económico más profundo en el contexto del desarrollo de una planta piloto.

El análisis económico del proceso se desarrolló teniendo presente el carácter dinámico de los precios de materias primas y productos. Por tal motivo se plantean tres escenarios económicos para el análisis del proceso, los cuales van del hipotéticamente más favorable (escenario 1) hasta el más desfavorable (escenario 3) de los casos analizados.

La tabla 28 muestra los precios de energía eléctrica y del syngas para cada escenario planteado.

**Tabla 29.** Costos de producción y precios comerciales del producto para los escenarios planteados.

Escenario	Precio de la energía eléctrica [\$/kwh]	Precio del Syngas [\$/kg] *
1	104,44 <sup>42</sup>	9.500 <sup>43</sup>
2	152 <sup>44</sup>	6.137 <sup>45</sup>
3	264,50 <sup>46</sup>	7.790 <sup>47</sup>

\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.

Los valores de la energía eléctrica referenciados en la tabla 28, corresponden al valor reportado por la empresa XM, la Electrificadora de Santander ESSA y un valor referencial medio para el costo. Por otra parte los precios del hidrógeno corresponden a reportes e investigaciones para tecnologías maduras y tecnologías en desarrollo a partir de energías renovables.

<sup>42</sup> Precio XM de bolsa energética 07/10/11 (<http://www.xm.com.co/Pages/default.aspx>)

<sup>43</sup> (MANAGE, 2011)

<sup>44</sup> <http://www.think-energy.net/electricitycosts.htm>

<sup>45</sup> (HUISMAN, 2011)

<sup>46</sup> Precio ESSA sept. 2011 Industrial (Apéndice J)

<sup>47</sup> (GREGORINI, 2010)

La correlación de los datos recabados para los dos tratamientos estudiados y los valores de energía de entrada y del producto en los mercados, permitieron obtener los valores de eficiencia económica para cada escenario estudiado. Los valores de la eficiencia económica y energética del proceso se presentan en las tablas 29 a 34.

**Tabla 30.** Costos y eficiencias para el proceso en el tratamiento A promedio en escenario económico 1.

	Datos finales Concentración [ppm]	Funcionamiento con velocidad máxima	Funcionamiento con velocidad promedio neta	Funcionamiento con velocidad promedio parcial
Costo de funcionamiento [\$]	0,06092	0,06092	0,06092	0,06092
Costo de producto (Syngas) [\$]*	0,02245	0,06023	0,01411	0,01055
Eficiencia energética %	18,48	49,56	11,61	8,69
Eficiencia económica %	36,85	98,86	23,17	17,32

\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.

**Tabla 31.** Costos y eficiencias para el proceso en el tratamiento B promedio en escenario económico 1.

	Datos finales Concentración [ppm]	Funcionamiento con velocidad máxima	Funcionamiento con velocidad promedio neta	Funcionamiento con velocidad promedio parcial
Costo de funcionamiento [\$]	0,06847	0,06847	0,06789	0,06847
Costo de producto (Syngas) [\$]*	0,03614	0,027823	0,008307	0,007186
Eficiencia energética %	19,50	15,01	4,52	3,88

Eficiencia económica %	52,79	40,64	12,24	10,50
------------------------	-------	-------	-------	-------

*\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.*

**Tabla 32.** Costos y eficiencias para el proceso en el tratamiento A promedio en escenario económico 2.

	Datos finales Concentración [ppm]	Funcionamiento con velocidad máxima	Funcionamiento con velocidad promedio neta	Funcionamiento con velocidad promedio parcial
Costo de funcionamiento [\$]	0,08867	0,2660	0,2660	0,266
Costo de producto (Syngas) [\$]*	0,02498	0,03678	0,01416	0,01001
Eficiencia energética %	18,48	9,07	3,49	2,47
Eficiencia económica %	28,18	13,83	5,32	3,76

*\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.*

**Tabla 33.** Costos y eficiencias para el proceso en el tratamiento B promedio en escenario económico 2.

	Datos finales Concentración [ppm]	Funcionamiento con velocidad máxima	Funcionamiento con velocidad promedio neta	Funcionamiento con velocidad promedio parcial
Costo de funcionamiento [\$]	0,0996	0,2989	0,2964	0,2989
Costo de producto (Syngas) [\$]*	0,02963	0,1699	0,02088	0,01906
Eficiencia energética %	19,50	37,23	4,62	4,18
Eficiencia económica %	29,74	56,82	7,05	6,38

*\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.*

**Tabla 34.** Costos y eficiencias para el proceso en el tratamiento A promedio en escenario económico 3.

	Datos finales Concentración [ppm]	Funcionamiento con velocidad máxima	Funcionamiento con velocidad promedio neta	Funcionamiento con velocidad promedio parcial
Costo de funcionamiento [\$]	0,1543	0,4629	0,4629	0,4629
Costo de producto (Syngas) [\$]*	0,01968	0,02898	0,01116	0,00788
Eficiencia energética %	18,48	9,07	3,49	2,47
Eficiencia económica %	12,76	6,26	2,41	1,70

*\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.*

**Tabla 35.** Costos y eficiencias para el proceso en el tratamiento B promedio en escenario económico 3.

	Datos finales Concentración [ppm]	Funcionamiento con velocidad máxima	Funcionamiento con velocidad promedio neta	Funcionamiento con velocidad promedio parcial
Costo de funcionamiento [\$]	0,1734	0,5202	0,5158	0,5202
Costo de producto (Syngas) [\$]*	0,02335	0,1338	0,01645	0,01502
Eficiencia energética %	19,50	37,26	4,62	4,18
Eficiencia económica %	13,47	25,73	3,19	2,89

*\*Teniendo en cuenta el precio del hidrógeno gaseoso.*

El tratamiento A es claramente el más beneficioso arrojando un rendimiento económico cercano al 52% en el escenario económico 1. Dicho valor puede ser mayor si se lograra conseguir un proceso de generación de syngas continuo a tasas cercanas a las de la velocidad máxima de generación de syngas, en el caso de un punto de funcionamiento optimizado del prototipo.

Para el escenario y tratamiento más benévolo se debe considerar que el punto de equilibrio (donde la eficiencia económica alcanza el 100%) se encuentra sobre los 8 dólares de valor de producción del hidrógeno, lo que constituye una cifra no lejana en comparación con otros procesos competitivos con materias primas novedosas como biomasa.<sup>48</sup>

El concepto global de viabilidad del proceso está sujeto a los rendimientos y al impacto ambiental del mismo. Estos aspectos requieren un estudio minucioso y multidisciplinar para juzgar la conveniencia de escalar el proceso en planta piloto. Con los datos obtenidos se puede decir que en un escenario favorable por costos de energía, de producto o por intervención de entes públicos vía subsidio, es posible concebir un proceso rentable en un futuro cercano, para el contexto económico nacional.

Un estudio económico más detallado del proceso, implica la recolección de un acervo mucho más extenso de datos particulares del comportamiento del proceso, la optimización del mismo y el estudio detallado de costos.

- **Análisis energético**

Los valores finales de cantidad de energía invertida y cantidad de producto de interés generado, son tenidos en cuenta para la evaluación de la configuración más adecuada del reactor tipo, teniendo en mente la eficiencia energética y

---

<sup>48</sup>(MANAGE, 2011), (HUISMAN, 2011) y (GREGORINI, 2010)

económica, y la cantidad de producto medido promedios para cada configuración.

El rendimiento energético del proceso es magro e inferior al esperado, siendo cercano al 20% en el promedio del tratamiento A. Una hipótesis sobre este hecho (aparte de la derivada de posibles fugas de gas en el reactor), radica en la posibilidad de pérdida de producto en el entorno del plasma por la combustión de éste (según se reseñó anteriormente), lo cual puede ocurrir si se tiene en cuenta el desbalance molar entre las especies de monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos gaseosos con respecto al hidrógeno medidos en cada ensayo (Ver tablas en anexo E).

La eficiencia energética logra un máximo cercano al 23% para un ensayo particular, lo cual invita a revisar el sistema para futuros desarrollos, en aras de incrementar la misma.

Un correctivo a las situaciones problemáticas hipotéticas que se propone es un diseño de prototipo que permita al gas generado salir de las cercanías del plasma entre electrodos de manera más expedita a medida que es generado, o por medio de un sistema de vacío que impida la combustión continua en el reactor.

## **7.4 MAPA DEL PROCESO EN IDEF0**

Considerando la metodología IDEF0 como medio de presentación del mapa del proceso, se establecen los elementos del mapa y la conformación de los mismos dentro de este mapa.

- **Entradas y salidas**

El sistema planteado toma como producto de entrada la glicerina proveniente de la producción de biodiesel, otra entrada consiste en la energía eléctrica, la cual en forma de arco eléctrico actuara como agente que transformara la glicerina en el producto de salida que se espera que sea syngas y algún otro subproducto que resulte del proceso.

- **Actividades o procesos**

El proceso general es la obtención de syngas a partir de glicerol, este proceso viene integrado de otras actividades las cuales en orden de ejecución serian:

- **Conversión AC/DC**

En este proceso se toma la energía eléctrica disponible en la red que es 120V AC para convertirla en 12V DC que es la tensión de operación tanto de la etapa de potencia como el transformador elevador de tensión, este proceso tiene como entrada la energía eléctrica en forma de corriente alterna y como salida la energía eléctrica en forma de corriente continua.

- **Generación de señal**

Esta actividad está conformada por el proceso que realiza el generador de señales para producir la señal con la forma de onda, frecuencia y amplitud definida por el usuario, tiene como entrada la energía eléctrica AC y como salida la señal deseada, el mecanismo que opera en este proceso es el generador de señales.

- **Amplificación de potencia**

En esta etapa del proceso la actividad que se realiza es tomar la señal del generador y mediante dispositivos de amplificación de corriente que son los arreglos Darlington y el opto acoplador para producir una señal con las mismas características de forma y frecuencia pero que permita entregar una

corriente suficiente para el consumo que tiene en el primario del transformador elevador de tensión.

- **Elevación de tensión**

En este proceso se toma la señal amplificada y se eleva su tensión al nivel de alrededor de los 26000V para producir el arco eléctrico el mecanismo que se usa en este proceso es el autotransformador o bobina de alta tensión.

- **Generación de plasma**

En este proceso mediante dos electrodos separados una distancia variable y con varias alternativas de configuración de los mismos se produce un arco eléctrico, donde al romperse la rigidez dieléctrica del medio comprendido entre ellos por la elevada diferencia de potencial entre dichos electrodos por la señal de alta tensión que se les conecta.

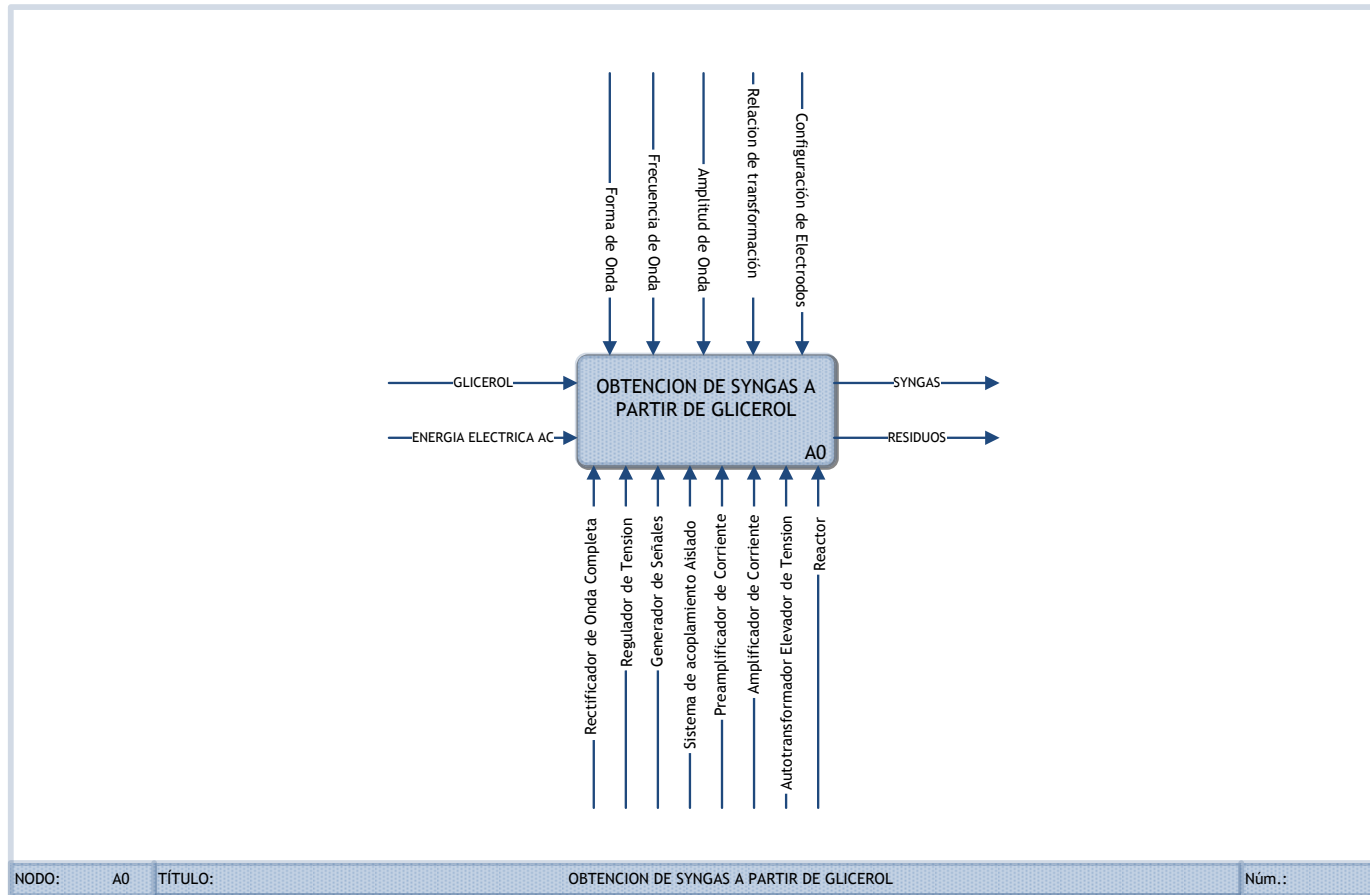
Este bloque tiene como entrada la energía eléctrica en forma de señal de alta tensión y como salida la energía que se deriva del plasma en la forma del arco eléctrico.

- **Gasificación del glicerol**

En esta etapa del proceso se somete al material de entrada que es la glicerina a la acción del plasma, el cual rompe los enlaces de las moléculas del glicerol dando como producto entre otros residuos el syngas el cual es el objeto del sistema, el mecanismo donde se lleva a cabo este proceso es el reactor plasma químico.

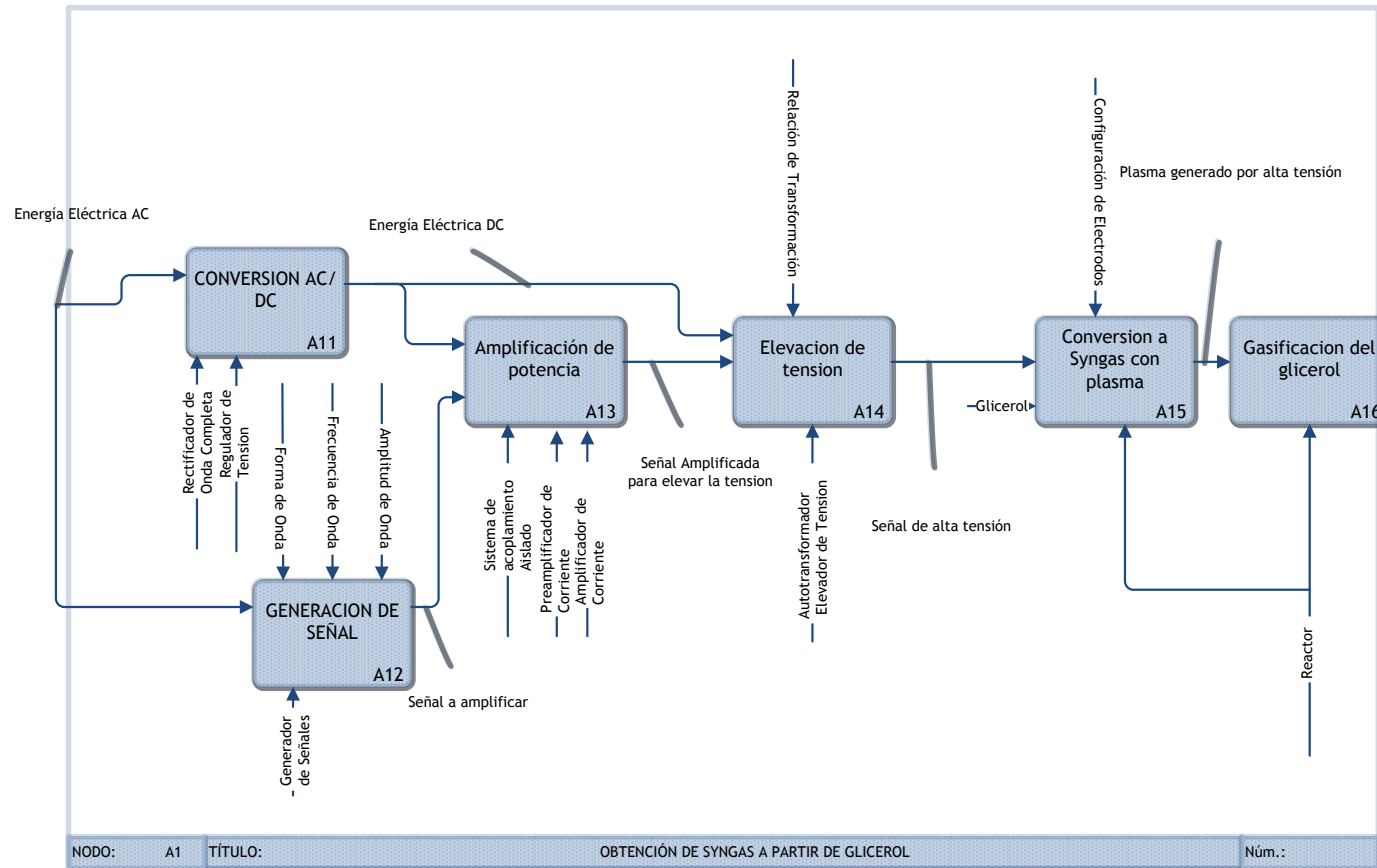
Los bloques del mapa del proceso se presentan a continuación:

**Figura 69.** Bloque A0 donde se muestra el proceso completo del sistema con sus entradas, controles, mecanismos y salidas.



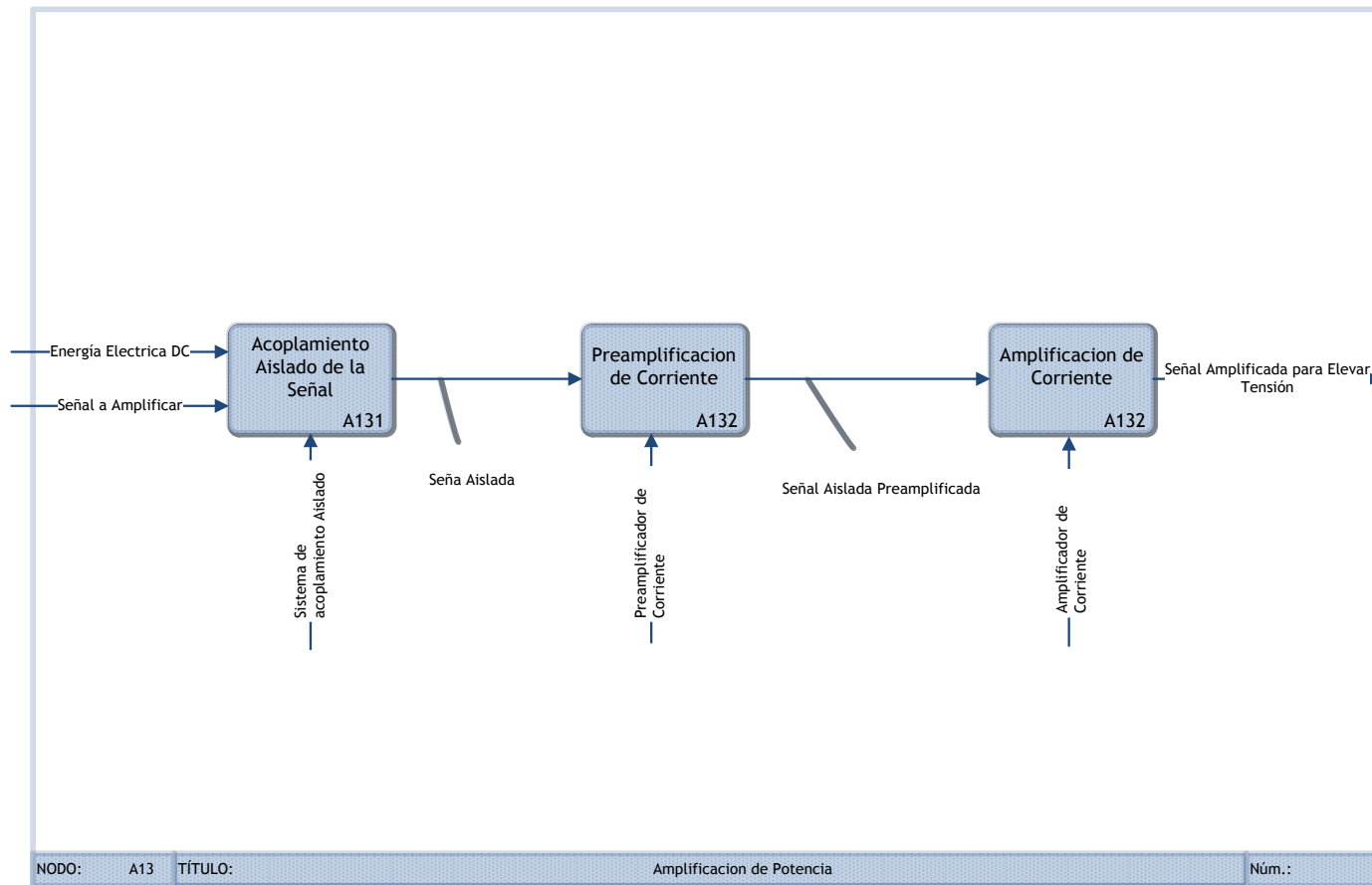
**Fuente:** Propia.

**Figura 70.** Mapa del proceso completo donde se muestran las actividades y la manera como se relacionan a través de las entradas, las salidas, los mecanismos y los controles.



Fuente: Propia.

**Figura 71.** Detalle del proceso amplificación de potencia.



**Fuente:** Propia.

## CONCLUSIONES

Los ensayos realizados en el contexto del diseño experimental permitieron la obtención de datos relevantes sobre los fenómenos de conversión de glicerina en gas de síntesis. El análisis de los datos recabados permiten emitir un concepto favorable de viabilidad del proceso, restringiendo los criterios de aceptación a los ámbitos energéticos y económicos.

Los resultados arrojan rendimientos promedio cercanos al 20% de eficiencia energética y al 50% de eficiencia económica para el escenario económico y las condiciones experimentales más favorables. Sin embargo ensayos individuales alcanzaron un mayor nivel de eficiencia energética (cercano al 25%) y por consiguiente económica (cercano al 60%). Cabe anotar a partir de un desarrollo experimental más riguroso, se pueden incrementar dichos rendimientos e influir en un concepto más favorable de viabilidad del proceso.

Con base en proyecciones y visualización de escenarios, es posible vislumbrar un escenario de viabilidad de un proceso piloto que contemple mejoras de diseño, incremento de eficiencia y una posible acción de políticas públicas para abaratar costes de producción.

Se desarrolló un mapa en IDEF0 del proceso implementado, de manera que se cuente con un esquema que represente el proceso y permita identificar los elementos que conforman el mismo y se comprenda con facilidad la manera como éstos interactúan.

Los análisis de hidrógeno, monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos gaseosos, presentan un fenómeno de oscilación de las velocidades y concentraciones en el tiempo, por efecto de la variabilidad del fenómeno

estudiado y de la naturaleza del proceso de toma de muestras propio del equipo. Lo anterior tiene implicación en la imposibilidad de obtener un modelo más preciso del fenómeno.

Una caracterización más completa de las propiedades eléctricas de la glicerina, tanto cruda como de alta pureza, requiere la implementación de ensayos y simulaciones basadas en la teoría de descargas parciales. Este proceso conlleva la obtención de un modelo de la respuesta de las sustancias analizadas, ante un crecimiento sostenido de la tensión aplicada (a una tasa de incremento moderada), que iría desde cero hasta niveles de tensión mayores al límite de ruptura dieléctrica.

## RECOMENDACIONES

Es pertinente emprender un análisis más detallado del proceso de conversión de glicerol crudo remanente de la producción de biodiesel en syngas, por medio de conversión directa vía plasma o por conversión plasma-catalítica. Dicho análisis requiere de un prototipo de pruebas más robusto, con mejor hermeticidad, con un diseño optimizado de los electrodos y con mecanismos que impidan que se produzca combustión interna con la muestra de glicerina y/o con las especies gaseosas generadas en el proceso. También es de anotar la necesidad de contar con equipos de medida de mayor exactitud, para efectos de obtener una determinación más exacta de las variables fisicoquímicas del proceso y un cálculo mejorado de las eficiencias del proceso.

Es necesario implementar un estudio de impacto ambiental del proceso y una caracterización físicoquímica rigurosa de las muestras de glicerina, para efectos de obtención de un modelo más desarrollado del proceso.

## BIBLIOGRAFIA

BEDOYA BEDOYA, D; Diseño y construcción de un espinterómetro para un generador de impulso de alta tensión. Manizales: Grupo de Redes de Distribución y Potencia. Universidad Nacional de Colombia, 2004.

BROPHY, J. J. Basic Electronics for Scientists. 3a. Edición. EEUU: McGraw-Hill, 1990.

CORPORACIÓN PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL DE LA BIOTECNOLOGÍA Y PRODUCCIÓN LIMPIA, CORPODIB. Estrategia de inserción del biodiesel en el mercado de los combustibles en Colombia. Disponible en: <http://www.si3ea.gov.co/si3ea/documentos/documentacion/Biodiesel/Capitulo%201.pdf>[Visitado por última vez el 14 de Octubre de 2011]

CZERNICHOWSKI, A. Conversion of waste Glycerol into Synthesis Gas. En: 19th International Symposium on Plasma Chemistry (ISPC-19), Bochum, Germany, Julio 26-31, 2009.

ELIASSON, B.; KOGELSCHATZ, U. Nonequilibrium Volume Plasma Chemical Processing. IEEE Transactionson Plasma Science. Volumen 19; No. 6, Diciembre de 1991. pp. 1060-1069

FRIDMAN, A. Plasma Chemistry, Cambridge University Press, Cambridge, Gran Bretaña, 2008. pp. 690-693.

GANGOLI, S.; GUTSOL, A.; FRIDMAN, A. Applications of Gliding Arc as a Source of Atmospheric Pressure Transitional Plasma, Drexler Plasma Institute, IEEE, Plasma Chesmistry, 2008.

GOUJARD, V.; TATIBOUET, J. M.; BATIOU-DUPEYRAT, C. Use of a non-thermal plasma for the production of synthesis gas from biogas. En: Applied Catalysis A: General 353, 2009. pp. 228–235.

GREGORINI, V.A.; PASQUEVICH, D. y LABORDE, M. Price determination for hydrogen produced from bio-ethanol in Argentina. International Journal of Hydrogen Energy. 35, 2010. pp. 5844–5848.

GUEVARA INJOQUE, M. A. y FLORES NAZARIO, C. R. ALLFusion: Administrando Procesos Empresariales. Disponible en: <http://case.ktris.net/U3BPWin/ldBPWin.PDF> [Visitado por última vez el 14 de Octubre de 2011]

HUISMAN, G.H.; VAN RENS, G.L.M.A.; De LATHOUDER, H. y CORNELISSEN, R.L. Cost estimation of biomass-to-fuel plants producing methanol, dimethylether or hydrogen biomass and Bioenergy. XXX, 2011. pp. 1-12

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE Guide for Transformer Loss Measurement. IEEE Std c57.123-2010, 2002. p. 19.

IEEE: INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. Standard Techniques for High Voltage Testing. IEEE Std 4 – 1995, 1995.

ICONTEC: INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS. Técnicas de ensayo de alta tensión. NTC 4591, 1999. pp. 30-43.

KALRA, C.; CHO, Y.; GUTSO, A.; FRIDMAN, A.; RUFAEL, T. S. Non-thermal plasma catalytic conversion of methane to Syngas. En: Prepr. Pap.-Am. Chem. Soc., Div. Fuel Chem, 2004. p. 49.

KNOTHE, G.; GERPEN, J. V. y KRAHL, J. The biodiesel handbook. Champaign, EEUU: AOCS Press, 2005.

KUFFEL, E.; ZAENGL, W. S. y KUFFEL, J. High Voltage Engineering: Fundamentals. 2a Edición. Oxford, Gran Bretaña: Newnes, 2000.

LOCKE, B. R.; SATO, M.; SUNKA, P.; HOFFMANN, M. R.; CHANG J.-S. Electrohydraulic Discharge and Nonthermal Plasma for Water Treatment. En: Ind. Eng. Chem. Res. 2006, 45, p. 882-905

MANAGE, M.N.; HODGSON, D.; MILLIGAN, N.; SIMONS, S.J.R. y BRETT, D.J.L. A techno-economic appraisal of hydrogen generation and the case for solid oxide electrolyser cells. International Journal of Hydrogen Energy 36, 2011. pp. 5782-5796.

MARSTON, R. M. Optoelectronics Circuits Manual. Oxford, EEUU: 2ª edición. Newnes, 1999. pp. 117-125

MESYATS, G. A. Pulsed Power. Tomsk, Rusia: Institute of High Current Electronics. Springer, 2005, p. 90-100.

MURADOV, N. Z.; Hydrogen Fuel Technology. EEUU: CRC . 2007. Cap. 2. pp-34.

MAGNET LAB: NATIONAL HIGH MAGNETIC FIELD LABORATORY. Florida State University, Los Alamos National Laboratory, y University of Florida. Disponible en: <http://www.magnet.fsu.edu/education/tutorials/java/ignitioncoil/index.html>.

NILLES, D.; Biodiesel Magazine. Combating the Glycerin Glut. Septiembre 1 de 2006. Disponible en: <http://www.biodieselmagazine.com/articles/1123/combating-the-glycerin-glut> [Visitado por última vez el 14 de Octubre de 2011]

OLEOLINE. Glycerine Market Report. Número 71. Diciembre 13 de 2005. Disponible en: [http://www.oleoline.com/admin/oleoftp/marketreport/samples/Q\\_glycerine\\_sample.pdf](http://www.oleoline.com/admin/oleoftp/marketreport/samples/Q_glycerine_sample.pdf) [Visitado por última vez el 14 de Octubre de 2011]

ROHWEIN, G.J.; BABCOCK, S.R. y BUTTRAM, M.T. Advanced Automotive Ignition Systems. EEUU: 10th IEEE International PulsedPowerConference, Albuquerque, New Mexico, 1995. pp 40--43.

SÁNCHEZ S., C. M. Distintos usos del dióxido de carbono en síntesis electroquímica, Tesis Doctoral. Alicante, España: Universidad de Alicante, Septiembre, 2004.

STEINBERG, M.; Conversion of fossil and biomass fuels to electric power and transportation fuels by high efficiency integrated plasma fuel cell (IPFC) energy cycle. En: International Journal of HydrogenEnergy, vol. 31, 2006. pp. 405 – 41

UNIVERSITY OF STRATHCLYDE, Glasgow.Biodiesel: Barreras Potenciales e Impactos. Disponible en:[http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web\\_sites/06-07/Biodiesel/glycerines.htm](http://www.esru.strath.ac.uk/EandE/Web_sites/06-07/Biodiesel/glycerines.htm) [Visitado por última vez el 14 de Octubre de 2.011]

USHAKOV, V Y. et al. Impulse Breakdown of Liquids. Tomsk, Rusia: Tomsk Polytechnik University. Springer, 2007, pp. 263-314

VAN OOST, G. HRABOVSKY, M.; KOPECKY, V.; KONRAD, M.; HLINA, M.; KAVKA,T. Pyrolysis/gasification of biomass for synthetic fuelproduction using a hybrid gas–water stabilized plasma torch. En: Vacuum 83, 2.009. pp. .209–212.

YAN, E.; VAN HEESCH, J. M.; PEMEN, A. J. y HUIJBRECHTS, H. J. From Chemical Kinetics to Streamer Corona Reactor and Voltage Pulse Generator. En: Royal Chemical Society Chem. Commun, Plasma Chemistry and Plasma Processing, Vol. 21, No. 1, 2001.

ZHU, X.; Hoang, T.; LOBBAN, L. L.y MALLINSON, R. G. Plasma reforming of glycerol for synthesis gas production.En: Chem. Commun (Royal ChemicalSociety), Enero 5 de 2009, pp. 2908–2910.

## GLOSARIO

**Amperímetro:** Aparato cuya función principal es la de medición de la corriente en un circuito y/o en partes del mismo

**Biodiesel:** Sustancia producto de la reacción de transesterificación, cuyo principal uso es el de combustible.

**Catalizador:** Sustancia que acelera y facilita las condiciones de una reacción química termodinámicamente posible.

**Chispómetro:** Aparato cuya función principal es la de medición de la tensión de disrupción de muestras líquidas.

**Colisión coulómbica:** Colisión entre partículas cargadas eléctricamente y por lo general de polaridad opuesta.

**Glicerol crudo:** glicerol o glicerina proveniente del proceso de fabricación del biodiesel y que viene mezclado con cantidades variables de reactivos, impurezas y catalizadores del proceso.

**Multímetro:** Aparato capaz de realizar la medición de múltiples variables eléctricas y físicas en un circuito y/o en partes del mismo

**Townsed:** Modelo físico de descarga en gases por acción de un campo eléctrico.

**Transesterificación: Reacción** catalítica entre alcoholes y TAG, cuyo producto principal son los alquil-esteres.

**Triacilgliceroles:** Especie química formada por tres ácidos grasos de cadena variable sujetos a un esqueleto molecular de glicerol por cada carbono del mismo.

**Voltmetro:** Aparato cuya función principal es la de medición de la diferencia de potencial o tensión en un circuito y/o en partes del mismo

**Wattmetro:** Aparato cuya función principal es la de medición de la potencia eléctrica en un circuito y/o en partes del mismo.

# **ANEXOS**

## Anexo A. Propiedades de la glicerina<sup>1</sup>

A continuación se presentan algunas propiedades de la glicerina:

**Tabla A1.** Propiedades de la glicerina.

---

<b>Glicerol o Glicerina</b>	
<b>Nombre (IUPAC) sistemático</b>	
1,2,3-Propanotriol	
<b>Identificadores</b>	
<b>Número CAS</b>	56-81-5
<b>Número RTECS</b>	MA8050000
<b>Propiedades físicas</b>	
<b>Estado de agregación</b>	Líquido
<b>Apariencia</b>	Incoloro
<b>Densidad</b>	1.261 $\text{kg/m}^3$ ; 1,261 $\text{g/cm}^3$
<b>Masa</b>	92,09382 $\mu$
<b>Punto de fusión</b>	291 K ( °C)
<b>Punto de ebullición</b>	563 K ( °C)
<b>Viscosidad</b>	1,5 Pa.s
<b>Peligrosidad</b>	
<b>Punto de inflamabilidad</b>	433 K (160 °C)
<b>Temperatura de autoignición</b>	623 K (350 °C)

---

<sup>49</sup> [Wikipedia, <http://es.wikipedia.org/wiki/Glicerol>]

## Anexo B. Construcción del reactor

**Figura B1.** Vista en perspectiva del reactor ensamblado.

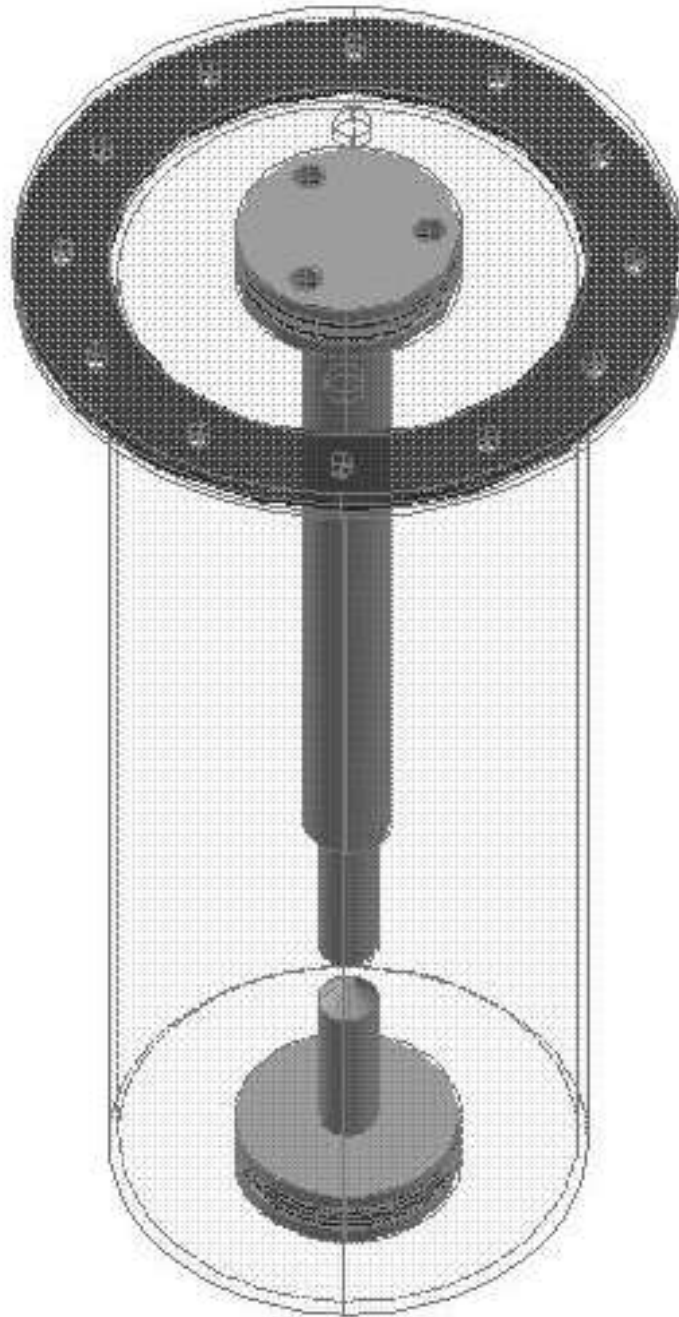
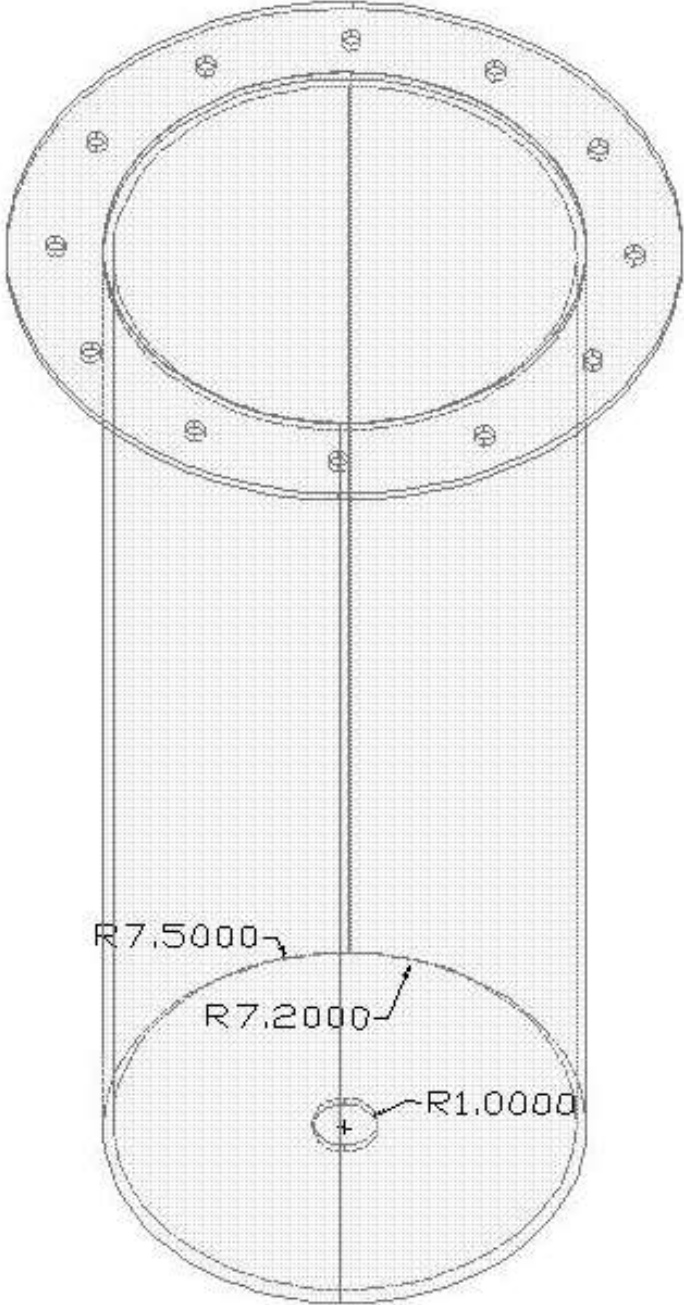
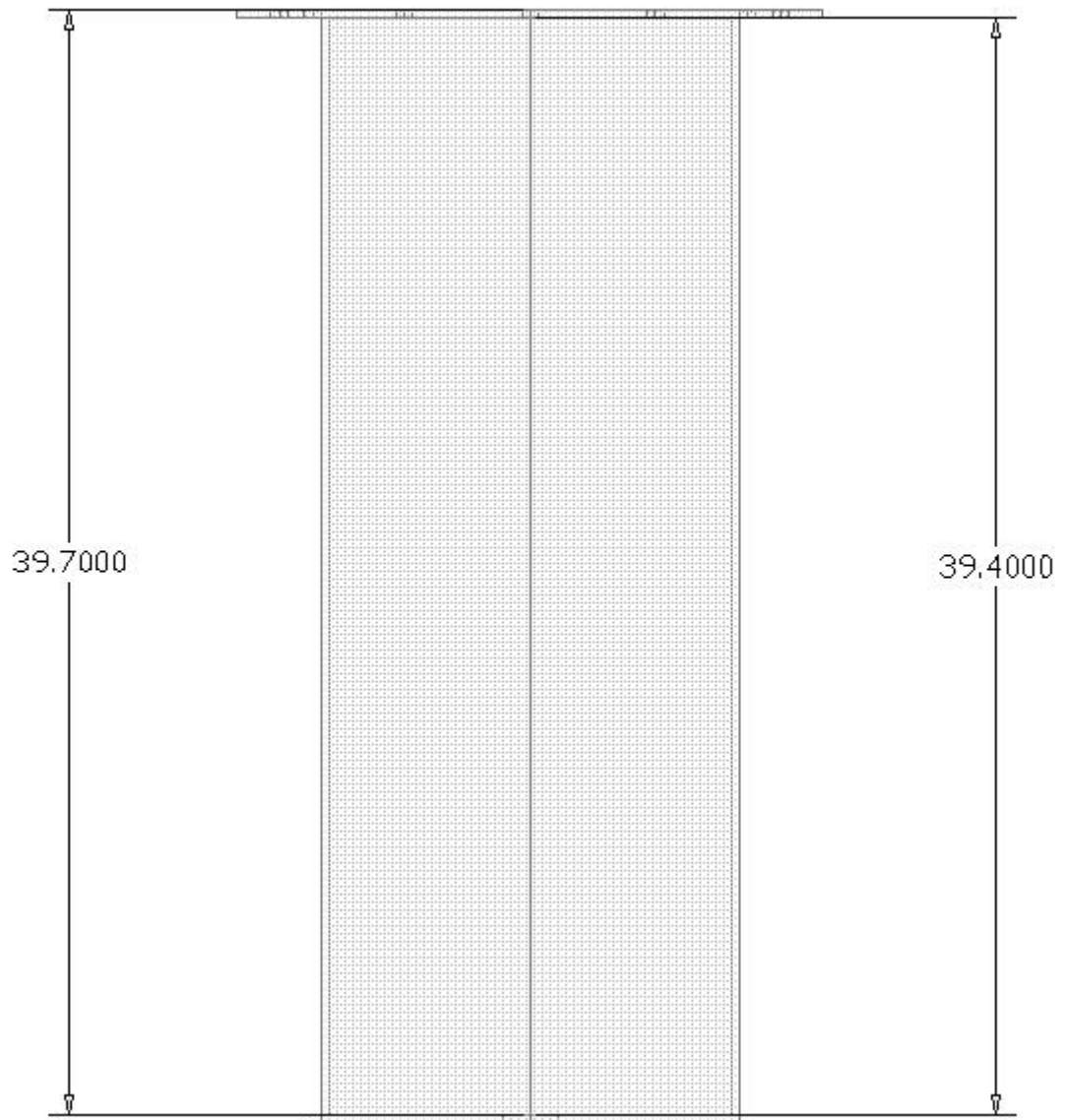


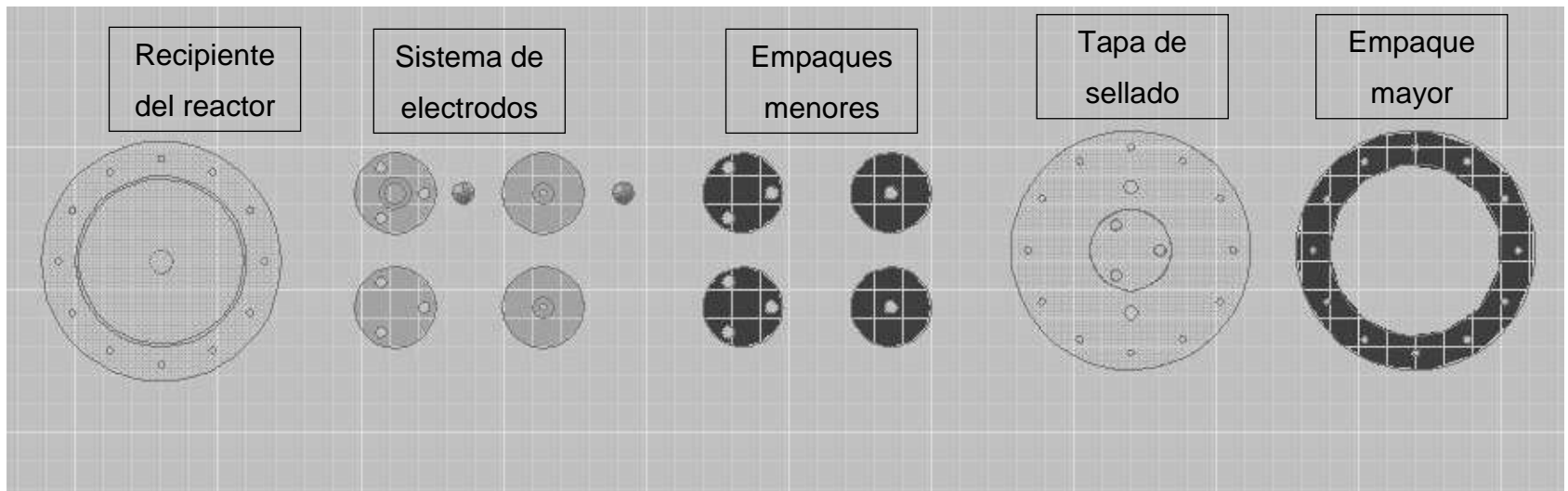
Figura B2. Vista en perspectiva del recipiente del reactor.



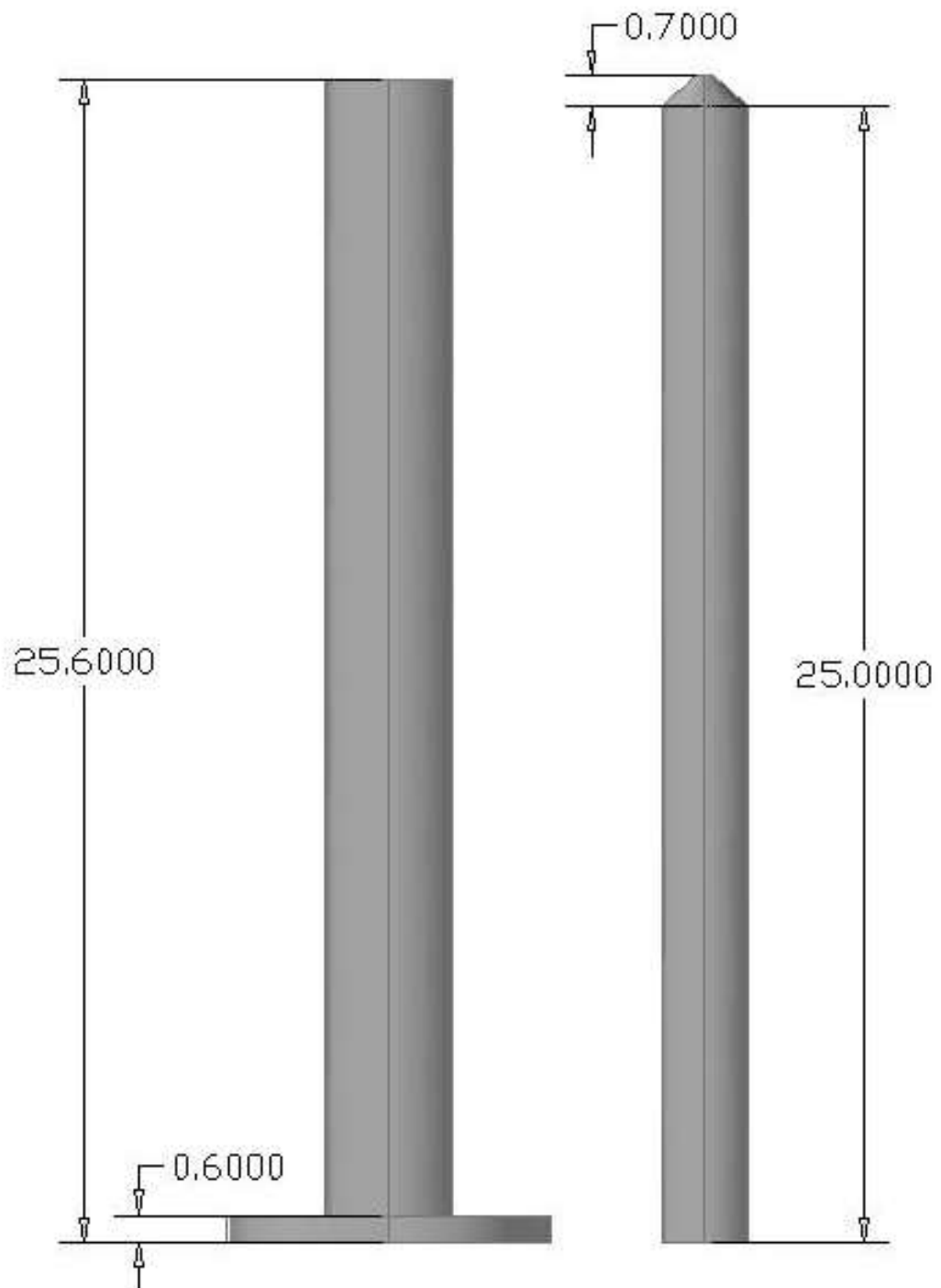
**Figura B3.** Vista frontal del recipiente del reactor.



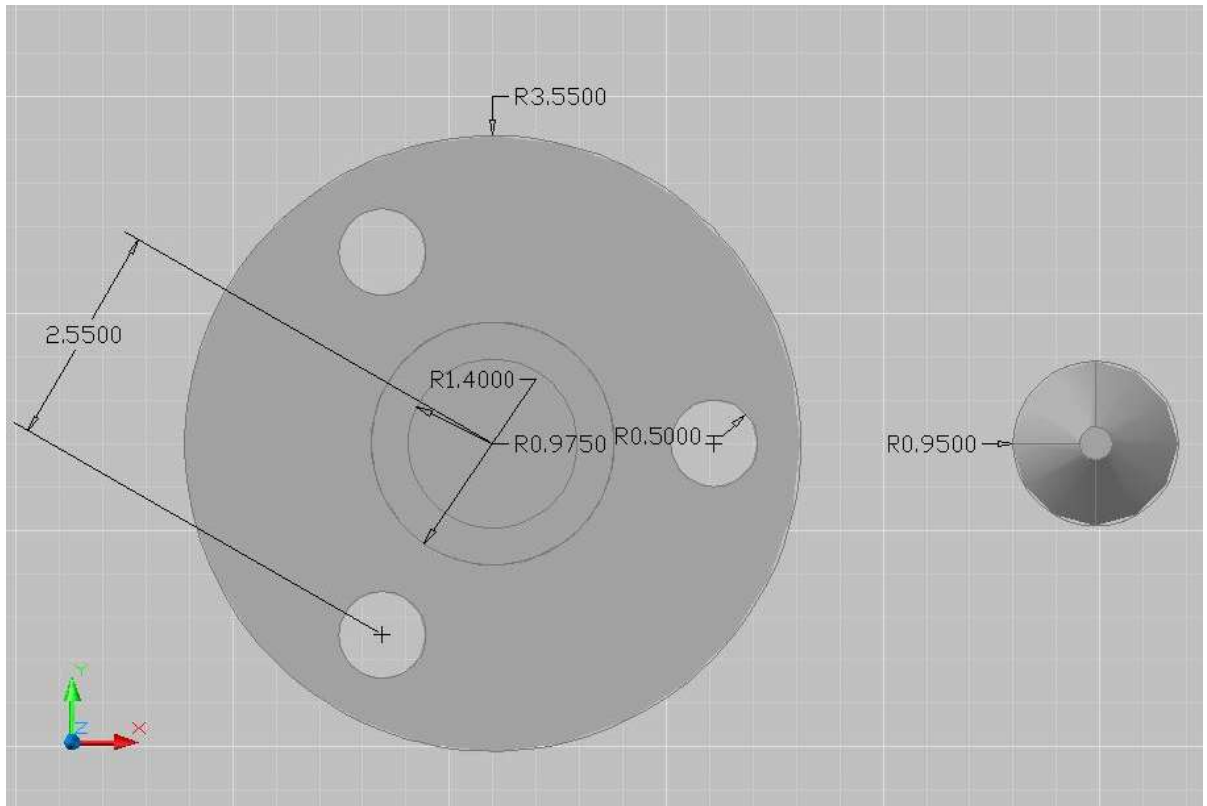
**Figura B4.** Vista superior del reactor desensamblado.



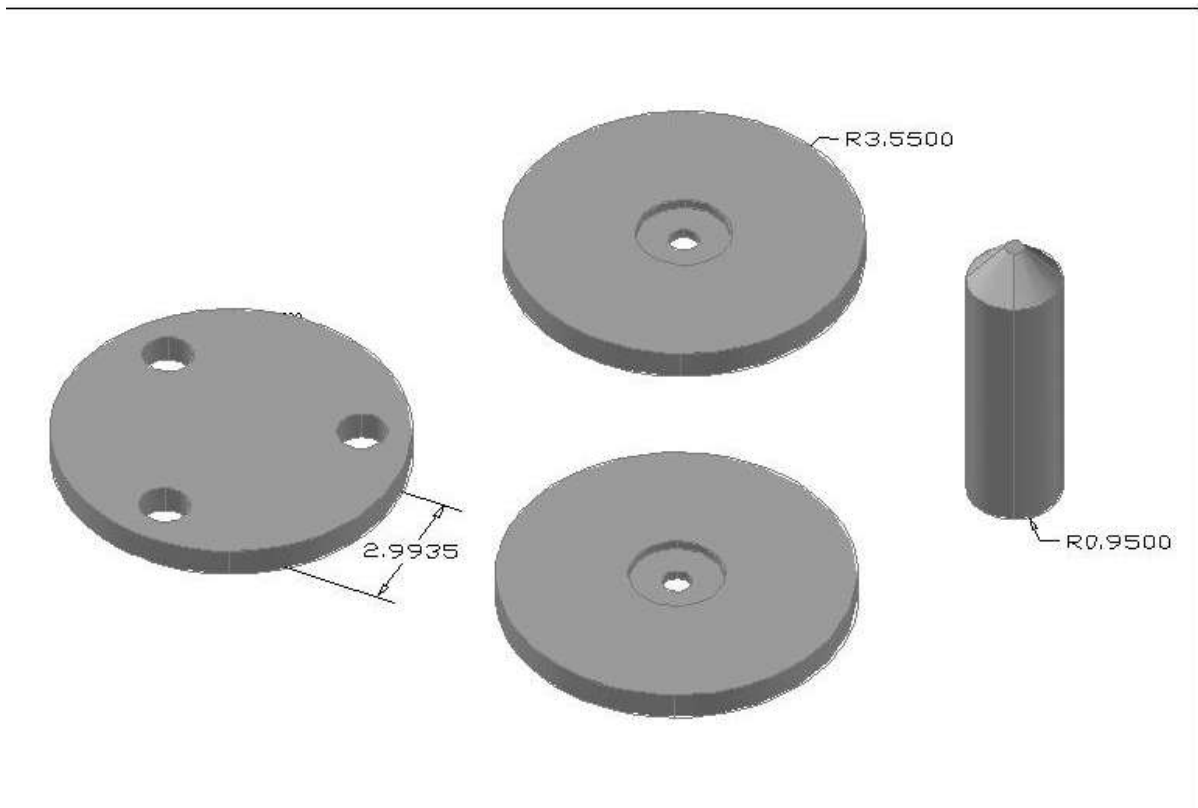
**Figura B5.** Vista frontal del electrodo superior y su soporte.



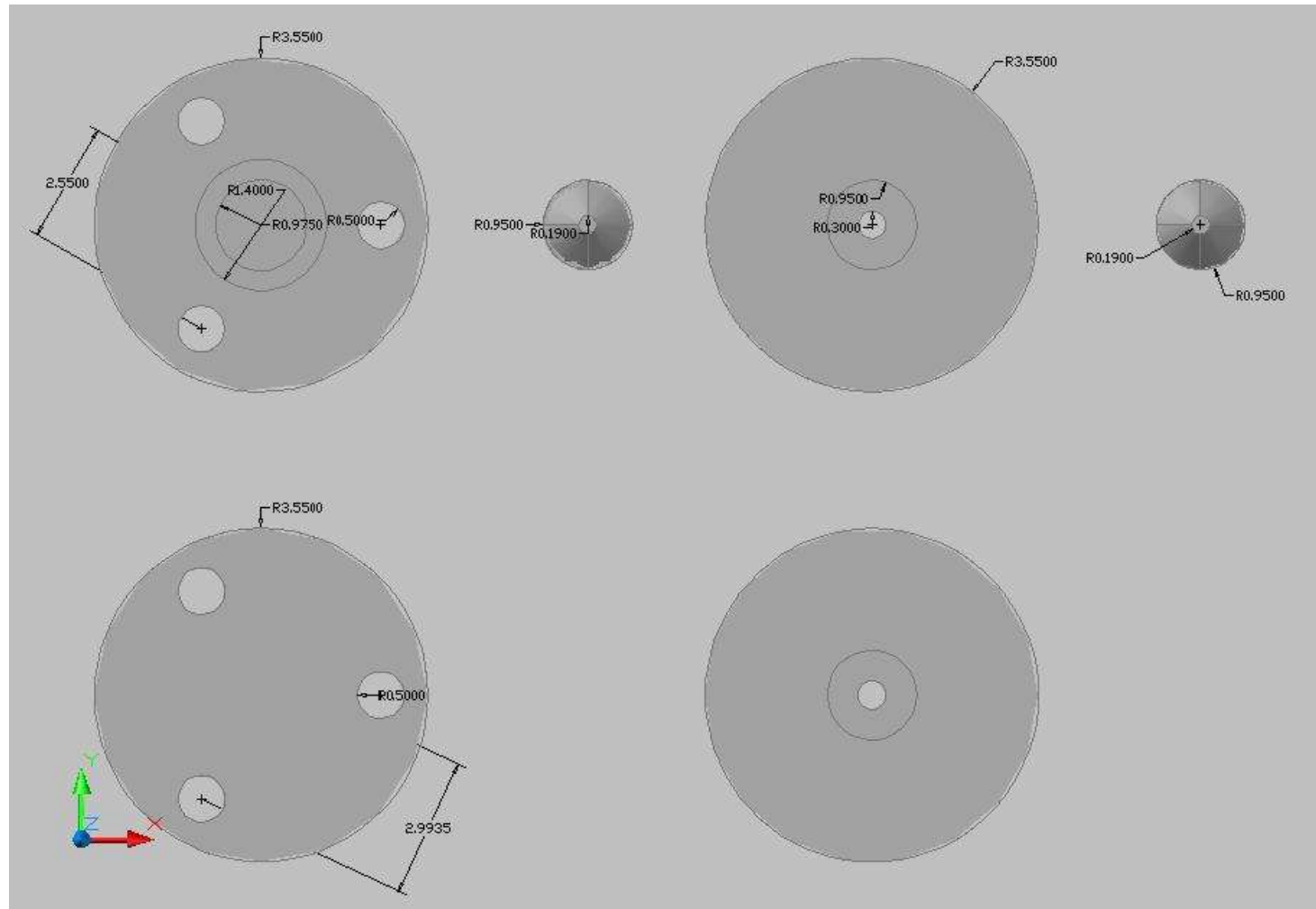
**Figura B6.** Vista superior del electrodo superior y su soporte.



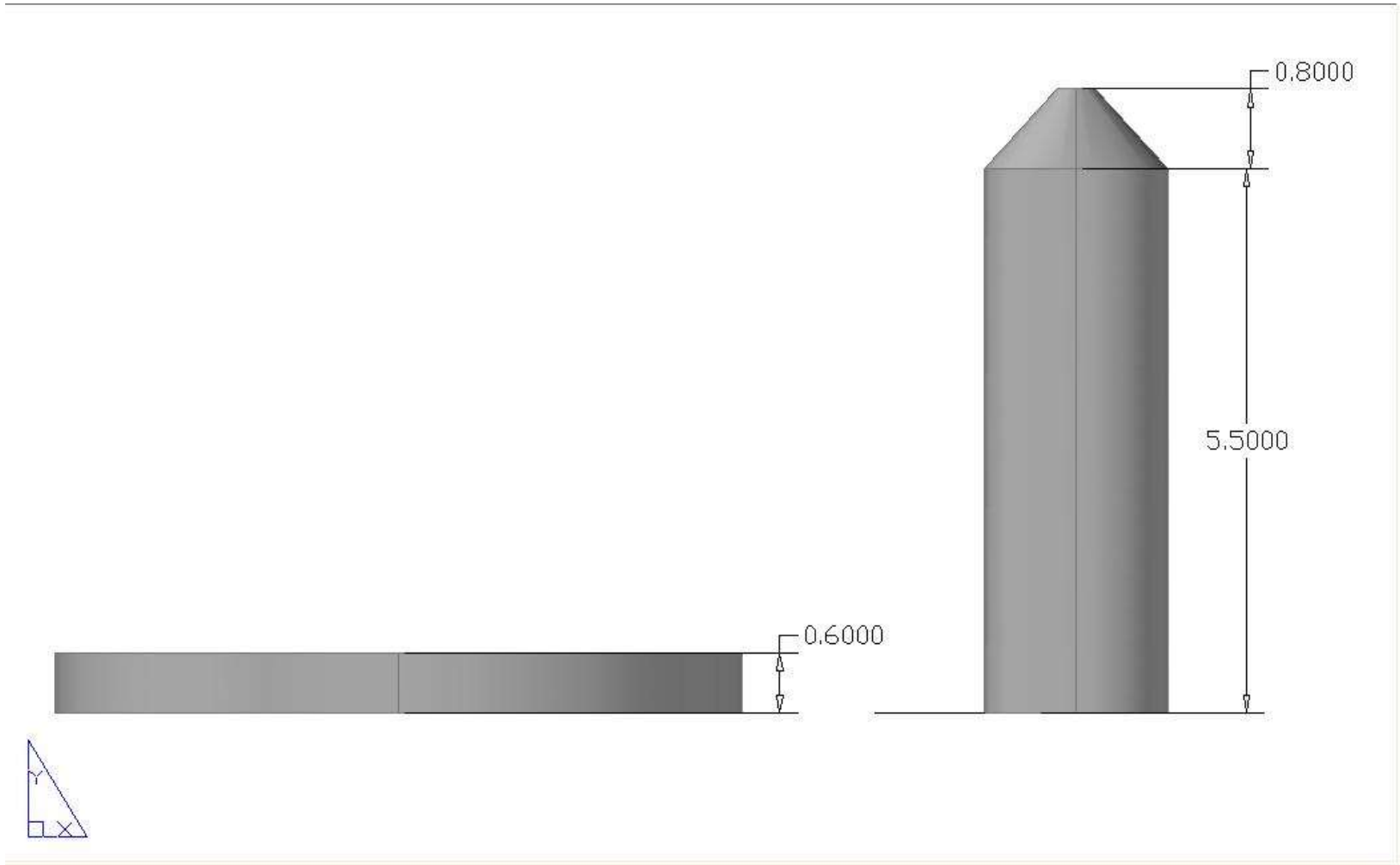
**Figura B7.** Vista en perspectiva del electrodo inferior y los discos de conexionado.



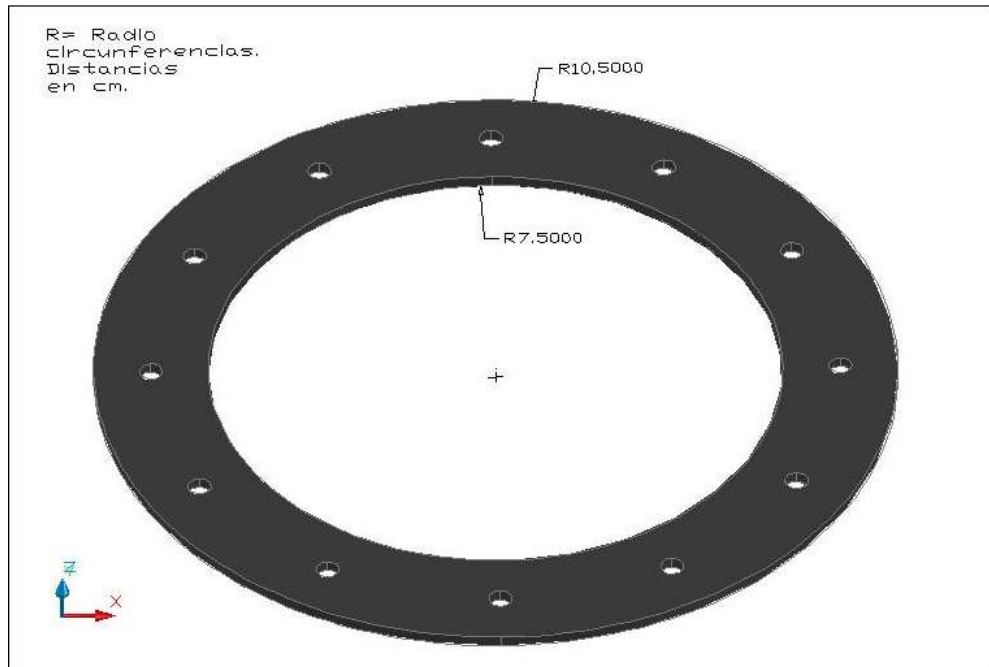
**Figura B8.** Vista superior de los electrodos, soporte del electrodo superior y los discos de conexionado.



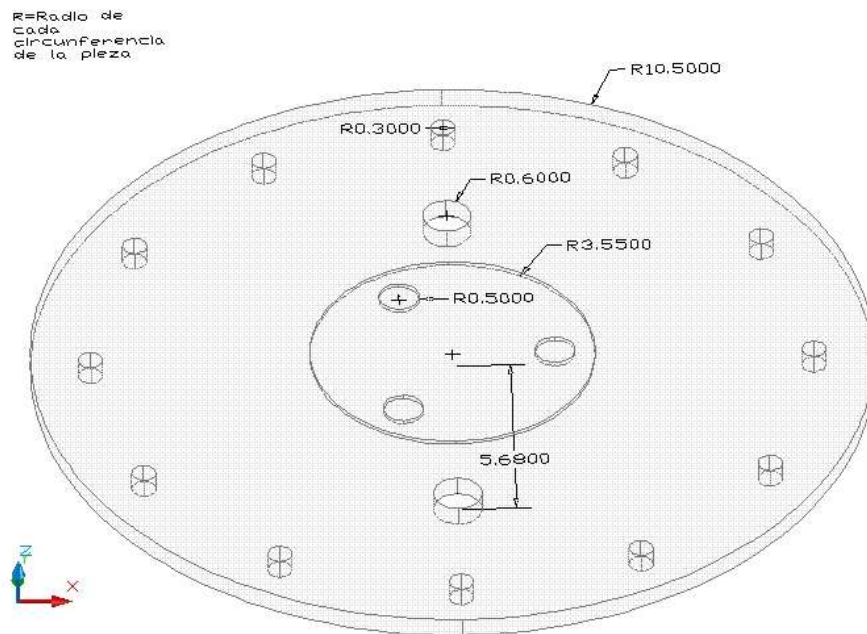
**Figura B9.** Vista frontal de electrodo inferior y el disco de conexionado.



**Figura B10.** Vista en perspectiva del empaque principal adjunto a la tapa de sellado del reactor.



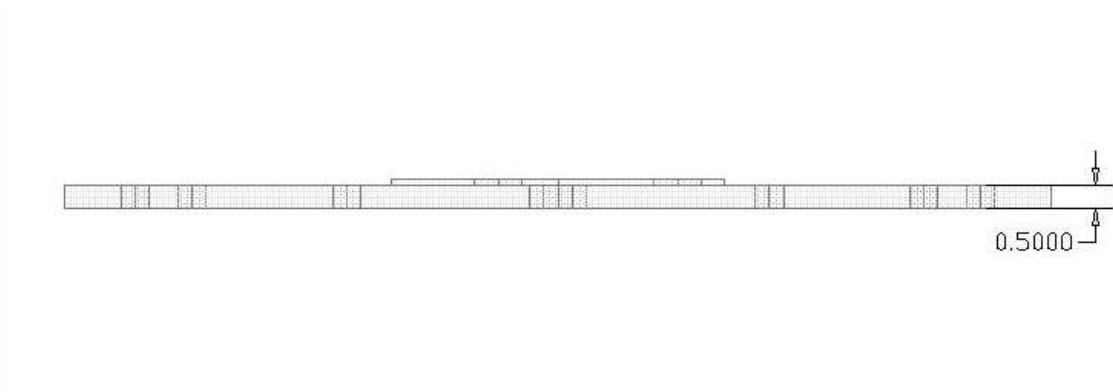
**Figura B11.** Vista en perspectiva de la tapa de sellado del reactor.



**Figura B12.** Vista frontal de la empaque mayor de sellado del reactor.



**Figura B13.** Vista frontal de la tapa de sellado del reactor.



### Anexo C. Ensayos con glicerol de alta pureza

**Tabla C1.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 1, tratamiento A.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	1A	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3706
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,4	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,18
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]			Nominales: 30	31
CO Medido (Analizador gases) [%]			0,01	
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]			61	
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]			0,14	
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]			100	
Potencia de Entrada [Watt/rms]			30	

**Tabla C2.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 2, tratamiento A.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	2A	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3691
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,6	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,17
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]			Nominales: 30	31
CO Medido (Analizador gases) [%]			0,02	
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]			66	
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]			0,16	
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]			126	
Potencia de Entrada [Watt/rms]			30	

**Tabla C3.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 3, tratamiento A.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	3A	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3691
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,6	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,19
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		31
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,01		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		59		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,11		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		99		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		30		

**Tabla C4.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 1, tratamiento B.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	1B	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3669
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,9	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,2
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 Hz / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		31
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,01		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		22		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,07		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		49		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		28		

**Tabla C5.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 2, tratamiento B.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	2B	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	0,37	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3669
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,9	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,19
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 Hz / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		29
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,02		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		25		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,11		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		57		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		30		

**Tabla C6.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 3, tratamiento B.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	3B	Temperatura ambiente media [°C]	24
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3669
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,9	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,16
	Separación electrodos [cm]	1	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 Hz / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		30
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,02		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		20		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,1		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		55		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		30		

**Tabla C7.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 1, tratamiento C.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	1C	Temperatura ambiente media [°C]	23
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3703
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,6	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,2
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]			Nominales: 30	30
CO Medido (Analizador gases) [%]			0,04	
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]			27	
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]			0,16	
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]			30	
Potencia de Entrada [Watt/rms]			27	

**Tabla C8.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 2, tratamiento C.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	2C	Temperatura ambiente media [°C]	23
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3703
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,6	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	0,7
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]			Nominales: 30	30
CO Medido (Analizador gases) [%]			0,03	
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]			26	
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]			0,16	
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]			42	
Potencia de Entrada [Watt/rms]			25	

**Tabla C9.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 3, tratamiento C.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	3C	Temperatura ambiente media [°C]	23
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3703
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,6	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,23
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	63.86 / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		31
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,03		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		28		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,22		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		45		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		26		

**Tabla C10.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 1, tratamiento D.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	1D	Temperatura ambiente media [°C]	22
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3723
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,5	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,2
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 Hz / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		29
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,3		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		18		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,13		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		0		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		30		

**Tabla C11.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 2, tratamiento D.

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	2D	Temperatura ambiente media [°C]	22
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3691
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,5	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,21
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 Hz / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		29
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,25		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		16		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,12		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		47		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		29		

**Tabla C12.** Resultados experimentales de muestra de glicerina de alta pureza, ensayo 3, tratamiento D

Variables	Muestra		Glicerol Puro 2	
	Ensayo [Número]	3D	Temperatura ambiente media [°C]	22
	Presión atmosférica [kPa]	101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]	0,3723
	Altura de glicerina Inicial [cm]	7,5	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]	2,21
	Separación electrodos [cm]	0,7	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	115 Hz / 50%
Tiempo [segundos]		Nominales: 30		30
CO Medido (Analizador gases) [%]		0,41		
H <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [ppm]		21		
CO <sub>2</sub> Medido (Analizador gases) [%]		0,15		
HCs Medido (Analizador gases) [ppm]		71		
Potencia de Entrada [Watt/rms]		32		

### Anexo D. Resultados experimentales con glicerina cruda

**Tabla D1.** Resultados experimentales de muestra de glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento A

Variables	Muestra	Representativa Cruda 2		Ensayo [Número]			1A	Temperatura ambiente [°C]	23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial [mol]			0,3704	Separación electrodos [cm]	1
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,6	Tensión pico/pico entrada digital [V]			2,21	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%	70/50
Duración del ensayo	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	
Concentraciones / Velocidades de generación	Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial	
CO	12300		18000	300	7714,29	128,57	10000	166,67	
H <sub>2</sub>	3411		1157,50	19,29	815,28	13,59	815,28	13,59	
CO <sub>2</sub>	4500		36000	600	3385,71	56,43	4110	68,50	
HCs	323		31200	520	10285,71	171,43	14000	233,33	
Potencia de Entrada [Watt]	35		35		35		35		
Tensión Entrada [Vrms]	11,73		11,73		11,73		11,73		
Corriente Entrada [Arms]	3,6		3,6		3,6		3,6		
Factor de Potencia	0,83		0,83		0,83		0,83		
Altura final de Glicerina [cm]	7,6		7,6		7,6		7,6		
Volumen de Gas [L]	8,99		8,99		8,99		8,99		
H <sub>2</sub> [moles]	0,001290		0,0004692		0,0003088		0,0003109		
CO [moles]	0,004651		0,007297		0,002922		0,003814		
Energía de Entrada [J]	2100		2100		2100		2100		
Energía de Salida [J]	314,53		114,42		75,31		75,83		

**Tabla D2.** Resultados experimentales de muestra de glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento A

Variables	Muestra	Representativa Cruda 2		Ensayo [Número]		2A	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial [mol]		0,3703	Separación electrodos [cm]		1
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,6	Tensión pico/pico entrada digital [V]		2,2	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial
CO		5100		186000	3100	N/A		53275,00	887,92
H <sub>2</sub>		4928		12600	210	N/A		325,20	5,42
CO <sub>2</sub>		7400		297180	4953	N/A		10177,64	169,63
HCs		1381		108000	1800	N/A		28078,57	467,98
Potencia de Entrada [Watt]		35		35		N/A		35	
Tensión Entrada [Vrms]		11,87		11,87		N/A		11,87	
Corriente Entrada [Arms]		3,4		3,4		N/A		3,4	
Factor de Potencia		0,87		0,87		N/A		0,87	
Altura de Glicerina Final [cm]		7,60		7,60		N/A		7,60	
Glicerina gastada [L]		0,00		0,00		N/A		0,00	
Volumen de Gas [L]		8,99		8,99		N/A		8,99	
H <sub>2</sub> [moles]		0,00186		0,01178		N/A		0,0001	
CO [moles]		0,00193		0,17386		N/A		0,0217	
Energía de Entrada [J]		2100,00		2100,00		N/A		2100,00	
Energía de Salida [J]		453,62		2872,14		N/A		32,34	

**Tabla D3.** Resultados experimentales de muestra de glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento A

Variables	Muestra	Representativa Cruda 2		Ensayo [Número]		3A	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial [mol]		0,37	Separación electrodos [cm]		1
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,8	Tensión pico/pico entrada digital [V]		2,22	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial
CO		9300		186000	3100	4,65E-13	7,75E-15	47675	794,58
H <sub>2</sub>		4290		9420	157	4,51E+03	7,52E+01	4512,86	75,21
CO <sub>2</sub>		6100		31200	520	1,09E+01	1,82E-01	7522	125,37
HCs		1105		72000	1200	2,73E+02	4,55E+00	20200	336,67
Potencia de Entrada [Watt]		35		35		35		35	
Tensión Entrada [Vrms]		11,79		11,79		11,79		11,79	
Corriente Entrada [Arms]		3,4		3,4		3,4		3,4	
Factor de Potencia		0,87		0,87		0,87		0,87	
Altura de Glicerina Final [cm]		7,7		7,7		7,7		7,7	
Glicerina gastada [L]		0,018		0,018		0,018		0,018	
Volumen de Gas [L]		8,97		8,97		8,97		8,97	
H <sub>2</sub> [moles]		0,001616		0,004955		0,001673		0,001809	
CO [moles]		0,003504		0,09783		0,00000		0,01911	
Energía de Entrada [J]		2100		2100		2100		2100	
Energía de Salida [J]		394,13		1208,25		407,94		441,25	

**Tabla D4.** Resultados experimentales de muestra de glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento B.

Variables	Muestra	Representativa Cruda 2		Ensayo [Número]		1B	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial [mol]		0,37	Separación electrodos [cm]		1,5
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,8	Tensión pico/pico entrada digital [V]		2,22	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial
CO		3600		360000	6000	N/A		68250	1137,5
H <sub>2</sub>		5538		900	15	N/A		495	8,25
CO <sub>2</sub>		5800		24840	414	N/A		3870	64,5
HCs		1108		72000	1200	N/A		24000	400
Potencia de Entrada [Watt]		40		40		N/A		40	
Tensión Entrada [Vrms]		11,71		11,71		N/A		11,71	
Corriente Entrada [Arms]		3,9		3,9		N/A		3,9	
Factor de Potencia		0,88		0,88		N/A		0,88	
Altura de Glicerina Final [cm]		7,7		7,7		N/A		7,7	
Glicerina gastada [L]		0,018		0,018		N/A		0,01767	
Volumen de Gas [L]		8,97		8,97		N/A		8,97	
H <sub>2</sub> [moles]		0,002077		0,0006124		N/A		0,0002022	
CO [moles]		0,001350		0,2449		N/A		0,02787	
Energía de Entrada [J]		2400		2400		N/A		2400	
Energía de Salida [J]		506,41		149,34		N/A		49,30	

**Tabla D5.** Resultados experimentales de muestra de glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento B.

Variables	Muestra	Representativa Cruda 2		Ensayo [Número]		2B	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]		0,37	Separación electrodos [cm]		1,5
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,7	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]		2,27	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial
CO		4100		90000	1500	2160	36	34628,57	577,14
H <sub>2</sub>		5326		5460	91	1087,14	18,12	1087,14	18,12
CO <sub>2</sub>		6400		21060	351	787,2	13,12	9334,29	155,57
HCs		1700		144000	2400	3360	56	49885,71	831,43
Potencia de Entrada [Watt]		38		38		38		38	
Tensión Entrada [Vrms]		11,82		11,82		11,82		11,82	
Corriente Entrada [Arms]		3,8		3,8		3,8		3,8	
Factor de Potencia		0,85		0,85		0,85		0,85	
Altura de Glicerina Final [cm]		7,7		7,7		7,7		7,7	
Glicerina gastada [L]		0,018		0,018		0,018		0,018	
Volumen de Gas [L]		8,97		8,97		8,97		8,97	
H <sub>2</sub> [moles]		0,002004		0,002730		0,0004049		0,0004441	
CO [moles]		0,001543		0,04499		0,0008045		0,01414	
Energía de Entrada [J]		2280		2280		2280		2280	
Energía de Salida [J]		488,73		665,66		98,74		108,29	

**Tabla D6.** Resultados experimentales de muestra de glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento B.

Variables	Muestra	Representativa Cruda 2		Ensayo [Número]		3B	Temperatura ambiente media [°C]		23
	Presión atmosférica [kPa]		101,42	Cantidad de gas inicial en reactor [mol]		0,37	Separación electrodos [cm]		1,5
	Altura de glicerina Inicial [cm]		7,7	Valor pico/pico tensión entrada digital [V]		2,21	Frecuencia en tensión [Hz] / Ciclo útil tensión%		70/50
Duración del ensayo		Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1	Tiempo [min]	1
Concentraciones / Velocidades de generación		Datos finales Concentración [ppm]		Concentración [ppm]	Velocidad máxima	Concentración [ppm]	Velocidad promedio neta	Concentración [ppm]	Velocidad promedio parcial
CO		3500		54000	900	7000	116,67	444,44	444,44
H <sub>2</sub>		4207		1980	33	1234,55	20,58	1234,55	20,58
CO <sub>2</sub>		5300		17560	292,67	640	10,67	5343,33	89,06
HCs		1200		86000	1433,33	5000	83,33	26333,33	438,89
Potencia de Entrada [Watt]		40		40		40		40	
Tensión Entrada [Vrms]		11,57		11,57		11,57		11,57	
Corriente Entrada [Arms]		4		4		4		4	
Factor de Potencia		0,864304235		0,864304235		0,864304235		0,864304235	
Altura de Glicerina Final [cm]		7,6		7,6		7,6		7,6	
Glicerina gastada [L]		0,035		0,035		0,035		0,035	
Volumen de Gas [L]		8,99		8,99		8,99		8,99	
H <sub>2</sub> [moles]		0,001578		0,0008709		0,0004628		0,0004721	
CO [moles]		0,001313		0,02375		0,002624		0,0001700	
Energía de Entrada [J]		2400		2400		2400		2400	
Energía de Salida [J]		384,7436824		212,3894091		112,8650896		115,139698	

**Anexo E.** Experimento con glicerina cruda (Velocidades de generación de los gases).

**Tabla E1.** Ensayo 1A: Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento A

<b>Tiempo [s]</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>24</b>	<b>48</b>			
<b>H2 [ppm]</b>	619	631	647	665	676	696	714	723	741	1204			
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	<b>11</b>	<b>10</b>	<b>18</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>19,29</b>	<b>Promedio</b>	<b>13,587963</b>	<b>Máximo</b>	<b>19,2916667</b>

**Tabla E2.** Ensayo 1A: Generación de CO, CO<sub>2</sub> Y HCs. para tratamiento A

<b>Tiempo [s]</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>				
<b>CO [ppm]</b>	100	200	300	500	800	1000	1100	1000				
<b>HCs [ppm]</b>	69	81	137	245	364	466	480	464				
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	2000	1800	1800	2000	2600	3200	3400	3200				
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>200</b>	<b>300</b>	<b>200</b>	<b>100</b>	<b>1100</b>	<b>Promedio</b>	<b>300</b>	<b>Máximo</b>	<b>1100</b>	
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	<b>12</b>	<b>56</b>	<b>108</b>	<b>119</b>	<b>102</b>	<b>14</b>	<b>-16</b>	<b>Promedio</b>	<b>56,4285714</b>	<b>Máximo</b>	<b>119</b>	
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>-200</b>	<b>0</b>	<b>200</b>	<b>600</b>	<b>600</b>	<b>200</b>	<b>-200</b>	<b>Promedio</b>	<b>171,428571</b>	<b>Máximo</b>	<b>600</b>	

**Tabla E3.** Ensayo 2A: Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento A.

<b>Tiempo [s]</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>10</b>	<b>12</b>	<b>15</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>26</b>	<b>28</b>	<b>29</b>
<b>H<sub>2</sub>[ppm]</b>	93	106	119	129	136	147	152	171	176	190	200	205
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>13</b>	<b>13</b>	<b>3,33</b>	<b>3,5</b>	<b>5,5</b>	<b>1,67</b>	<b>2,71</b>	<b>5</b>	<b>4,67</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Tiempo [s]	30	31	33
H <sub>2</sub> [ppm]	210	215	222
Velocidad de Generación H <sub>2</sub> [ppm/s]	5	3,5	Promedio 5,42 Máximo 13

**Tabla E4.** Ensayo 2A: Generación de CO, CO<sub>2</sub> Y HCs. para tratamiento A.

Tiempo [s]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CO [ppm]	300	1900	2400	3400	3800	4000	2800	2200	1900	1600
HCs [ppm]	78	392	516	640	712	771	611	484	428	379
CO <sub>2</sub> [ppm]	800	1600	1800	2200	2400	2400	2000	1600	1400	1400
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	<b>300</b>	<b>1900</b>	<b>2400</b>	<b>3400</b>	<b>3800</b>	<b>4000</b>	<b>2800</b>	<b>2200</b>	<b>1900</b>	<b>1600</b>
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	<b>314</b>	<b>124</b>	<b>124</b>	<b>72</b>	<b>59</b>	<b>-160</b>	<b>-127</b>	<b>-56</b>	<b>-49</b>	<b>-106</b>
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	<b>800</b>	<b>1600</b>	<b>1800</b>	<b>2200</b>	<b>2400</b>	<b>2400</b>	<b>2000</b>	<b>1600</b>	<b>1400</b>	<b>1400</b>
Tiempo [s]	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
CO [ppm]	1100	1000	900	700	500	200	100	100	400	2300
HCs [ppm]	273	256	221	181	141	73	39	27	138	517
CO <sub>2</sub> [ppm]	1000	1000	800	800	600	600	600	400	800	1800
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	<b>-100</b>	<b>-100</b>	<b>-200</b>	<b>-200</b>	<b>-300</b>	<b>-100</b>	<b>0</b>	<b>300</b>	<b>1900</b>	<b>2900</b>
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	<b>-17</b>	<b>-35</b>	<b>-40</b>	<b>-40</b>	<b>-68</b>	<b>-34</b>	<b>-12</b>	<b>111</b>	<b>379</b>	<b>493</b>
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	<b>0</b>	<b>-200</b>	<b>0</b>	<b>-200</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-200</b>	<b>400</b>	<b>1000</b>	<b>1400</b>
Tiempo [s]	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
CO [ppm]	5200	6000	5200	5300	5900	6000	5200	3400	1800	700
HCs [ppm]	1010	1179	1051	1069	1143	1186	1085	813	532	219
CO <sub>2</sub> [ppm]	3200	3600	3200	3200	3400	3600	3200	2400	1600	800
Velocidad de Generación CO	<b>800</b>	<b>-800</b>	<b>100</b>	<b>600</b>	<b>100</b>	<b>-800</b>	<b>-1800</b>	<b>-1600</b>	<b>-1100</b>	<b>-600</b>

	<b>[ppm/s]</b>										
<b>Velocidad de Generación HCs</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>169</b>	<b>-128</b>	<b>18</b>	<b>74</b>	<b>43</b>	<b>-101</b>	<b>-272</b>	<b>-281</b>	<b>-313</b>	<b>-158</b>	
<b>Velocidad de Generación</b>											
<b>CO<sub>2</sub>[ppm/s]</b>	<b>400</b>	<b>-400</b>	<b>0</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>-400</b>	<b>-800</b>	<b>-800</b>	<b>-800</b>	<b>-600</b>	
<b>Tiempo [s]</b>	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
<b>CO [ppm]</b>	100	0	0	100	2200	5300	6800	4600	2300	2100	
<b>HCs [ppm]</b>	61	26	38	74	561	1115	1337	1047	6000	504	
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	200	200	200	400	2200	3400	4000	3200	2000	1600	
<b>Velocidad de Generación CO</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>-100</b>	<b>0</b>	<b>100</b>	<b>2100</b>	<b>3100</b>	<b>1500</b>	<b>-2200</b>	<b>-2300</b>	<b>-200</b>	<b>-500</b>	
<b>Velocidad de Generación HCs</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>-35</b>	<b>12</b>	<b>36</b>	<b>487</b>	<b>554</b>	<b>222</b>	<b>-290</b>	<b>4953</b>	<b>-5496</b>	<b>-178</b>	
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub></b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>200</b>	<b>1800</b>	<b>1200</b>	<b>600</b>	<b>-800</b>	<b>-1200</b>	<b>-400</b>	<b>-200</b>	
<b>Tiempo [s]</b>	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
<b>CO [ppm]</b>	1600	1500	1600	1900	2300	2400	2200	2000	1500	1200	
<b>HCs [ppm]</b>	326	335	342	401	469	501	468	439	369	305	
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	1400	1200	1200	1400	1600	1800	1800	1600	1400	1200	
<b>Velocidad de Generación CO</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>-100</b>	<b>100</b>	<b>300</b>	<b>400</b>	<b>100</b>	<b>-200</b>	<b>-200</b>	<b>-500</b>	<b>-300</b>	<b>-500</b>	
<b>Velocidad de Generación HCs</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>59</b>	<b>68</b>	<b>32</b>	<b>-33</b>	<b>-29</b>	<b>-70</b>	<b>-64</b>	<b>-102</b>	
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub></b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>-200</b>	<b>0</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>200</b>	<b>0</b>	<b>-200</b>	<b>-200</b>	<b>-200</b>	<b>-200</b>	
<b>Tiempo [s]</b>	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	
<b>CO [ppm]</b>	700	400	600	1700	2900	5200	7600	8700	10200	9000	
<b>HCs [ppm]</b>	203	136	193	377	561	947	1363	1581	1908	1815	
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	1000	800	800	1400	1800	2800	3800	4400	5200	5000	
<b>Velocidad de Generación CO</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>-300</b>	<b>200</b>	<b>1100</b>	<b>1200</b>	<b>2300</b>	<b>2400</b>	<b>1100</b>	<b>1500</b>	<b>-1200</b>	<b>-3000</b>	
<b>Velocidad de Generación HCs</b>											
<b>[ppm/s]</b>	<b>-67</b>	<b>57</b>	<b>184</b>	<b>184</b>	<b>386</b>	<b>416</b>	<b>218</b>	<b>327</b>	<b>-93</b>	<b>-449</b>	

<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	-200	0	600	400	1000	1000	600	800	-200	-1000
<b>Tiempo [s]</b>	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
<b>CO [ppm]</b>	6000	4400	800	600	200	0	0	1100	1700	1700
<b>HCs [ppm]</b>	1366	1113	365	255	107	32	14	265	397	393
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	4000	3400	1400	1200	800	800	600	1400	1800	1600
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	-1600	-3600	-200	-400	-200	0	1100	600	0	-500
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	-253	-748	-110	-148	-75	-18	251	132	-4	-103
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	-600	-2000	-200	-400	0	-200	800	400	-200	-400
<b>Tiempo [s]</b>	70	71	72	73	74	75	76			
<b>CO [ppm]</b>	1200	900	300	100	0	0	0			
<b>HCs [ppm]</b>	290	237	105	62	15	50	23			
<b>CO<sub>2</sub>[ppm]</b>	1200	1000	600	400	200	200	200			
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	-300	-600	-200	-100	0	0	<b>Promedio</b>	<b>-3,95</b>	<b>Máximo</b>	<b>3100</b>
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	-53	-132	-43	-47	35	-27	<b>Promedio</b>	<b>-0,73</b>	<b>Máximo</b>	<b>4953</b>
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub>[ppm/s]</b>	-200	-400	-200	-200	0	0	<b>Promedio</b>	<b>-7,89</b>	<b>Máximo</b>	<b>1800</b>
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial 1</b>		740		<b>Promedio Parcial2</b>	1180		<b>Promedio Parcial3</b>		266,67
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial 1</b>		138,6		<b>Promedio Parcial2</b>	228		<b>Promedio Parcial3</b>		45
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub>[ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial 1</b>		0		<b>Promedio Parcial2</b>	600		<b>Promedio Parcial3</b>		133,33
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial4</b>		320		<b>Promedio Parcial5</b>	225		<b>Promedio Parcial6</b>		1400
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial4</b>		1360		<b>Promedio Parcial5</b>	41,5		<b>Promedio Parcial6</b>		253,14
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub>[ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial4</b>		262,2		<b>Promedio Parcial5</b>	150		<b>Promedio Parcial6</b>		628,57
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial7</b>		760							
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	<b>Promedio Parcial7</b>		566,67							
			121,67							

Velocidad de Generación CO<sub>2</sub>[ppm/s]      Promedio Parcial7      333,33

**Tabla E5.** Ensayo 3A: Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento A.

<b>Tiempo [s]</b>	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
<b>H<sub>2</sub> [ppm]</b>	0	2	8	23	60	64	84	112	145	187	273	374
<b>Velocidad de Generación H<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>15</b>	<b>37</b>	<b>4</b>	<b>20</b>	<b>28</b>	<b>33</b>	<b>42</b>	<b>86</b>	<b>101</b>	<b>108</b>
<b>Tiempo [s]</b>	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91
<b>H<sub>2</sub> [ppm]</b>	482	512	523	680	794	897	991	1065	1153	1252	1362	1473
<b>Velocidad de Generación H<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>30</b>	<b>11</b>	<b>157</b>	<b>114</b>	<b>103</b>	<b>94</b>	<b>74</b>	<b>88</b>	<b>99</b>	<b>110</b>	<b>111</b>	<b>102</b>
<b>Tiempo [s]</b>	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
<b>H<sub>2</sub> [ppm]</b>	1575	1682	1783	1881	1979	2082	2181	2265	2359	2405	2485	2513
<b>Velocidad de Generación H<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>107</b>	<b>101</b>	<b>98</b>	<b>98</b>	<b>103</b>	<b>99</b>	<b>84</b>	<b>94</b>	<b>46</b>	<b>80</b>	<b>28</b>	<b>104</b>
<b>Tiempo [s]</b>	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113	114	115
<b>H<sub>2</sub> [ppm]</b>	2617	2707	2797	2865	2977	3015	3093	3157	3275	3377	3491	3591
<b>Velocidad de Generación H<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>90</b>	<b>90</b>	<b>68</b>	<b>112</b>	<b>38</b>	<b>78</b>	<b>64</b>	<b>118</b>	<b>102</b>	<b>114</b>	<b>100</b>	<b>95</b>
<b>Tiempo [s]</b>	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127
<b>H<sub>2</sub> [ppm]</b>	3686	3785	3897	3996	4077	4163	4277	4390	4494	4583	4680	4704
<b>Velocidad de Generación H<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>99</b>	<b>112</b>	<b>99</b>	<b>81</b>	<b>86</b>	<b>114</b>	<b>113</b>	<b>104</b>	<b>89</b>	<b>97</b>	<b>24</b>	<b>90</b>
<b>Tiempo [s]</b>	128	129	130	131	132	133	134	135	136	137	138	
<b>H<sub>2</sub> [ppm]</b>	4794	4896	4994	5080	5172	5198	5229	5250	5262	5266	5265	

<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>102</b>	<b>98</b>	<b>86</b>	<b>92</b>	<b>26</b>	<b>31</b>	<b>21</b>	<b>12</b>	<b>4</b>	<b>-1</b>	<b>Promedio 75,22</b>	<b>Máximo 157</b>
---	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	----------	-----------	-----------------------	-------------------

**Tabla E6.** Ensayo 3A: Generación de CO, CO<sub>2</sub> Y HCs. para tratamiento A.

<b>Tiempo [s]</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>CO [ppm]</b>	0	0	100	800	3300	6400	7400	6000	4500	3200
<b>HCs [ppm]</b>	-8	-7	51	197	717	1188	1354	1121	887	671
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	200	200	200	600	1600	2800	3200	2800	2200	1600
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	0	100	700	2500	3100	1000	-1400	-1500	-1300	-1300
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	1	58	146	520	471	166	-233	-234	-216	-212
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	0	0	400	1000	1200	400	-400	-600	-600	-400
<b>Tiempo [s]</b>	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>CO [ppm]</b>	1900	900	500	200	100	400	1100	1600	1200	700
<b>HCs [ppm]</b>	459	275	153	101	59	79	183	223	198	141
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	1200	800	600	400	200	600	800	1000	800	600
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	-1000	-400	-300	-100	300	700	500	-400	-500	-400
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	-184	-122	-52	-42	20	104	40	-25	-57	-56
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	-400	-200	-200	-200	400	200	200	-200	-200	-200
<b>Tiempo [s]</b>	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
<b>CO [ppm]</b>	300	600	1200	2700	2900	3400	3200	2100	1700	1600
<b>HCs [ppm]</b>	85	122	181	394	458	534	524	392	349	332
<b>CO<sub>2</sub> [ppm]</b>	400	600	800	1400	1600	1800	1600	1200	1000	1000
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	300	600	1500	200	500	-200	-1100	-400	-100	700

Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	37	59	213	64	76	-10	-132	-43	-17	94
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	200	200	600	200	200	-200	-400	-200	0	200
Tiempo [s]	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
CO [ppm]	2300	3700	4700	4900	4600	4100	3500	2600	1500	1000
HCs [ppm]	426	658	826	852	818	721	630	491	362	239
CO <sub>2</sub> [ppm]	1200	1600	2200	2200	2000	2000	1600	1200	1000	800
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	1400	1000	200	-300	-500	-600	-900	-1100	-500	-1000
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	232	168	26	-34	-97	-91	-139	-129	-123	-218
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	400	600	0	-200	0	-400	-400	-200	-200	-600
Tiempo [s]	45	46	47	48	49					
CO [ppm]	0	0	0	0	0					
HCs [ppm]	21	13	18	6	0					
CO <sub>2</sub> [ppm]	200	200	400	400	400					
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	0	0	0	0						
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	-8	5	-12	-6						
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	0	200	0	0						
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	<b>Promedio</b>		7,7514E-15		<b>Máximo</b>	3100	<b>Promedio Parcial 1</b>	1233,33		
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	<b>Promedio</b>		0,18		<b>Máximo</b>	520	<b>Promedio Parcial 1</b>	227		
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	<b>Promedio</b>		4,55		<b>Máximo</b>	1200	<b>Promedio Parcial 1</b>	500		
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	<b>Promedio Parcial 2</b>		500		<b>Promedio Parcial 3</b>	620	<b>Promedio Parcial 4</b>	825		
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	<b>Promedio Parcial 2</b>		54,6666667		<b>Promedio Parcial 3</b>	89,8	<b>Promedio Parcial 4</b>	130		

**Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]**      **Promedio Parcial 2**      266,666667      **Promedio Parcial 3**      280      **Promedio Parcial 4**      300

**Tabla E7.** Ensayo 1B: Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento B.

Tiempo [s]	0	1	2	3	4	5	6	7	8			
H2 [ppm]	55	70	76	85	89	94	101	109	121			
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>15</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>Promedio</b>	8,25	<b>Máximo</b>	<b>15</b>

**Tabla E8.** Ensayo 1B: Generación de CO, CO<sub>2</sub> Y HCs. para tratamiento B.

Tiempo [s]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CO [%V]	5200	6800	6600	4900	2100	1400	1100	1200	1700	1900
HCs [ppm]	1546	1960	1919	1576	815	541	441	398	441	491
CO2 [%V]	9000	10200	10000	7800	4000	2800	2400	2400	3200	3600
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	1600	-200	-1700	-2800	-700	-300	100	500	200	-100
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	414	-41	-343	-761	-274	-100	-43	43	50	-4
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	1200	-200	-2200	-3800	-1200	-400	0	800	400	-200

Tiempo [s]	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
CO [%V]	1800	1000	7000	5000	200	700	900	700	400	200
HCs [ppm]	487	333	280	230	140	245	259	222	158	95
CO2 [%V]	3400	2200	1800	1400	1000	1800	2000	1600	1200	600
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	-800	6000	-2000	-4800	500	200	-200	-300	-200	-100
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	-154	-53	-50	-90	105	14	-37	-64	-63	-44
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	-1200	-400	-400	-400	800	200	-400	-400	-600	-200

<b>Tiempo [s]</b>	20	21	22	20		
<b>CO [%V]</b>	100	0	0	0,49		
<b>HCs [ppm]</b>	51	23	9	1576		
<b>CO2 [%V]</b>	400	200	400	0,78		
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	-100	0	<b>Promedio</b>	<b>-236,36</b>	<b>Máximo</b>	<b>6000</b>
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	-28	-14	<b>Promedio</b>	<b>-69,86</b>	<b>Máximo</b>	<b>414</b>
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	-200	200	<b>Promedio</b>	<b>-390,91</b>	<b>Máximo</b>	<b>1200</b>

**Tabla E9.** Ensayo 2B: Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento B.

<b>Tiempo [s]</b>	1	2	6	7	8	9	10	11	12
<b>H2 [ppm]</b>	840	931	1051	1094	1123	1144	1166	1182	1196
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>91</b>	<b>30</b>	<b>43</b>	<b>29</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>11</b>
<b>Tiempo [s]</b>	13	14	15	16	17	19	20	21	23
<b>H2 [ppm]</b>	1207	1216	1223	1228	1233	1243	1247	1252	1265
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>9</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6,5</b>	<b>10</b>
<b>Tiempo [s]</b>	24	25	26	27					
<b>H2 [ppm]</b>	1275	1289	1305	1322					
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>14</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>Promedio</b>	<b>18,1190476</b>	<b>Máximo</b>			<b>91</b>

**Tabla E10.** Ensayo 2B (parte final): Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento B.

<b>Tiempo [s]</b>	0	1	2		
<b>H2 [ppm]</b>	5521	5579	5592		
<b>Velocidad de Generación H2 [ppm/s]</b>	<b>58</b>	<b>13</b>	<b>Promedio</b>	<b>35,5</b>	<b>Máximo</b>
					<b>58</b>

**Tabla E11.** Ensayo 2B: Generación de CO, CO<sub>2</sub> Y HCs. para tratamiento B.

<b>Tiempo [s]</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>CO [%V]</b>	0	0	0	100	400	1800	2400	2200	2100	1900
<b>HCs [ppm]</b>	0	0	1	11	129	446	671	673	604	564
<b>CO2 [%V]</b>	400	600	600	600	1400	3600	4400	4200	3600	3400
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	0	0	100	300	1400	600	-200	-100	-200	0
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	0	1	10	118	317	225	2	-69	-40	-16
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	200	0	0	800	2200	800	-200	-600	-200	-200
<b>Tiempo [s]</b>	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
<b>CO [%V]</b>	1900	1300	900	1500	2900	4400	5000	5100	4200	2400
<b>HCs [ppm]</b>	548	466	306	436	773	1124	1344	1381	1232	850
<b>CO2 [%V]</b>	3200	2800	1800	2600	5000	6400	7400	7400	6600	4400
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	-600	-400	600	1400	1500	600	100	-900	-1800	-400
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	-82	-160	130	337	351	220	37	-149	-382	-122
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	-400	-1000	800	2400	1400	1000	0	-800	-2200	-600
<b>Tiempo [s]</b>	20	21	22	23	24	25				
<b>CO [%V]</b>	2000	1200	1000	900	900	900				

HCs [ppm]		728	455	382	361	337	328		
CO2 [%V]		3800	2400	2000	1800	1800	1800		
Velocidad de Generación CO [ppm/s]		-800	-200	-100	0	0	----		
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]		-273	-73	-21	-24	-9	----		
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]		-1400	-400	-200	0	0	----		
Velocidad de Generación CO [ppm/s]	Promedio		36	Máximo	1500	Promedio Parcial	314,29	Promedio Parcial 2	840
Velocidad de Generación HCs [ppm/s]	Promedio		13,12	Máximo	351	Promedio Parcial	96,15	Promedio Parcial 2	215
Velocidad de Generación CO <sub>2</sub> [ppm/s]	Promedio		56	Máximo	2400	Promedio Parcial	542,86	Promedio Parcial 2	1120

**Tabla E12.** Ensayo 3B: Generación de H<sub>2</sub> para tratamiento B.

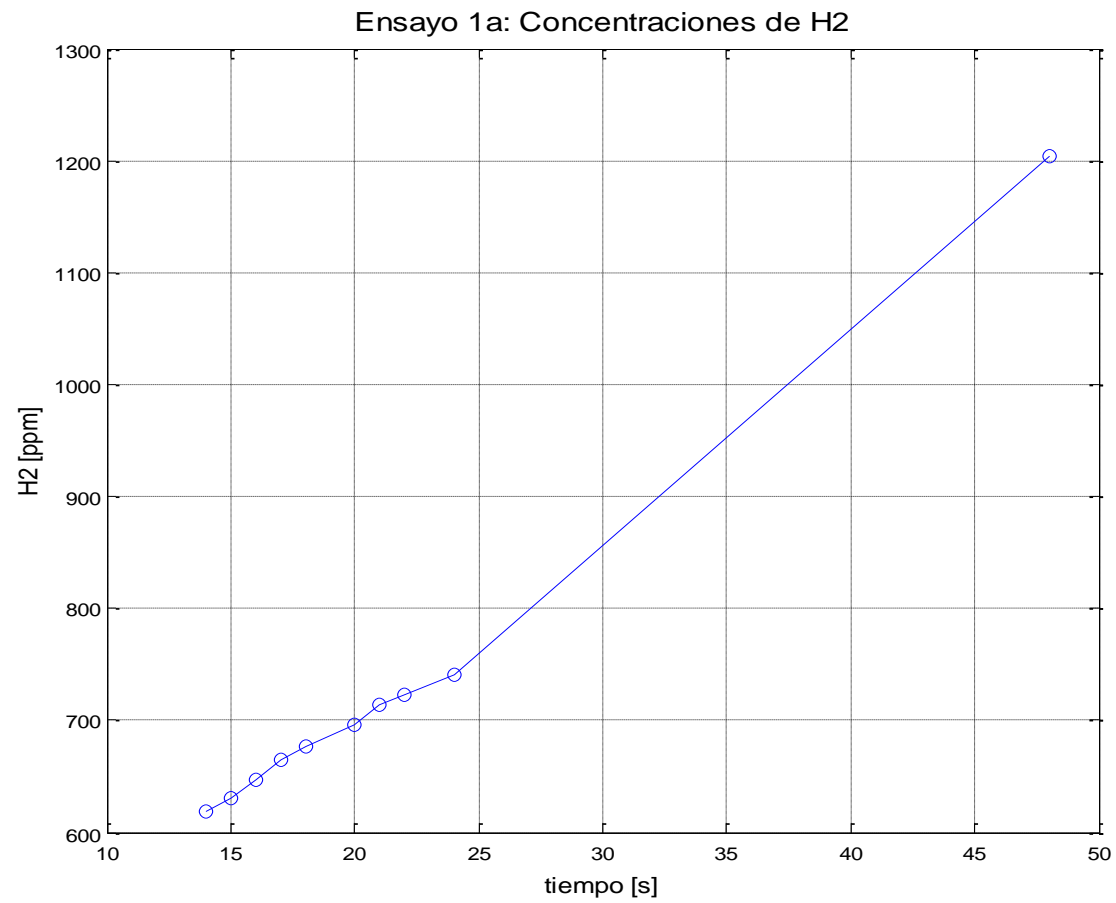
Tiempo [s]	0	3	6	9	12	15	18	21	24
H2 [ppm]	34	108	207	299	344	385	403	461	532
Velocidad de Generación H2 [ppm/s]	<b>24,67</b>	<b>33</b>	<b>30,67</b>	<b>15</b>	<b>13,67</b>	<b>6</b>	<b>19,33</b>	<b>23,67</b>	<b>25</b>
Tiempo [s]	27	30	33						
H2 [ppm]	607	671	713						
Velocidad de Generación H2 [ppm/s]	<b>21,333</b>	<b>14</b>	<b>Promedio</b>	<b>20,58</b>	<b>Máximo</b>	<b>33</b>			

**Tabla E13.** Ensayo 3B: Generación de CO, CO<sub>2</sub> Y HCs. para tratamiento B.

<b>Tiempo [s]</b>	0	3	6	9	12	15	18	21	24	27
<b>CO [%V]</b>	0	100	2800	2200	1100	3800	3900	1600	1100	1800
<b>HCs [ppm]</b>	25	502	711	620	479	446	1324	821	273	101
<b>CO2 [%V]</b>	300	600	4700	3900	2200	1100	5400	3700	2500	1900
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	33,33	900	-200	-366,67	900	33,33	-766,67	-166,67	233,33	566,67
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	159	69,67	-30,33	-47	-11	292,67	-167,67	-182,67	-57,33	81,33
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	100	1366,67	-266,67	-566,67	-366,67	1433,33	-566,67	-400	-200	300
<b>Tiempo [s]</b>	30									
<b>CO [%V]</b>	3500									
<b>HCs [ppm]</b>	345									
<b>CO2 [%V]</b>	2800									
<b>Velocidad de Generación CO [ppm/s]</b>	<b>Promedio</b>	<b>116,67</b>	<b>Máximo</b>	<b>900</b>						
<b>Velocidad de Generación HCs [ppm/s]</b>	<b>Promedio</b>	<b>10,67</b>	<b>Máximo</b>	<b>292,67</b>						
<b>Velocidad de Generación CO<sub>2</sub> [ppm/s]</b>	<b>Promedio</b>	<b>83,33</b>	<b>Máximo</b>	<b>1433,33</b>						

**Anexo F** Experimento con glicerina cruda (Gráficas de las velocidades de generación de los gases)

**Figura F1.**Concentraciones de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento A.



**Figura F2.** Velocidades de producción de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento A.

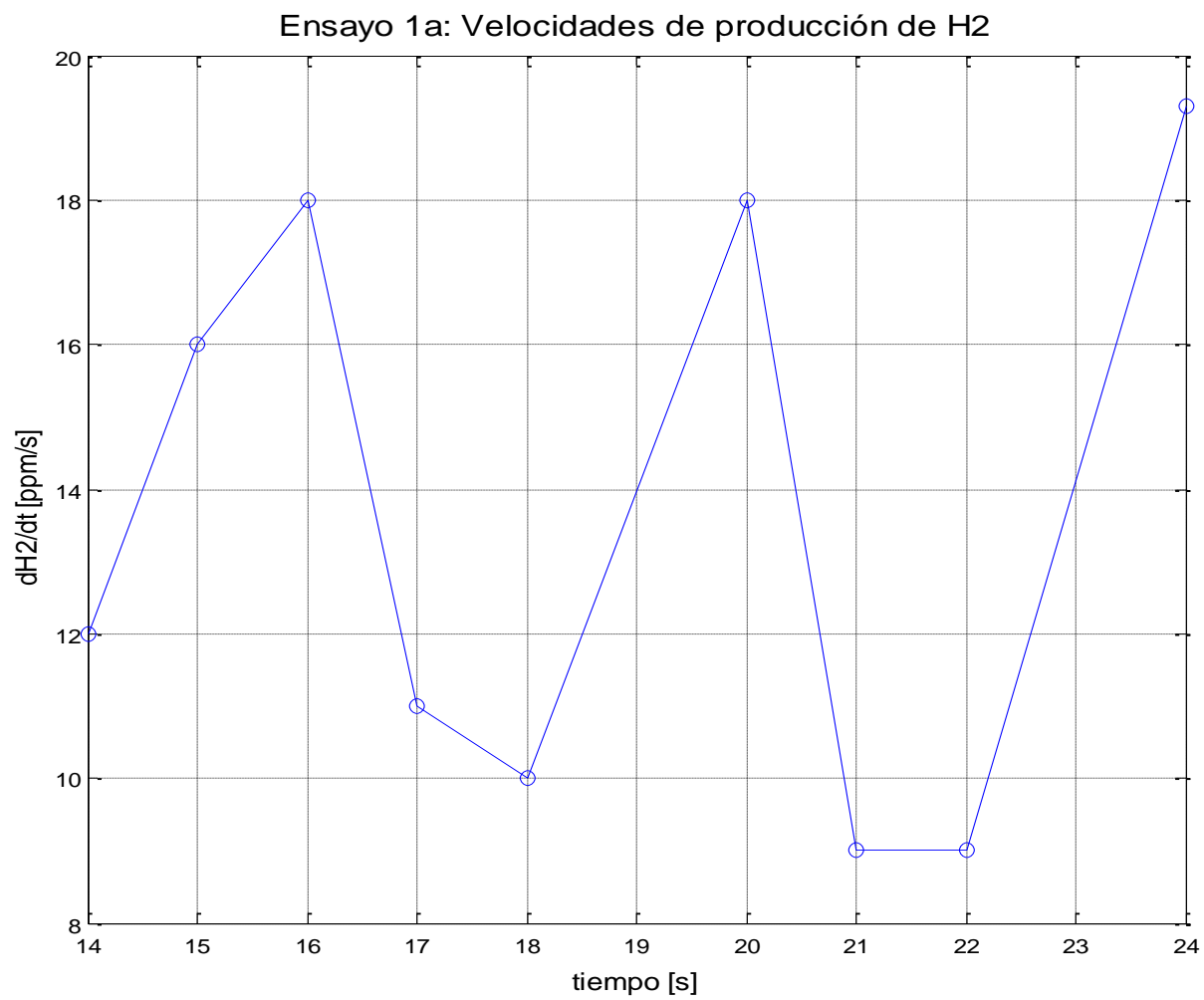
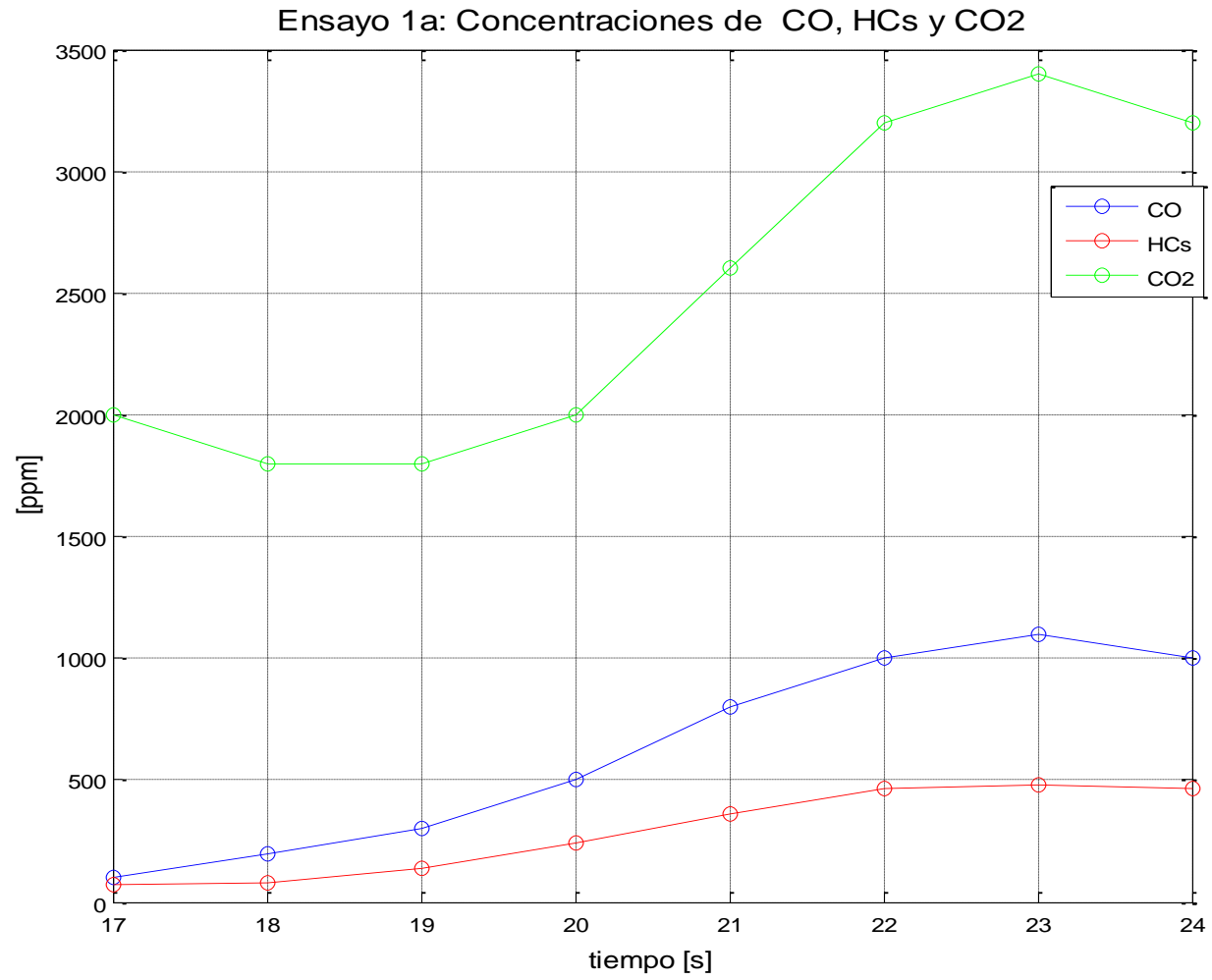
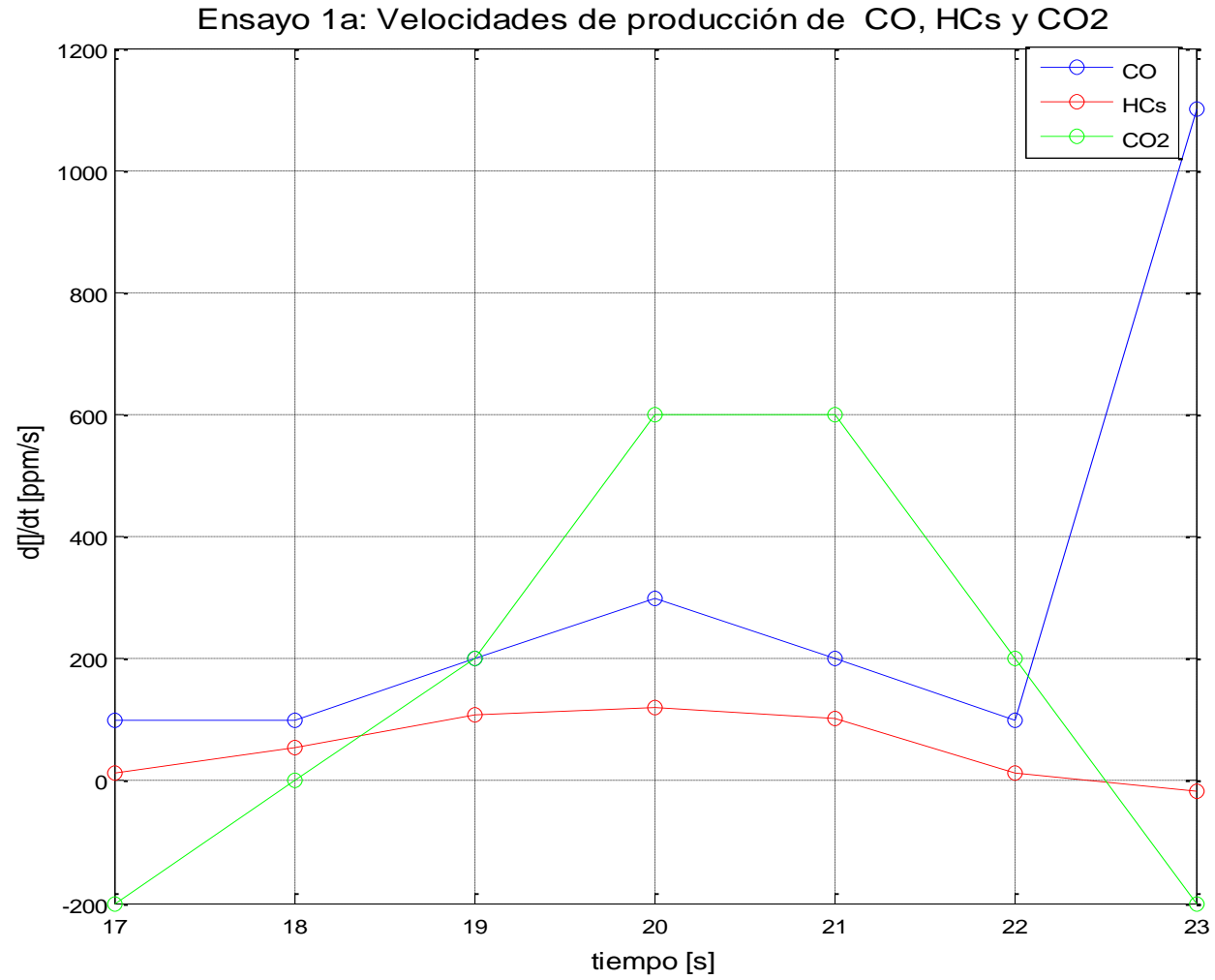


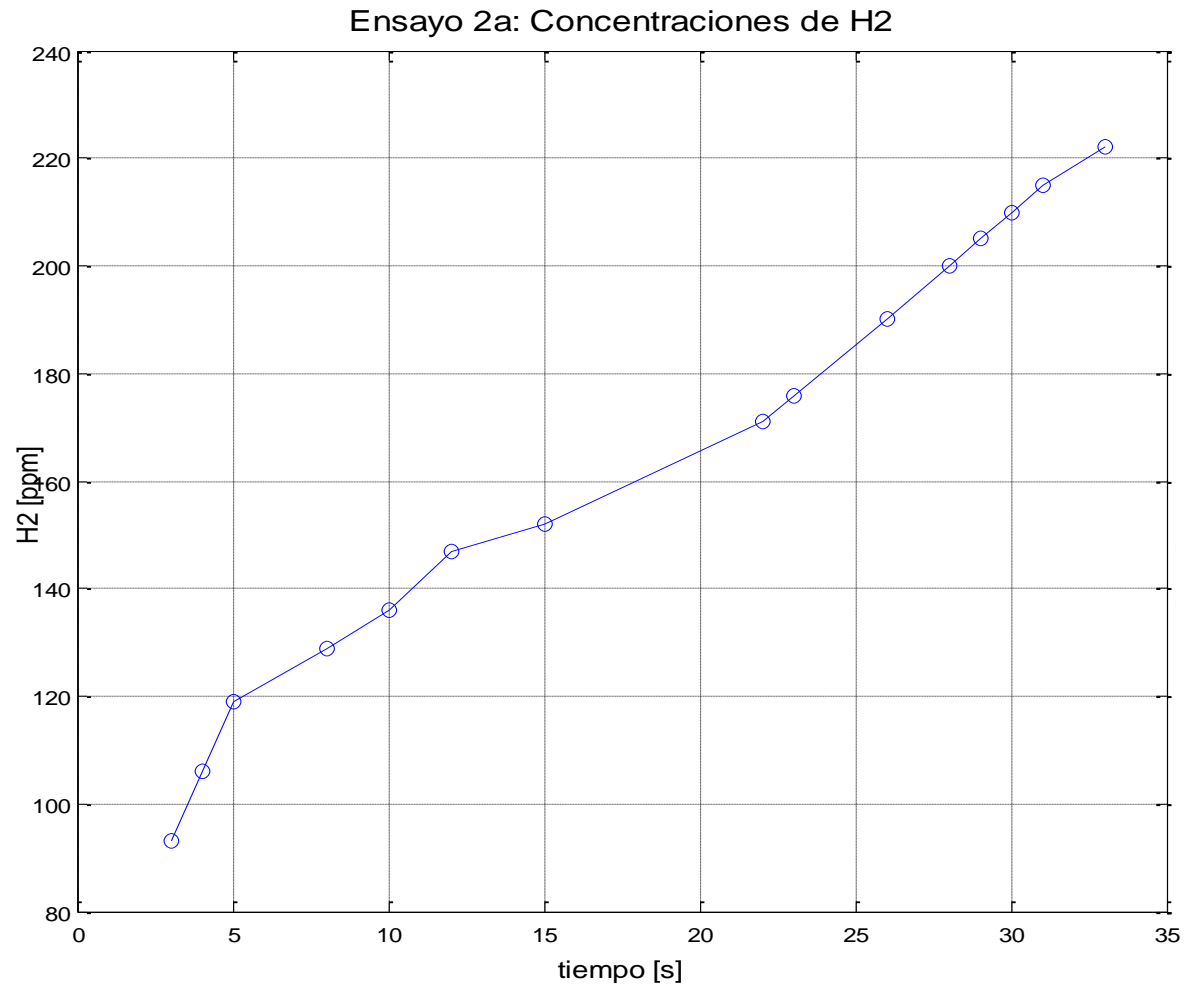
Figura F3. Concentraciones de CO, CO2 y HCs para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento A.



**Figura F4.** Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento A.



**Figura F5.** Concentraciones de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento A.



**Figura F6.** Velocidades de producción de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento A.

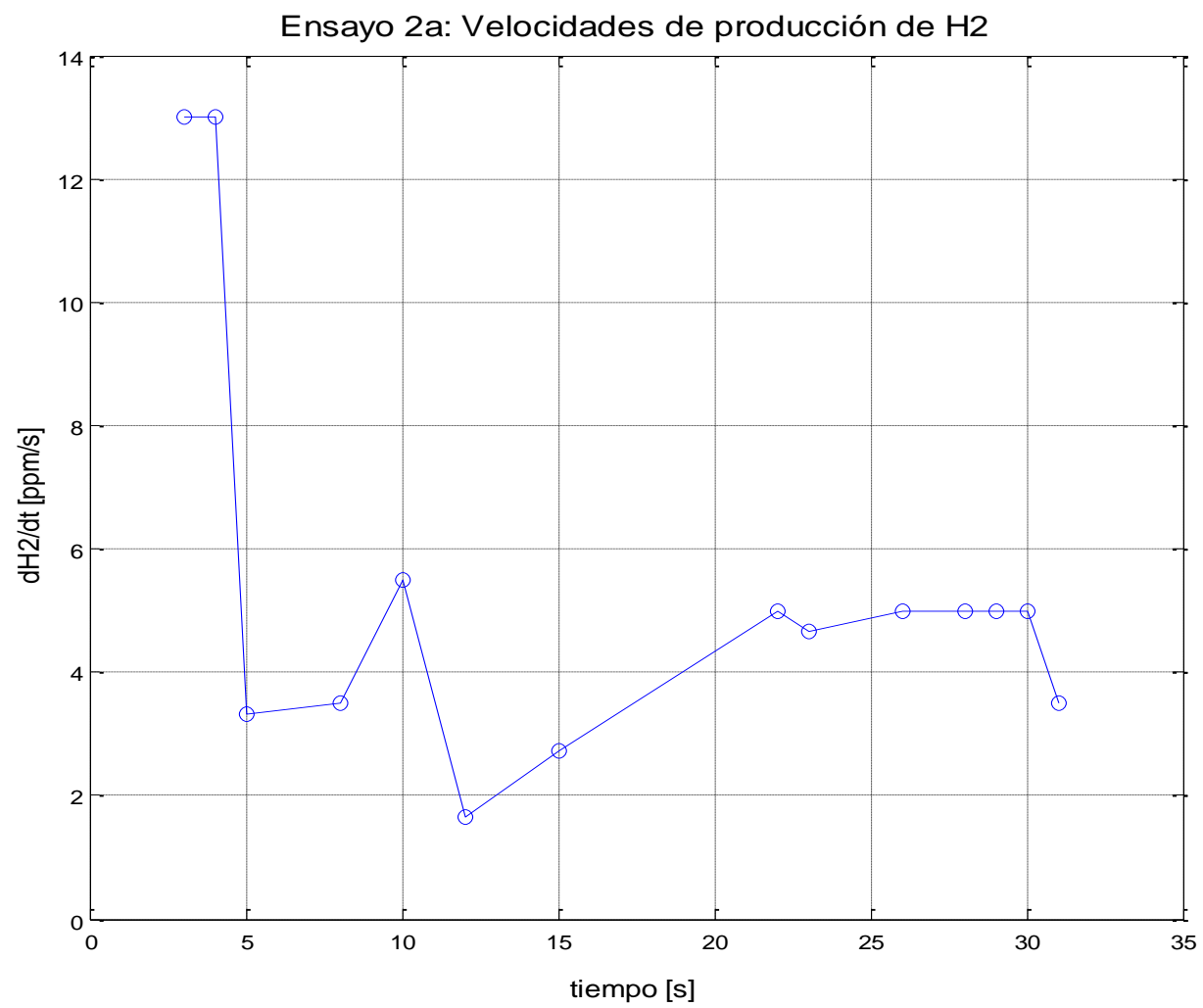
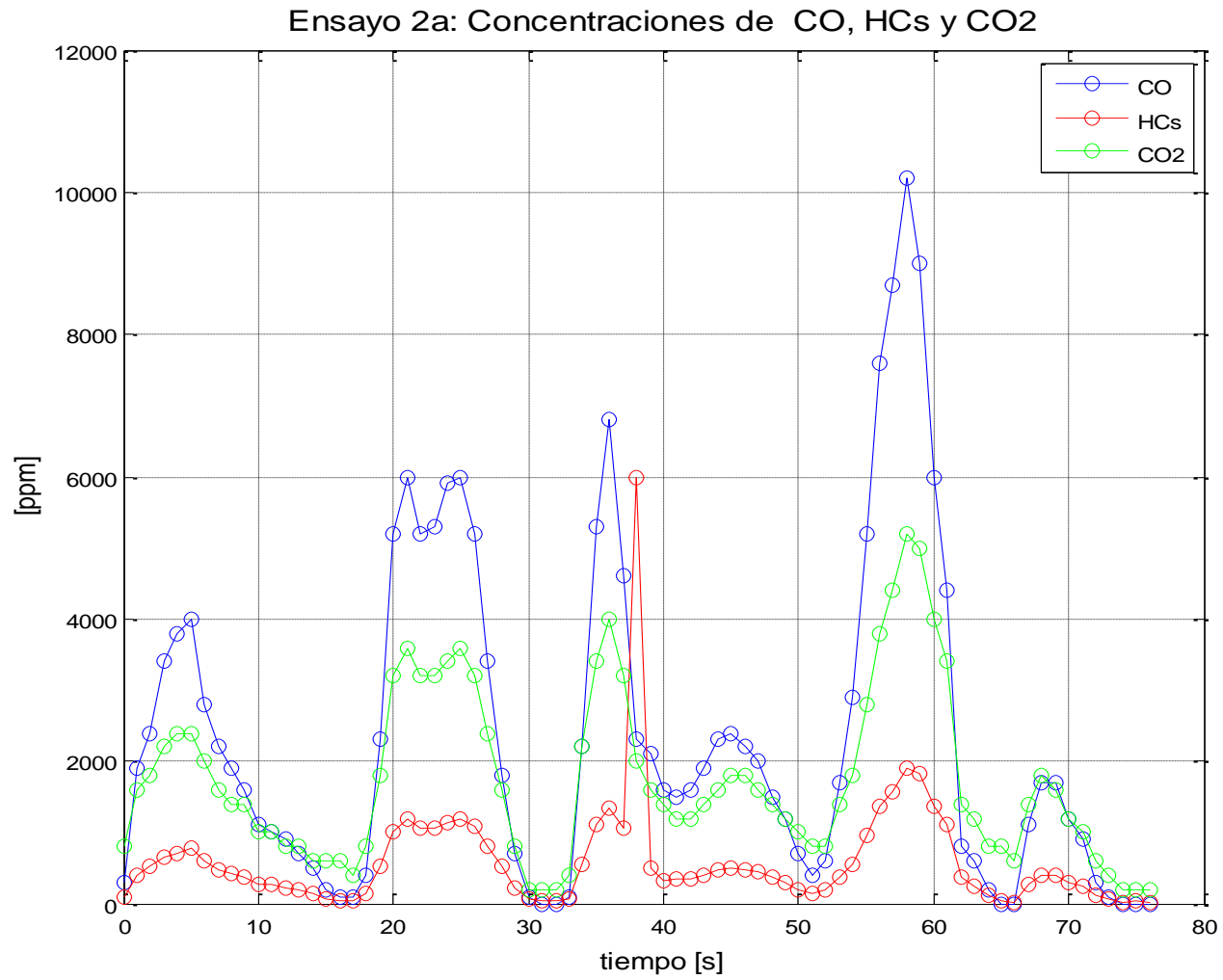
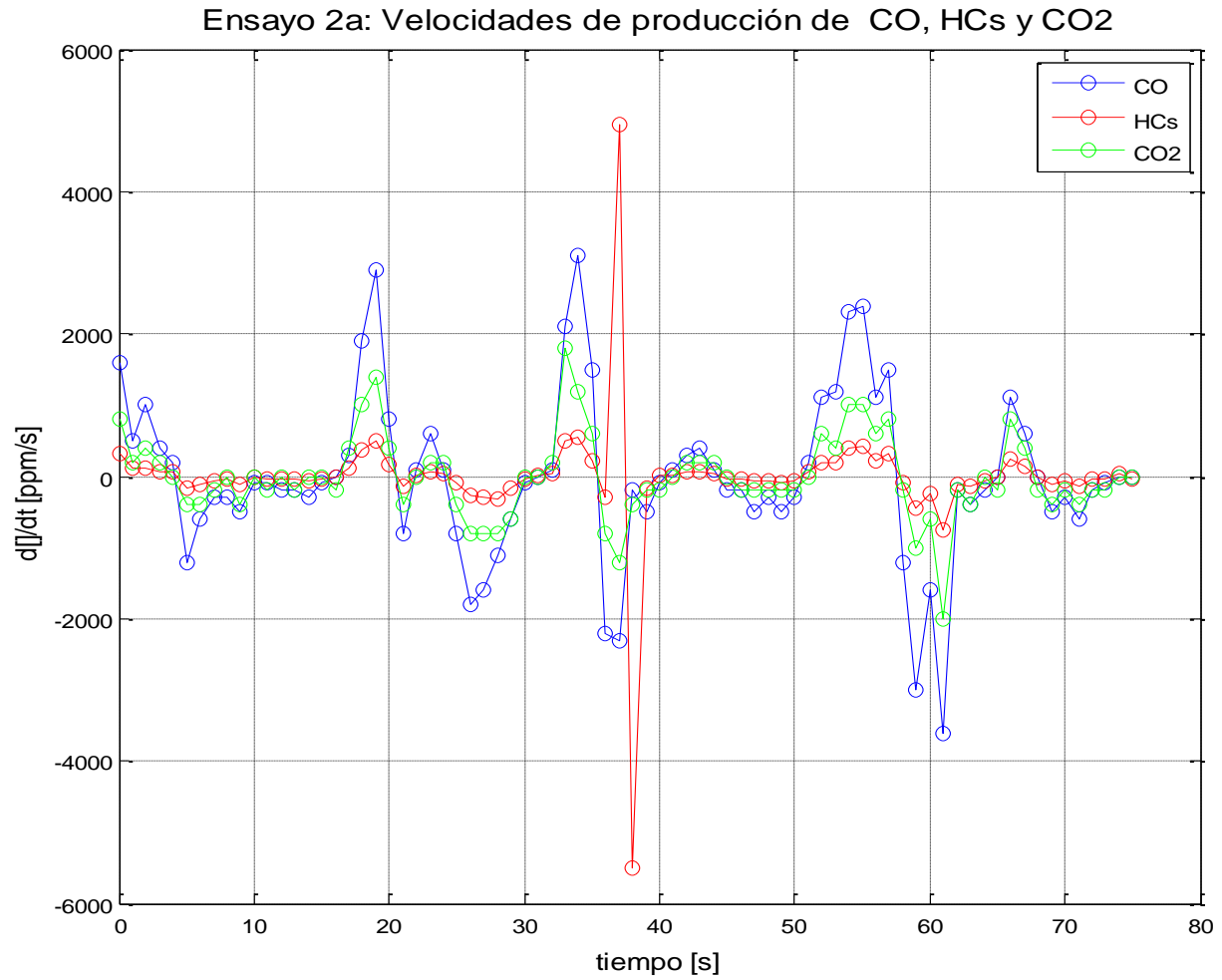


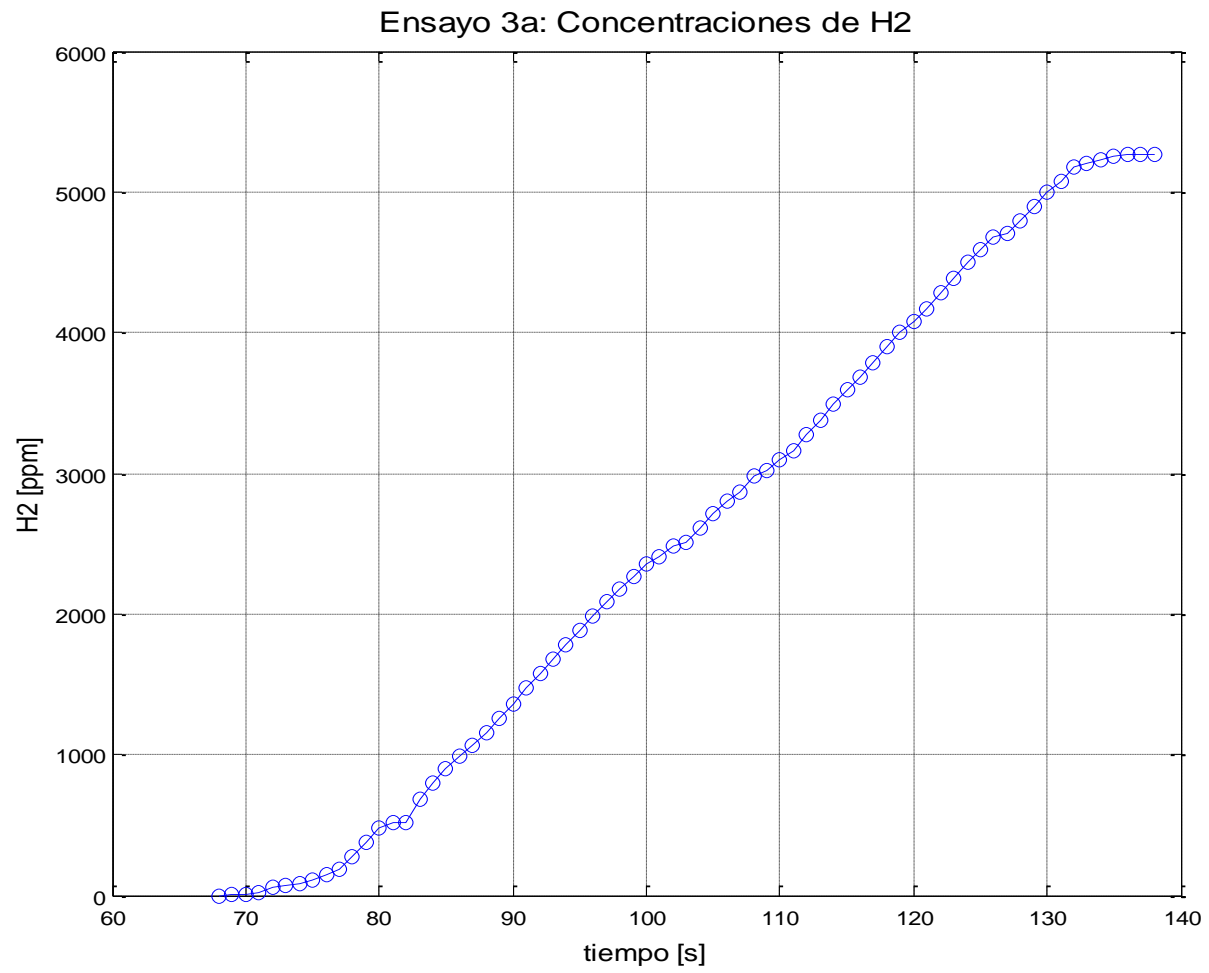
Figura F7. Concentraciones de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento A.



**Figura F8.** Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento A.



**Figura F9.** Concentraciones de H<sub>2</sub>, para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento A.



**Figura F10.** Velocidades de producción de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento A.

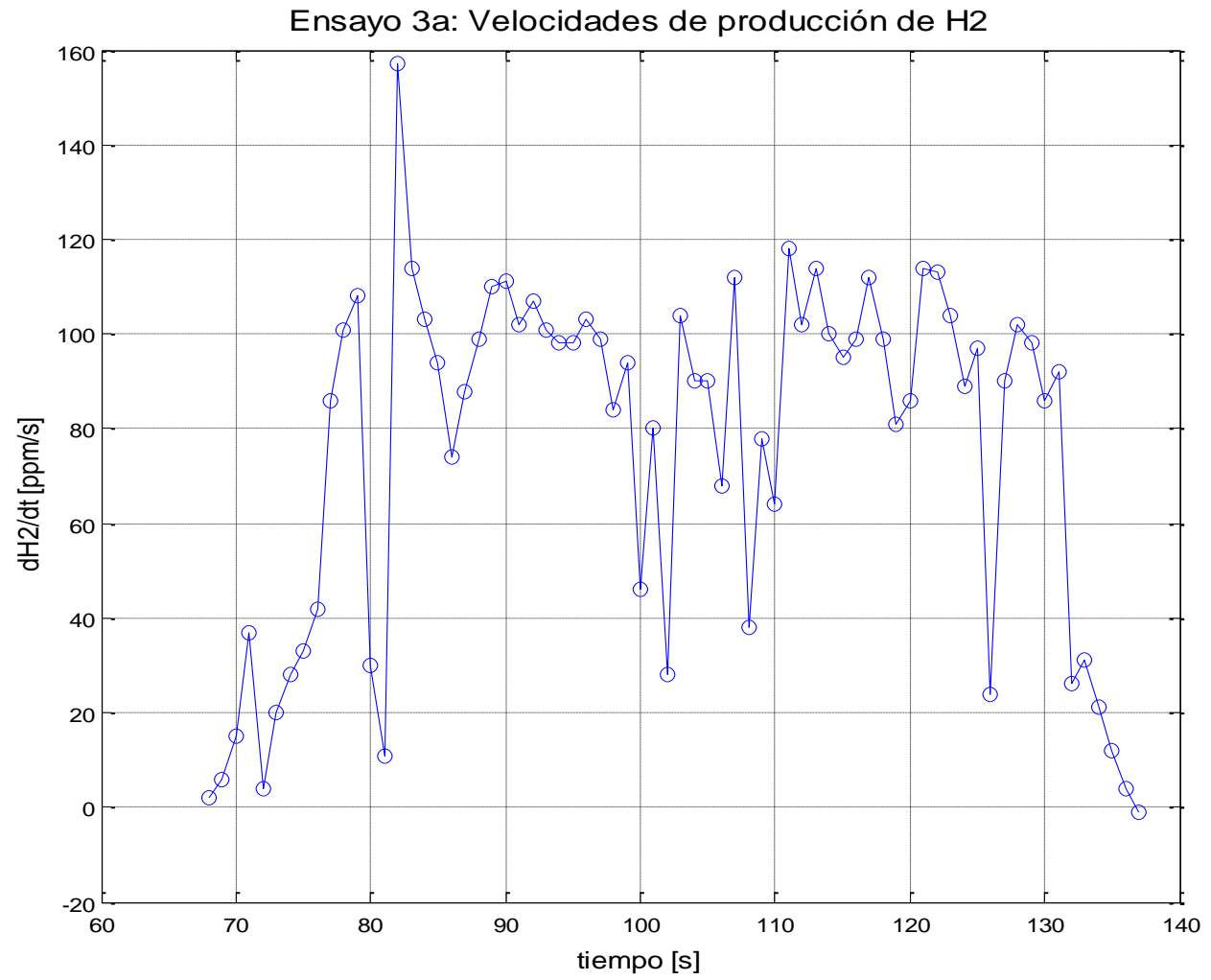


Figura F11. Concentraciones de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento A.

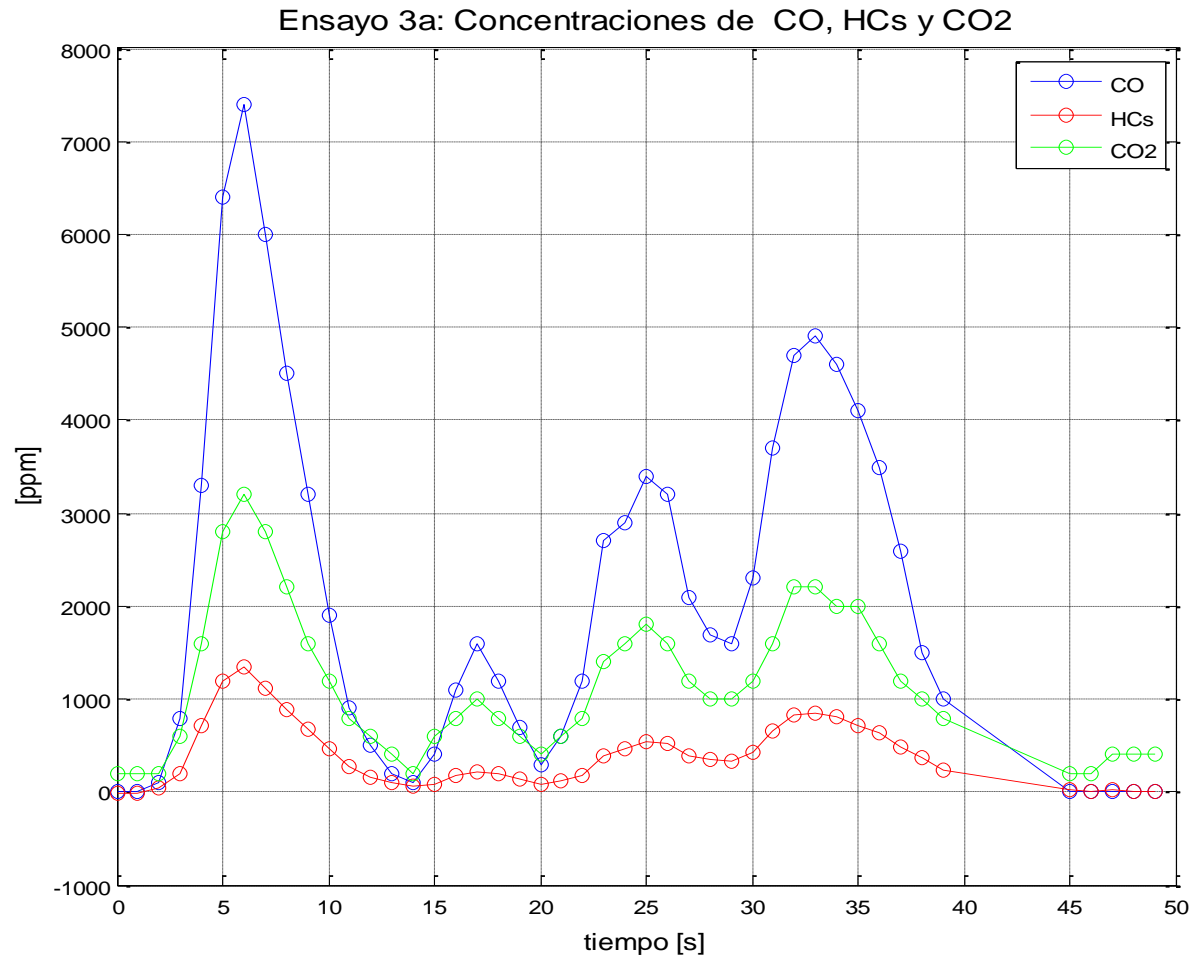
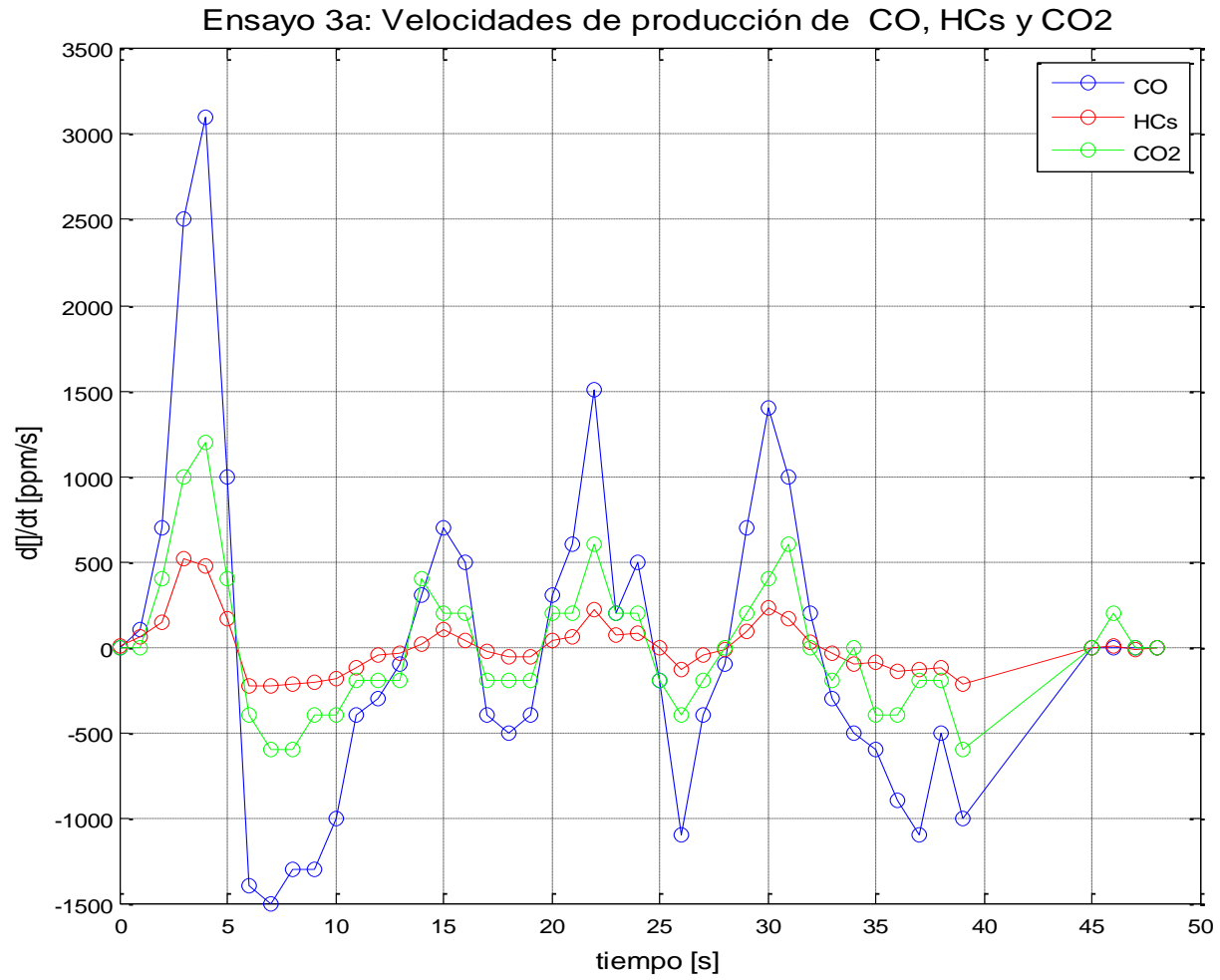
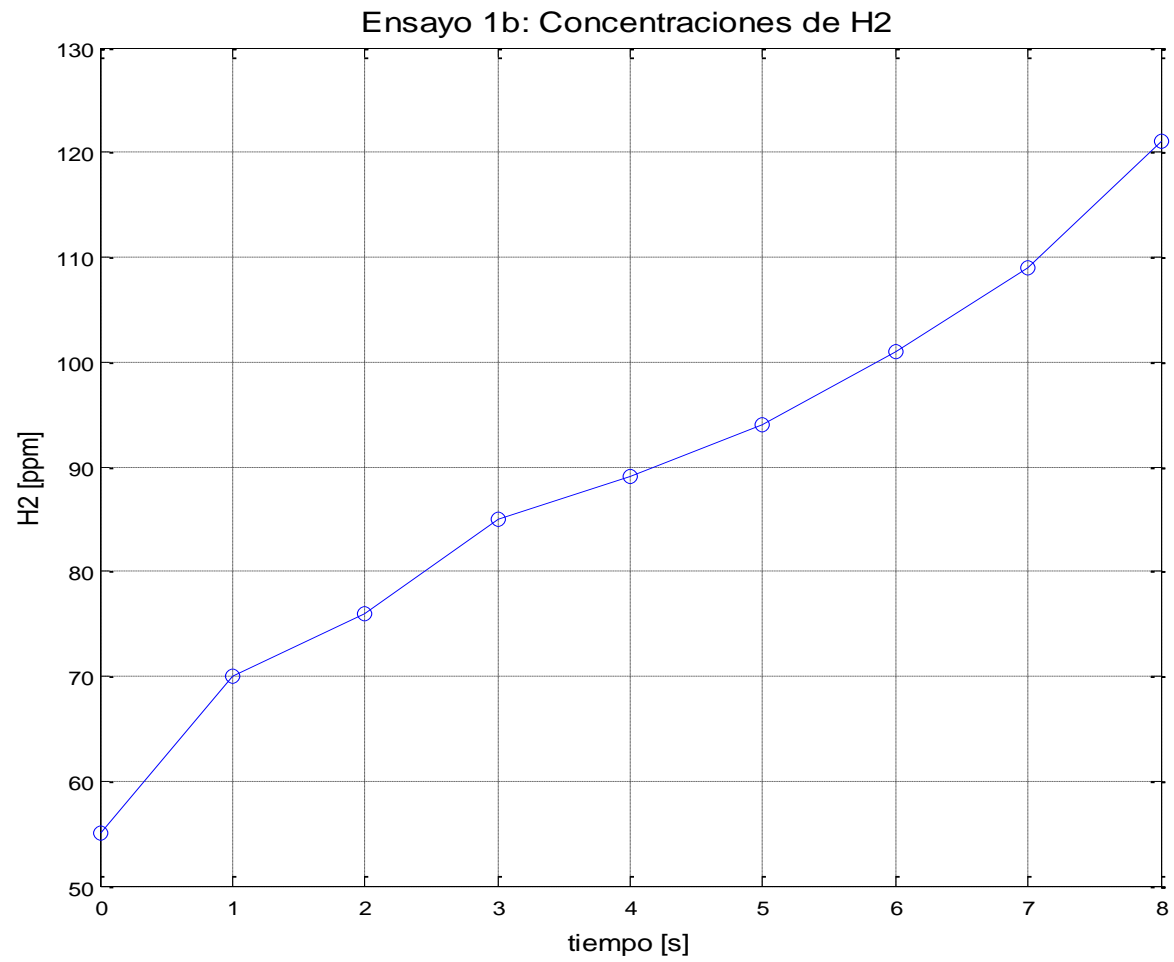


Figura F12. Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento A.



**Figura F13.** Concentraciones de H<sub>2</sub>, para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento B.



**Figura F14.** Velocidades de producción de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento B.

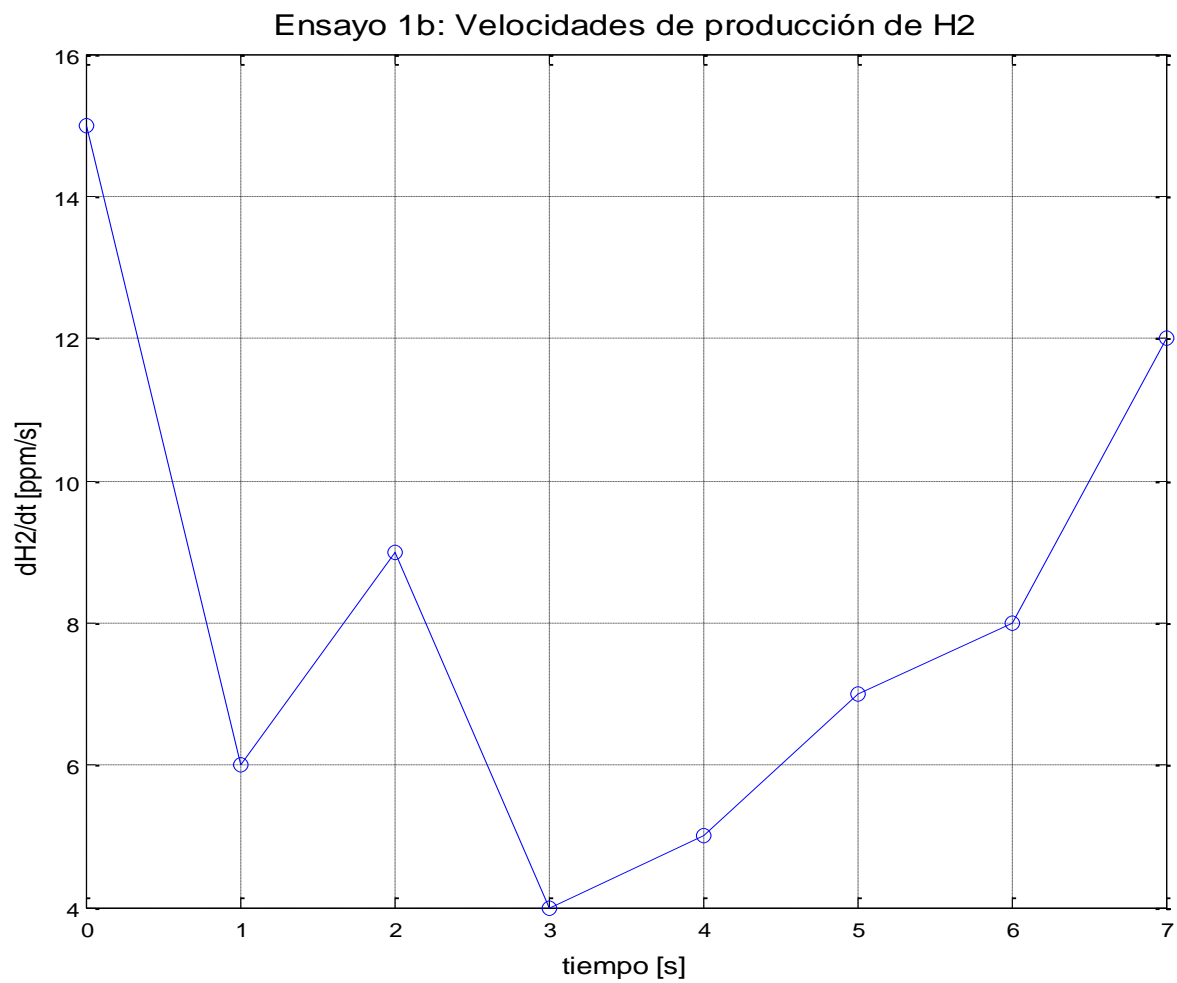


Figura F15. Concentraciones de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento B.

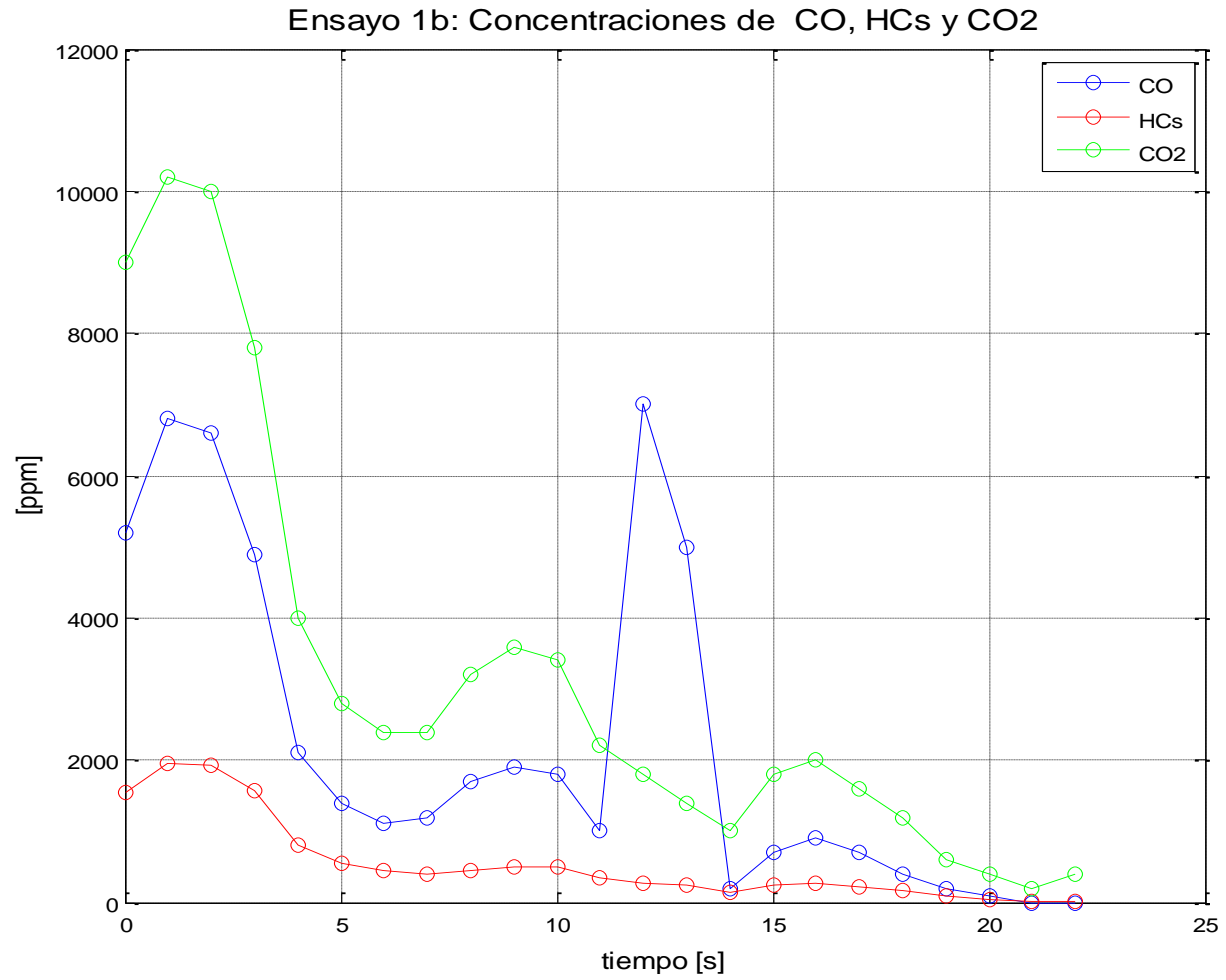


Figura F16. Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 1, tratamiento B.

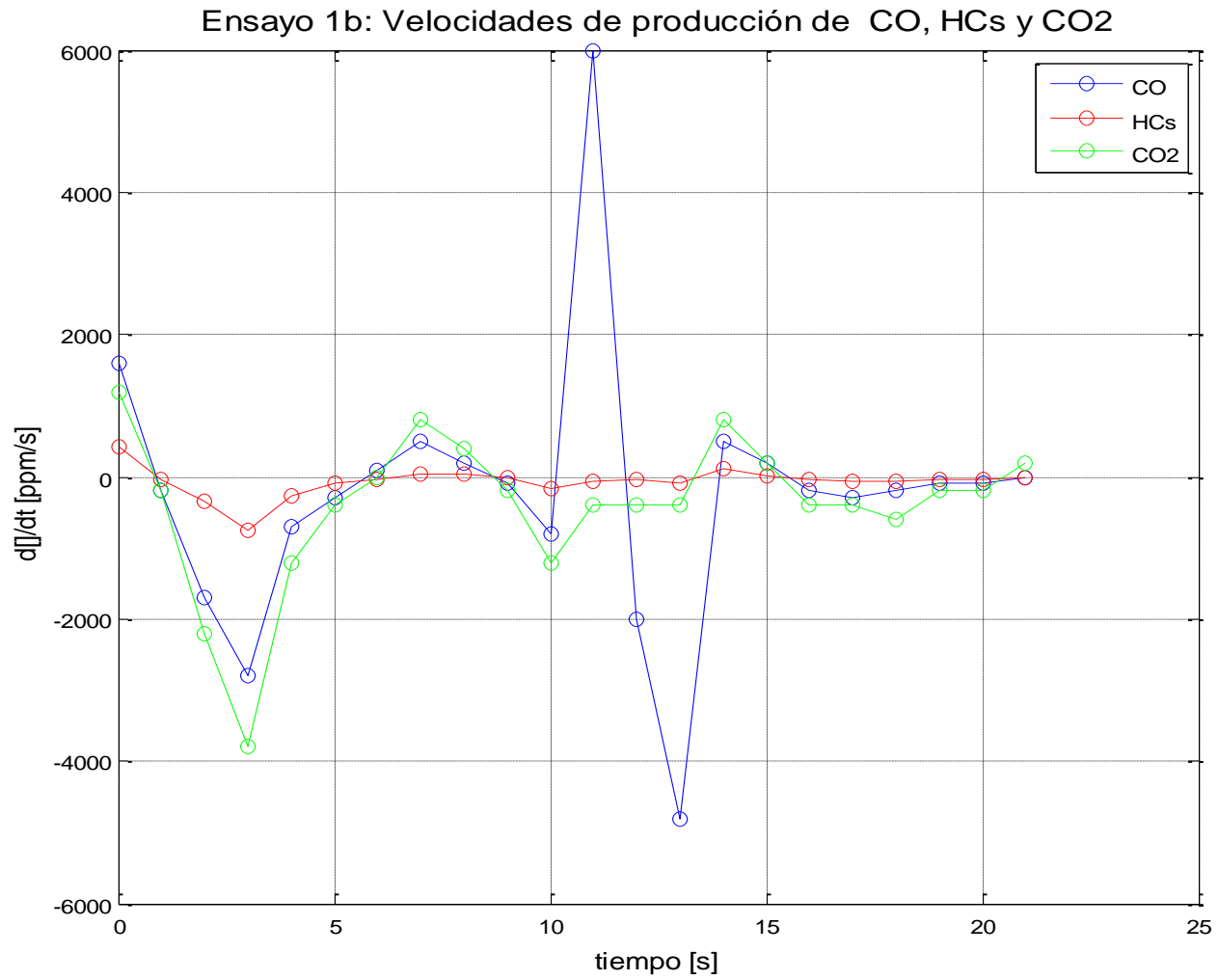
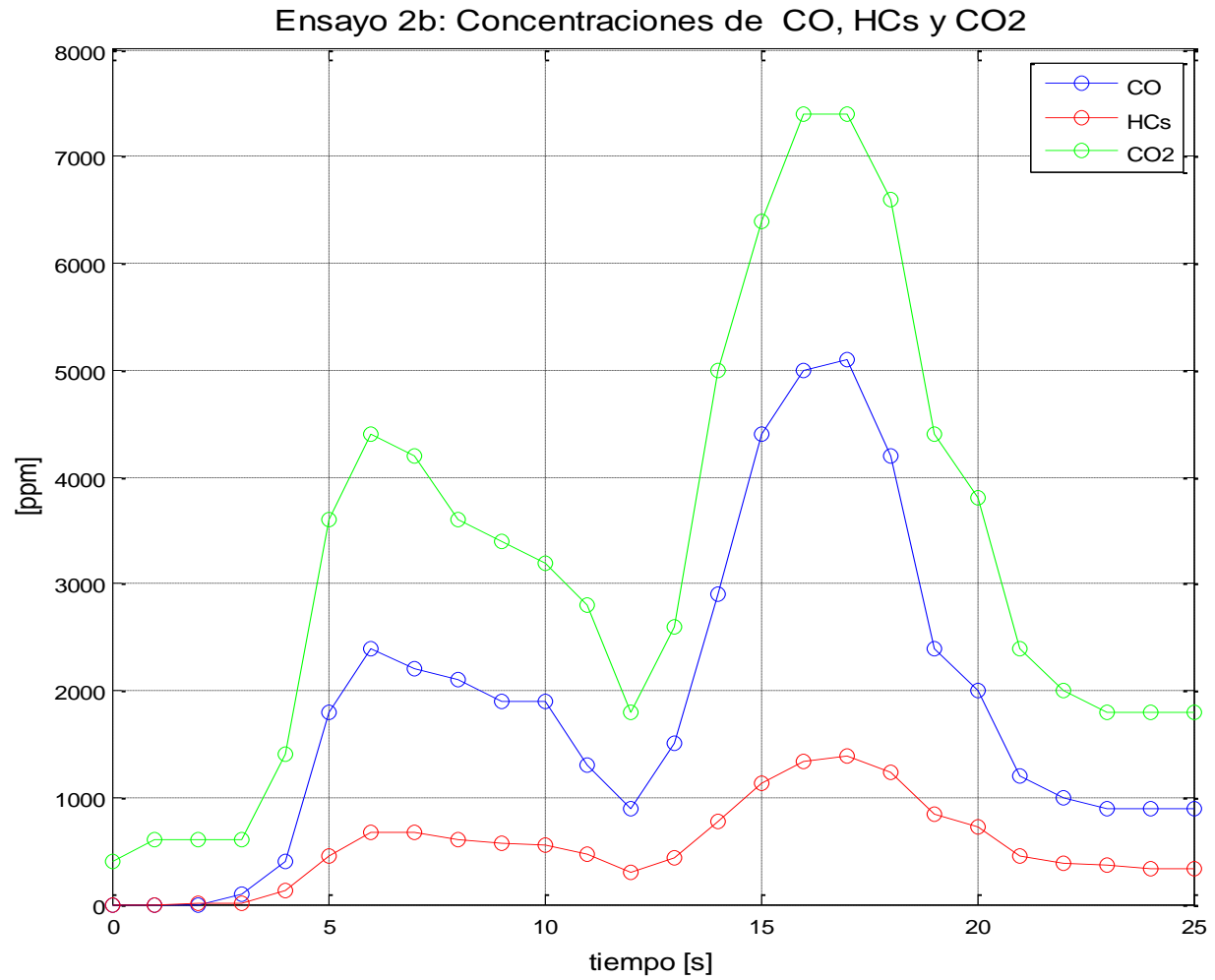


Figura F17. Concentraciones de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento B.



**Figura F18.** Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 2, tratamiento B.

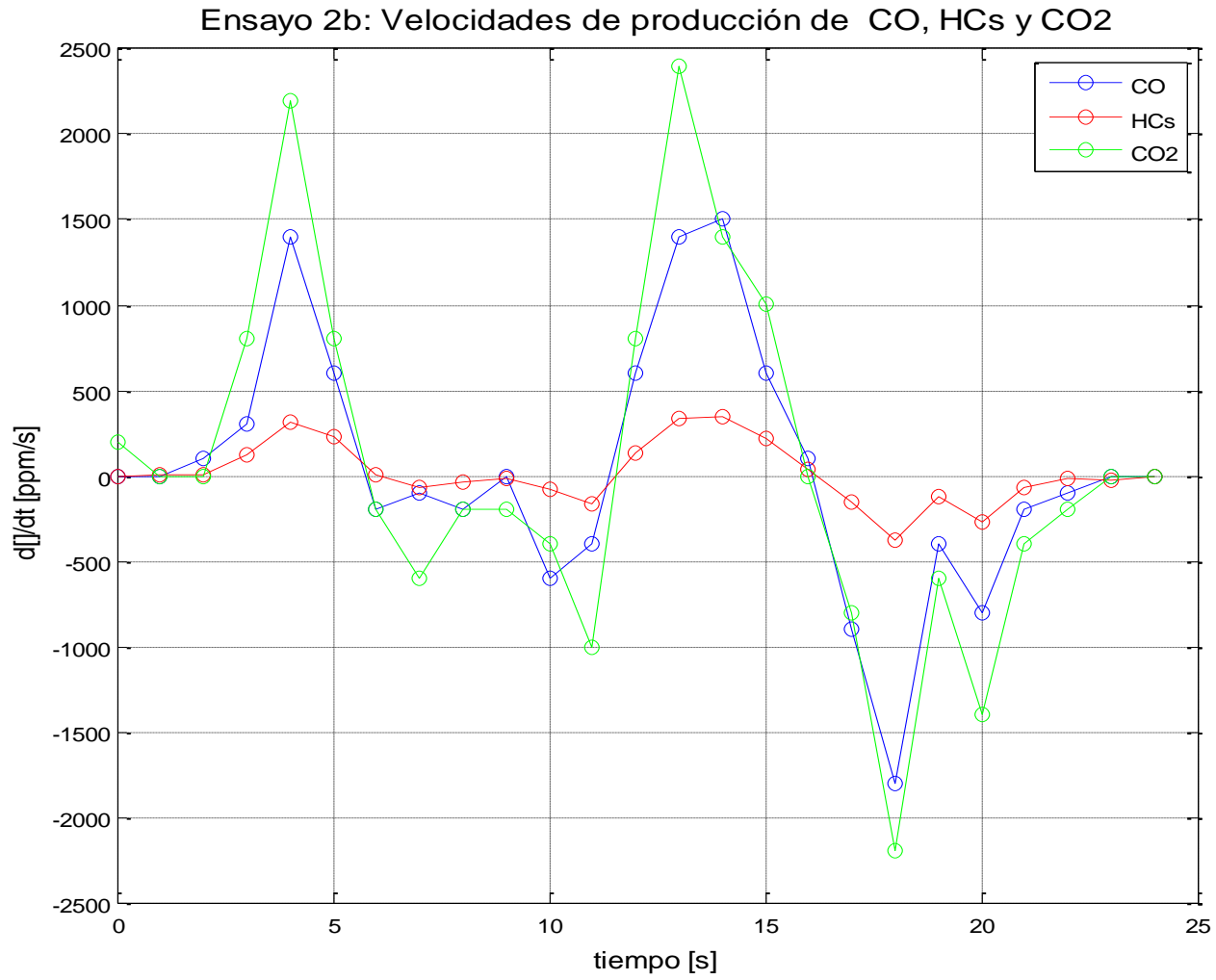
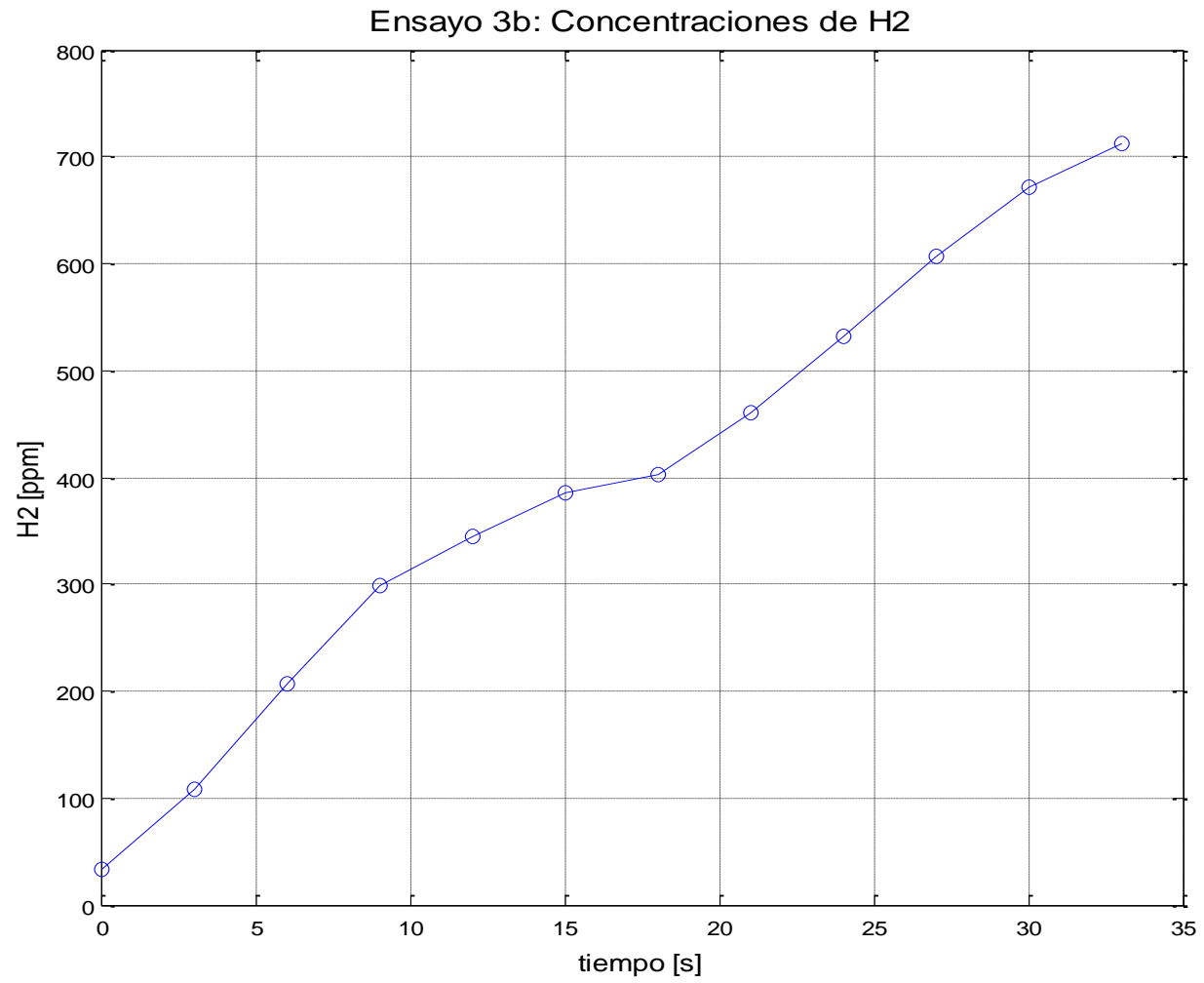
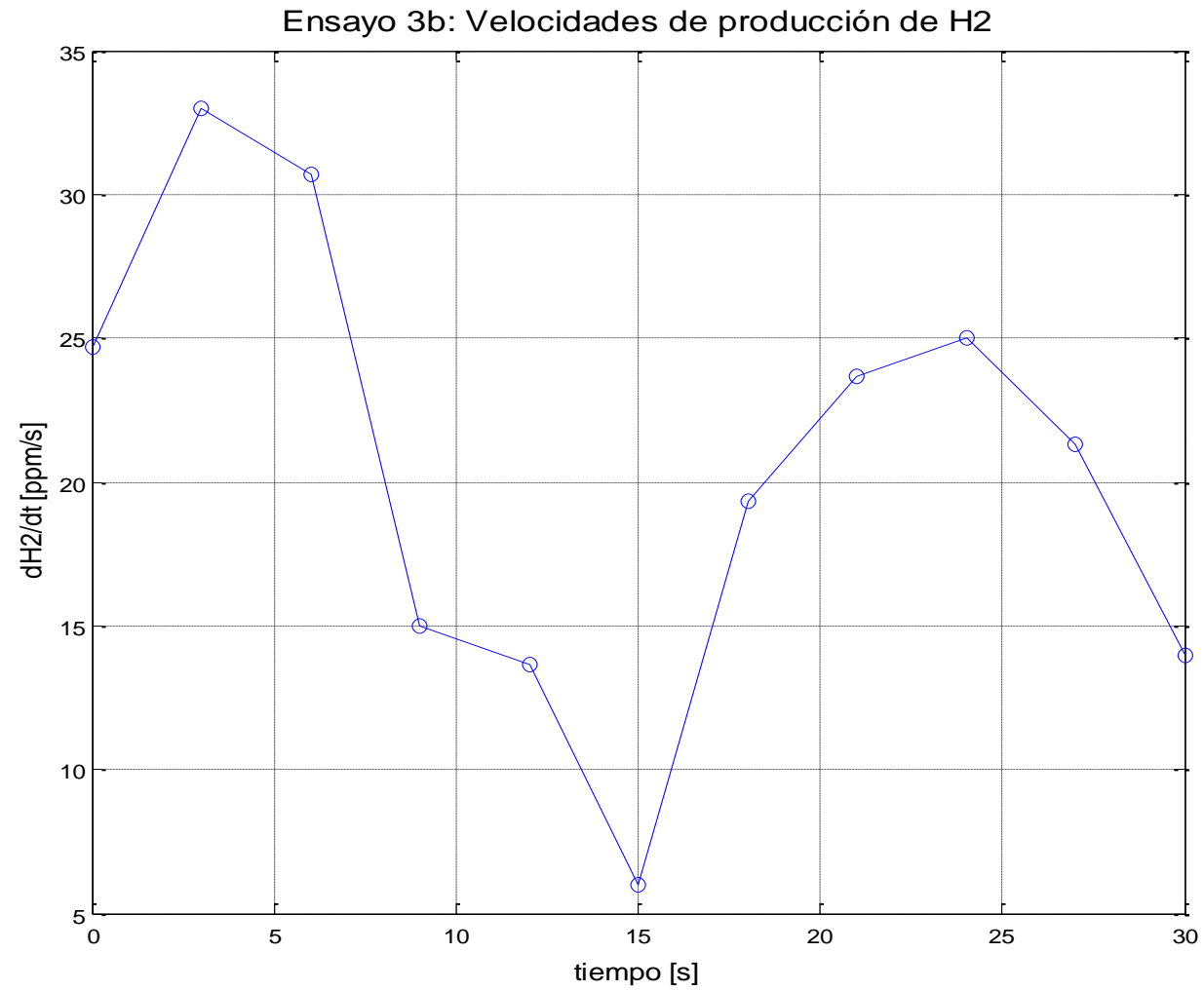


Figura F19. Concentraciones de H<sub>2</sub>, para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento B.



**Figura F20.** Velocidades de producción de H<sub>2</sub> para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento B.



**Figura F21.** Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento B.

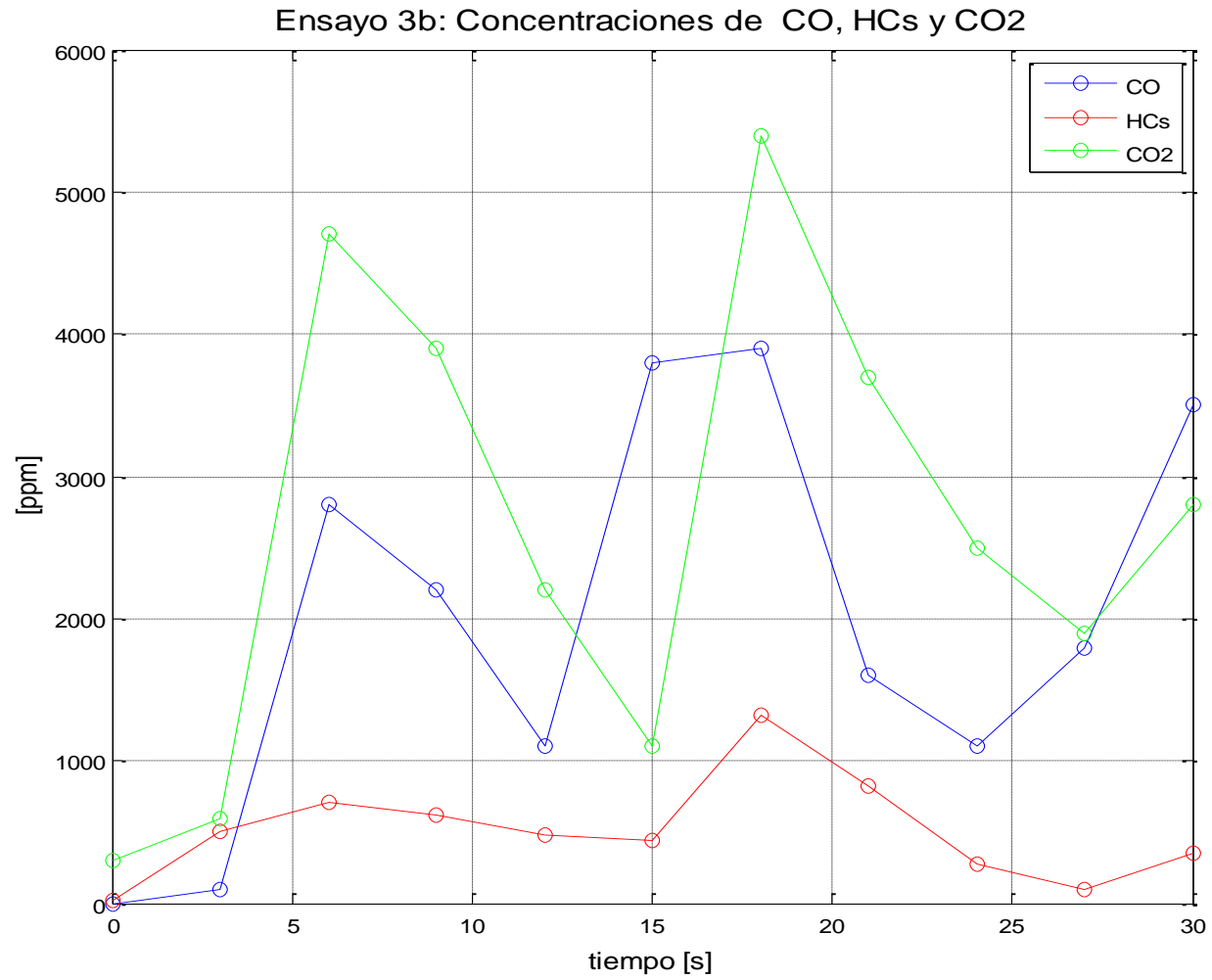
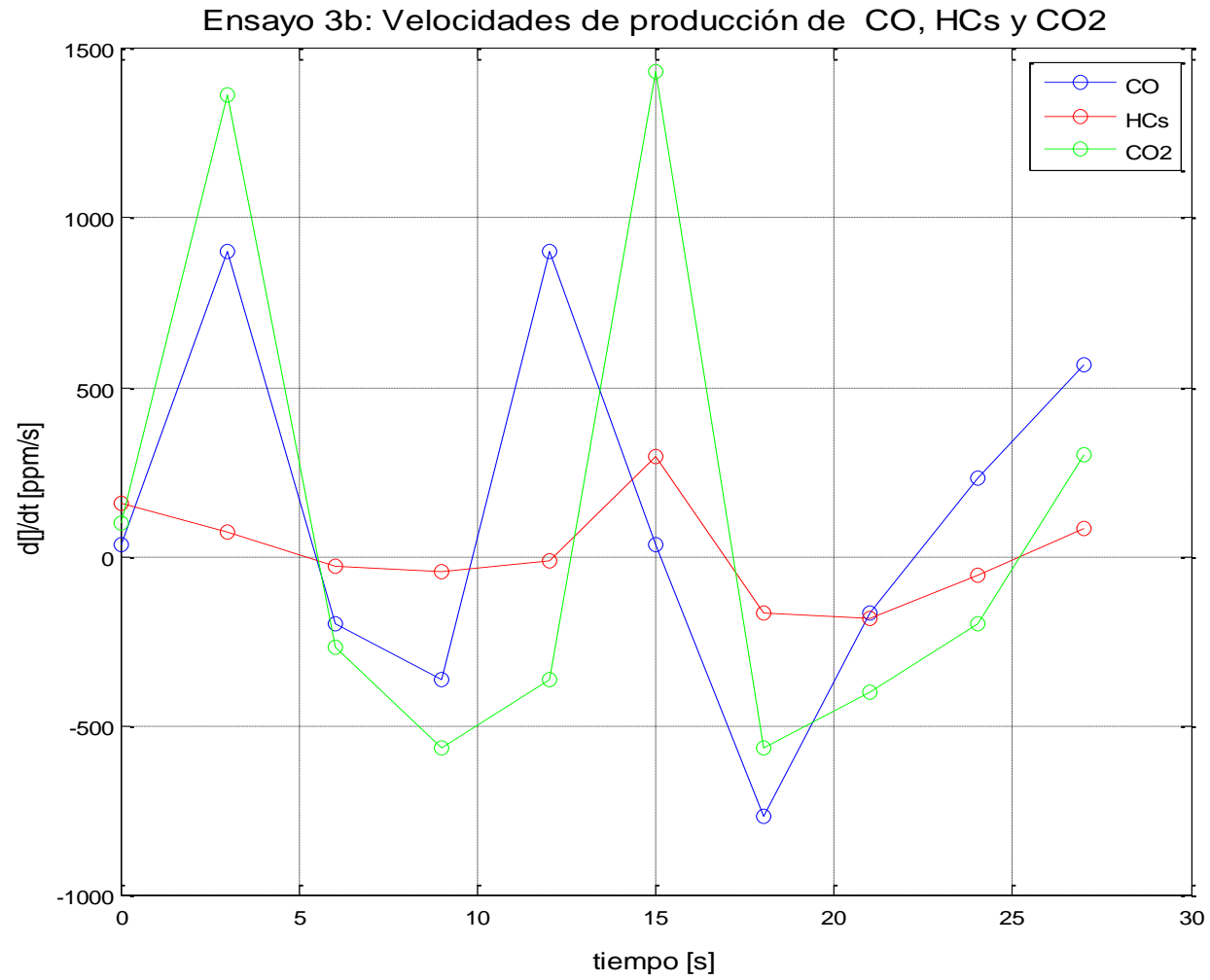


Figura F22. Velocidades de producción de CO, CO2 y HCs. para glicerina cruda, ensayo 3, tratamiento B.



## Anexo G. Propiedades del acero inoxidable aleación 308

A continuación se referencian algunas propiedades relevantes del acero aleación 308.

**Tabla G1.** Composición referencial del acero inoxidable aleación 308.

Elemento	Proporción %
C	0.08
Mn	2.00
Si	1.00
Cr	19.0-21.0
Ni	10.0-12.0
SP	0.045
S	0.03

**Tabla G2.** Propiedades mecánicas del acero inoxidable aleación 308.

Propiedades		Condiciones	
		T (°C)	Tratamiento
Densidad ( <b>×1000 kg/m<sup>3</sup></b> )	<u>8</u>	<u>25</u>	
Relación de envenenamiento	0.27-0.30	<u>25</u>	
Módulo elástico ( <b>GPa</b> )	<u>193</u>	<u>25</u>	Finalizado por calentamiento y recocido (plato, hoja, banda)
Resistencia a la tensión ( <b>Mpa</b> )	<u>515</u>	<u>25</u>	
Fluencia ( <b>Mpa</b> )	<u>205</u>		
Elongación (%)	40		
Reducción en área (%)	50		
Dureza ( <b>HRB</b> )	88 (máx.)	<u>25</u>	Recocido (plato, hoja, banda)

50

[http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless\\_steels/show\\_stainless.cfm?ID=AISI\\_Type\\_308&prop=all&Page\\_Title=AISI%20Type%20308](http://www.efunda.com/materials/alloys/stainless_steels/show_stainless.cfm?ID=AISI_Type_308&prop=all&Page_Title=AISI%20Type%20308)

**Tabla G3.** Propiedades térmicas del acero inoxidable aleación 308.

Propiedades		Condiciones	
		T (°C)	Tratamiento
Expansión térmica ( $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ )	<u>17.2</u>	Mayor a <u>0-100</u>	---
Conductividad térmica ( $\text{W/m-K}$ )	<u>15.2</u>	Mayor a <u>100</u>	---
Calor específico ( $\text{J/kg-K}$ )	<u>500</u>	<u>0-100</u>	---

**Tabla G4.** Propiedades térmicas del acero inoxidable aleación 308.

Propiedades		Condiciones	
		T (°C)	Tratamiento
Resistividad Eléctrica ( $10^{-9}\text{W-m}$ )	<u>720</u>	<u>25</u>	---

## **Anexo H. Caucho butadieno-acrilonitrilo**

El hule butadieno-acrilonitrilo es un copolímero de butadieno con estireno. Las diferencias básicas entre los distintos tipos se deben principalmente a la concentración de acrilonitrilo en el hule y a la cantidad de estabilizador empleado.

Estos hules se conocen comercialmente como hules nitrilo, y según sus características se clasifican en hule GRN, Buna N y NBR.

Sus principales aplicaciones son como saturantes de papel, acabados de textiles y pieles, adhesivos, ligantes de fibras no tejidas, y para la preparación de espumas resistentes al aceite para producir lubricantes para baleros de uso pesado como los de los ferrocarriles.

---

<sup>51</sup> [http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec\\_17.html](http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen1/ciencia2/39/html/sec_17.html)

## Anexo I. Propiedades de los acrílicos

A continuación se referencian algunas propiedades del polímero butadieno/-acronitrilo(acrílico) empleado en la construcción del recipiente y tapa del reactor.

**Tabla I1.** Propiedades mecánicas de varios tipos de acrílicos.

Propiedades mecánicas	UNIDADE S	NORMA S ASTM	COLADO	EXTRUIDO	IGNIFUGO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
<b>TRACCIÓN</b>						
Resistencia en el límite elástico	kg/cm2	D-638				
Resistencia a la rotura	kg/cm2	D-638	562-773	492-773	562-878	386
Elongación a la rotura	%	D-638	4,5	5,0	5,0	
Módulo de elasticidad	kg/cm2	D-638	24.600-31.000	23000-31.000	26.600-33.700	
<b>Flexión</b>						
Resistencia en el límite elástico o rotura	kg/cm2	D-790	840-1.300	740-1.300	840-1.250	562
Módulo de elasticidad	kg/cm2	D-790	27.500-33.400	22.800-32.300	24.600-31.600	17.500
<b>Compresión</b>						
Resistencia a la compresión(ruptura)	kg/cm2	D-695	773-1.330	740-1260	773-840	
Módulo de compresión	kg/cm2	D-695	27.500-33.300	26.000-32.300	31.000	
<b>Impacto</b>						
Resistencia al impacto IZOD	kg/cm2	D-256 A	1,9	2,4	1,9	6,52

<sup>52</sup> <http://www.famadacrilicos.com.ar/concepto.htm>

<b>DUREZA</b>						
<b>Rockwell</b>		D-795	M-80-M- 100	M-68 M- 105	M-61 - M100	R-99
<b>Barcol</b>		D-2583	50	50	45	35

**Tabla I3.** Propiedades físicas de varios tipos de acrílicos.

<b>Propiedades Térmicas</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>NORMAS ASTM</b>	<b>COLADO</b>	<b>EXTRUIDO</b>	<b>IGNIFUGO</b>	<b>EXTRUIDO ALTO IMPACTO</b>
<b>Coefficiente de dilatacion lineal</b>	cm/cm°C	D-696	6,0 X 10A LA MENOS 5	1,3 X 10A LA MENOS 5		
<b>Temperatura de deflexión bajo carga</b>	18'6kg/cm2	D-648	86°C	68-96°C	82 °C	
<b>Conductividad Térmica</b>	10 A LA MENOS 4 cal cm/sec cm2 °C	C-177	4,0-6,0	4,0-6,0		
<b>Calor específico</b>	cal/g/°C		0,35	0,3	0,35	

**Tabla I2.** Propiedades térmicas de varios tipos de acrílicos.

<b>Propiedades físicas</b>	<b>UNIDADES</b>	<b>NORMAS ASTM</b>	<b>COLADO</b>	<b>EXTRUIDO</b>	<b>IGNIFUGO</b>	<b>EXTRUIDO ALTO IMPACTO</b>
<b>Peso específico</b>	g/cm3	D-792	1,19-1,20	1,19-1,20	1,23	1,15
<b>Absorción de agua</b>	%	D-570	0,2-0,4	0,1-0,4	0,63	0,4

**Tabla I4.** Propiedades eléctricas de varios tipos de acrílicos.

Propiedades eléctricas	UNIDADES	NORMAS ASTM	COLADO	EXTRUIDO	IGNIFUGO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
Resistencia eléctrica	ohm/cm	D-257	>10 A LA SEXTA	>10 A LA SEXTA	>10 A LA SEXTA	
Rigidez dielectrica	Kv/mm	D-149	19	17	16	

**Tabla I5.** Propiedades ópticas de varios tipos de acrílicos.

Propiedades ópticas	UNIDADES	NORMAS ASTM	COLADO	EXTRUIDO	IGNIFUGO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
Índice de refracción		D-542	1,49	1,49	1,5	1,49
Transmitancia	%	D-791	92	92	92	90
Nubosidad (Haze)	%	D-1003	1	1	1	4

**Tabla I6.** Propiedades químicas de varios tipos de acrílicos.

Propiedades químicas	UNIDADES	NORMAS ASTM	COLADO	EXTRUIDO	IGNIFUGO	EXTRUIDO ALTO IMPACTO
Resistencia a la intemperie			Excelente	Excelente	Amarillea	Excelente
Resistencia			No es	No es	No es atacado	No es

<b>a los ácidos débiles</b>	atacado	atacado		atacado
<b>Resistencia a los ácidos fuertes</b>	No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
<b>Resistencia a los álcalis débiles</b>	No es atacado	No es atacado	No es atacado	No es atacado
<b>Resistencia a los álcalis fuertes</b>	Es atacado	Es atacado	Es atacado	Es atacado
<b>Ácidos Oxidantes</b>	Es atacado	Es atacado	Es atacado	Es atacado
<b>Resistencia a los solventes</b>			Son atacados por cetonas, ésteres. Hidrocarburos aromáticos y derivados clorados	

## Anexo J. Precio referencial de la energía eléctrica

**Tabla J1.** Precio referencial de la energía eléctrica al usuario final regulado en Santander para el mes de Septiembre de 2.011.

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. ESP.								
INFORMA A SUS USUARIOS DEL SISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA DE DEPARTAMENTO DE SANTANDER Y SUR DEL CESAR De acuerdo con las resoluciones 119/07, 097/08, 121/09 y 172/09 expedidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, que permiten establecer los costos de la prestación del servicio a usuarios regulados, las tarifas para el mes de <b>septiembre-11</b>								
TARIFAS RESIDENCIALES								
ESTRATO			2		3		4	
PROPIEDAD	NIVEL MEDIDA	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	TARIFA \$/kWh
ACTIVOS								
ESSA	I	-39.40%	155.8899	-49.24%	194.8623	-15.00%	326.3309	383.9187
CLIENTE	I	-39.34%	141.2776	-49.17%	176.5968	-15.00%	295.3390	347.4576
Nota: El subsidio es aplicado hasta el consumo de subsistencia.								
TARIFAS RESIDENCIALES				TARIFAS NO RESIDENCIALES				
ESTRATO			3 y 6	COMERCIAL / INDUSTRIAL		ACUEDUCTOS ESP		OFICIAL
PROPIEDAD	NIVEL MEDIDA	% CONTRB.	TARIFA \$/kWh	CONTRIB. 20%	TARIFA \$/kWh	CONTRIBUCION 10%	TARIFA \$/kWh	TARIFA \$/kWh
ACTIVOS								
ESSA	I	20.00%	460.7024	76.7837	460.7024	38.3919	422.3106	383.9187
CLIENTE	I	20.00%	416.9451	69.4915	416.9451	34.7458	382.2034	347.4576
	II			64.2797	385.6782	32.1399	333.5384	321.3985
	III			48.3533	293.7158	24.4767	269.2432	244.7665
	IV			44.0825	264.4951	22.0413	242.4539	220.4126
COMPONENTES DEL COSTO UNITARIO VARIABLE Y FLUJO DE PRESTACION DEL SERVICIO (CU) según Res. CREG 119/2007								
NIVEL MEDIDA	G	T	D	Cv	PR	R	CUv Aplicado	CUF Aplicado
	Compra Energía	Costo STN	Costo Distribución	Costo de Comercialización	Costo de Compra, transporte y reducción de pérdidas	Costo de Restricciones	Costo Unitario Variable de Prestación del Servicio	Costo Unitario Fijo de Prestación del Servicio
	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh
I ESSA	125.2217	20.7470	160.9443	37.9729	24.8024	14.2304	383.9187	0.0000
I CLIENTE	125.2217	20.7470	124.4832	37.9729	24.8024	14.2304	347.4576	0.0000
II	125.2217	20.7470	112.4529	37.9729	10.7736	14.2304	321.3985	0.0000
III	125.2217	20.7470	39.1809	37.9729	7.4136	14.2304	244.7665	0.0000
IV	125.2217	20.7470	17.2540	37.9729	4.9866	14.2304	220.4126	0.0000
100% ESSA (Fíase)	125.2217	20.7470	142.7138	37.9729	24.8024	14.2304	365.6882	0.0000
INDICADORES DE CALIDAD (metas DES FES) Tercer Trimestre 2011								
GRUPOS						VALORES MAXIMOS		
						DES	FES	
1	Cabecera Municipal, población >= 100.000 Habitantes					3	8	
2	Cabecera Municipal, población <100.000>~50.000 Habitantes					4	10	
3	Cabecera Municipal, población < 50.000 Habitantes					6	16	
4	Áreas rurales					13	14	
DES: Tiempo de interrupción de un circuito durante el último trimestre						FES: Numero de interrupciones de un circuito durante el último trimestre		
Según lo establecido en la Ley 820 de 2003 y su decreto reglamentario 3130 de 2003, ESSA comunica los valores correspondientes a las garantías exigidas para la denuncia del contrato de arrendamiento.				CONSUMO DE SUBSISTENCIA		Alturas inferior a 1000 Mts	Alturas superior o = a 1000 Mts	
				Resolución UPME 0855 de 8 de Julio de 2004.		175 kWh	150 kWh	
COSTO DE GARANTIAS PARA EL MES DE SEPTIEMBRE								
SECTOR	Valor Garantía (\$)							
ESTRATO 1	121,664							
ESTRATO 2	134,035							
ESTRATO 3	201,681							
ESTRATO 4	277,877							
ESTRATO 5	384,175							
ESTRATO 6	442,614							
				De acuerdo con la resolución 097 de 2008 y 051 de 2010 ESSA se permite informar que a partir del mes de mayo de 2011, el nuevo porcentaje de AOM (FAOMR) a reconocer es 2.67%				

Fte.:

Electrificadora de Santander S.A., ESSA.

## Anexo K. Hoja de datos de elementos electrónicos utilizados



**TIP110/112  
TIP115/117**

### COMPLEMENTARY SILICON POWER DARLINGTON TRANSISTORS

- STMicroelectronics PREFERRED SALESTYPES
- COMPLEMENTARY PNP - NPN DEVICES
- MONOLITHIC DARLINGTON CONFIGURATION
- INTEGRATED ANTIPARALLEL COLLECTOR-EMITTER DIODE

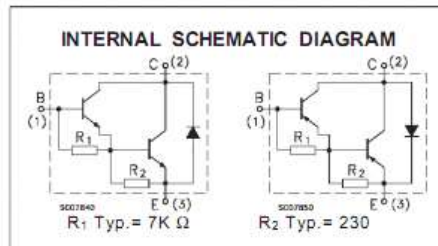
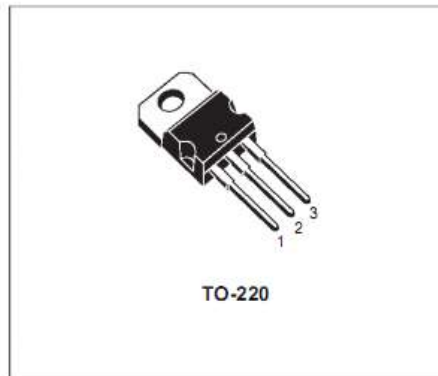
#### APPLICATIONS

- LINEAR AND SWITCHING INDUSTRIAL EQUIPMENT

#### DESCRIPTION

The TIP110 and TIP112 are silicon Epitaxial-Base NPN transistors in monolithic Darlington configuration mounted in Jedec TO-220 plastic package. They are intended for use in medium power linear and switching applications.

The complementary PNP types are TIP115 and TIP117.



#### ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Symbol	Parameter	Value		Unit	
		NPN	TIP 110		TIP112
		PNP	TIP 115	TIP117	
V <sub>CB0</sub>	Collector-Base Voltage (I <sub>E</sub> = 0)		60	100	V
V <sub>CE0</sub>	Collector-Emitter Voltage (I <sub>B</sub> = 0)		60	100	V
V <sub>EB0</sub>	Emitter-Base Voltage (I <sub>C</sub> = 0)		5		V
I <sub>C</sub>	Collector Current		2		A
I <sub>CM</sub>	Collector Peak Current		4		A
I <sub>B</sub>	Base Current		50		mA
P <sub>tot</sub>	Total Dissipation at T <sub>case</sub> ≤ 25 °C T <sub>amb</sub> ≤ 25 °C		50		W
			2		W
T <sub>stg</sub>	Storage Temperature		-65 to 150		°C
T <sub>J</sub>	Max. Operating Junction Temperature		150		°C

\* For PNP types voltage and current values are negative

June 1999

1/6

## TIP110/TIP112/TIP115/TIP117

### THERMAL DATA

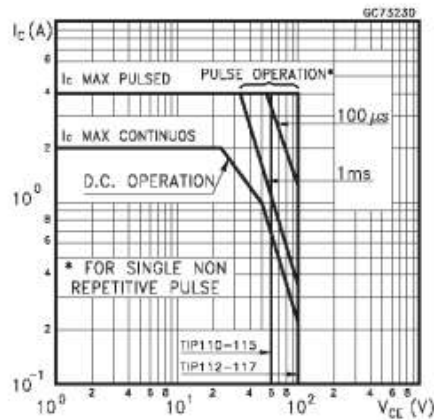
$R_{thj-case}$	Thermal Resistance Junction-case	Max	2.5	$^{\circ}C/W$
$R_{thj-amb}$	Thermal Resistance Junction-ambient	Max	62.5	$^{\circ}C/W$

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_{case} = 25^{\circ}C$ unless otherwise specified)

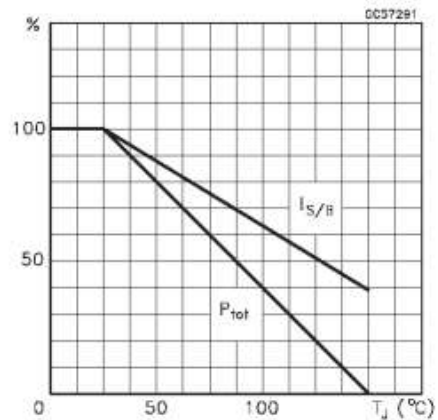
Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$I_{CEO}$	Collector Cut-off Current ( $I_B = 0$ )	$V_{CE} = \text{Half Rated } V_{CE0}$			2	mA
$I_{CBO}$	Collector Cut-off Current ( $I_E = 0$ )	$V_{CB} = \text{Rated } V_{CBO}$			1	mA
$I_{EBO}$	Emitter Cut-off Current ( $I_C = 0$ )	$V_{EB} = 5 V$			2	mA
$V_{CE(sus)}^*$	Collector-Emitter Sustaining Voltage ( $I_B = 0$ )	$I_C = 30 \text{ mA}$ for TIP110/115 for TIP112/117	60 100			V V
$V_{CE(sat)}^*$	Collector-Emitter Saturation Voltage	$I_C = 2 A$ $I_B = 8 \text{ mA}$			2.5	V
$V_{BE}^*$	Base-Emitter Voltage	$I_C = 2 A$ $V_{CE} = 4 V$			2.8	V
$h_{FE}^*$	DC Current Gain	$I_C = 1 A$ $V_{CE} = 4 V$ $I_C = 2 A$ $V_{CE} = 4 V$	1000 500			

\* Pulsed: Pulse duration = 300  $\mu s$ , duty cycle 1.5 %  
For PNP types voltage and current values are negative.

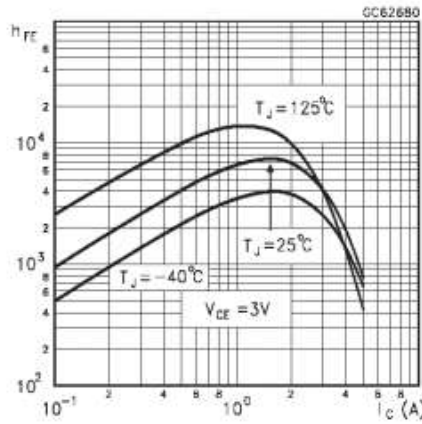
### Safe Operating Areas



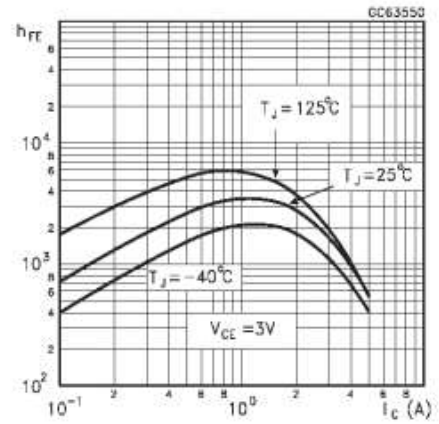
### Derating Curve



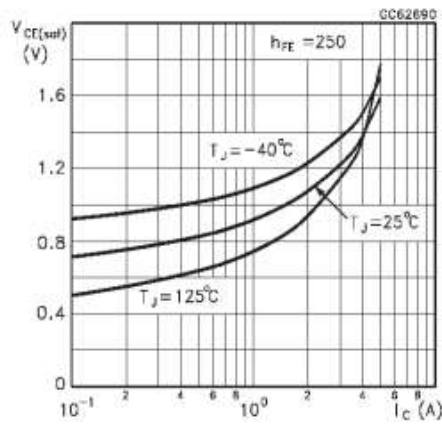
DC Current Gain (NPN type)



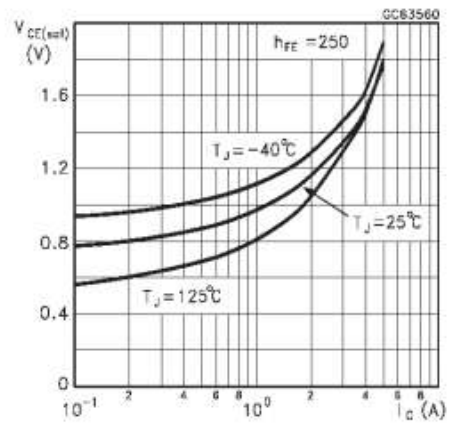
DC Current Gain (PNP type)



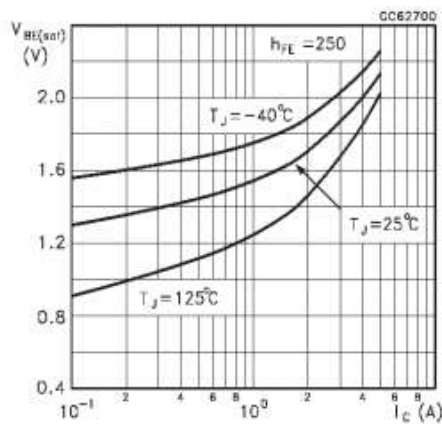
Collector-Emitter Saturation Voltage (NPN type)



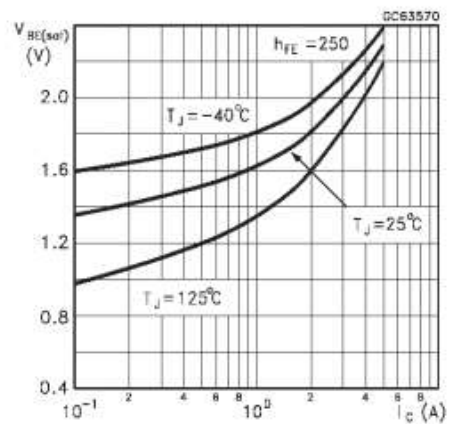
Collector-Emitter Saturation Voltage (PNP type)



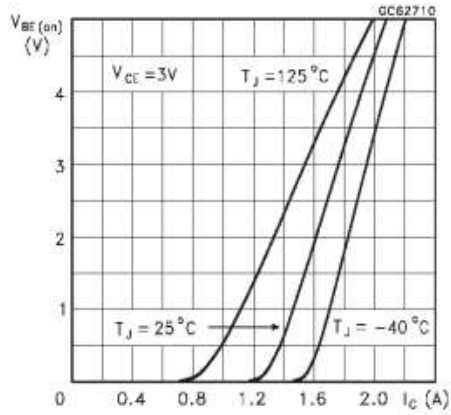
Base-Emitter Saturation Voltage (NPN type)



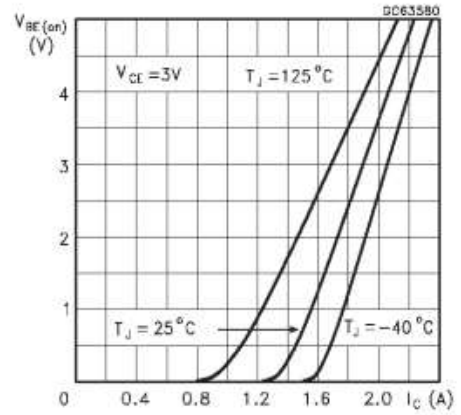
Base-Emitter Saturation Voltage (PNP type)



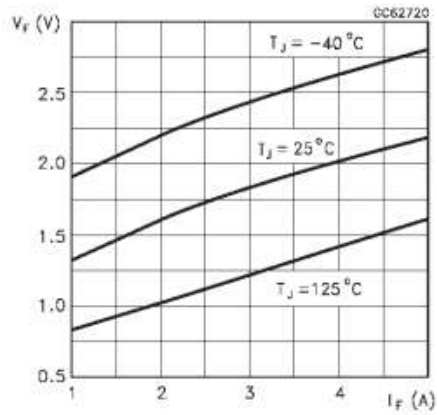
Base-Emitter On Voltage (NPN type)



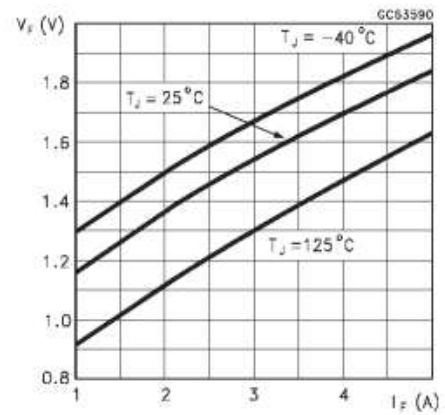
Base-Emitter On Voltage (PNP type)



Freewheel Diode Forward Voltage (NPN types)

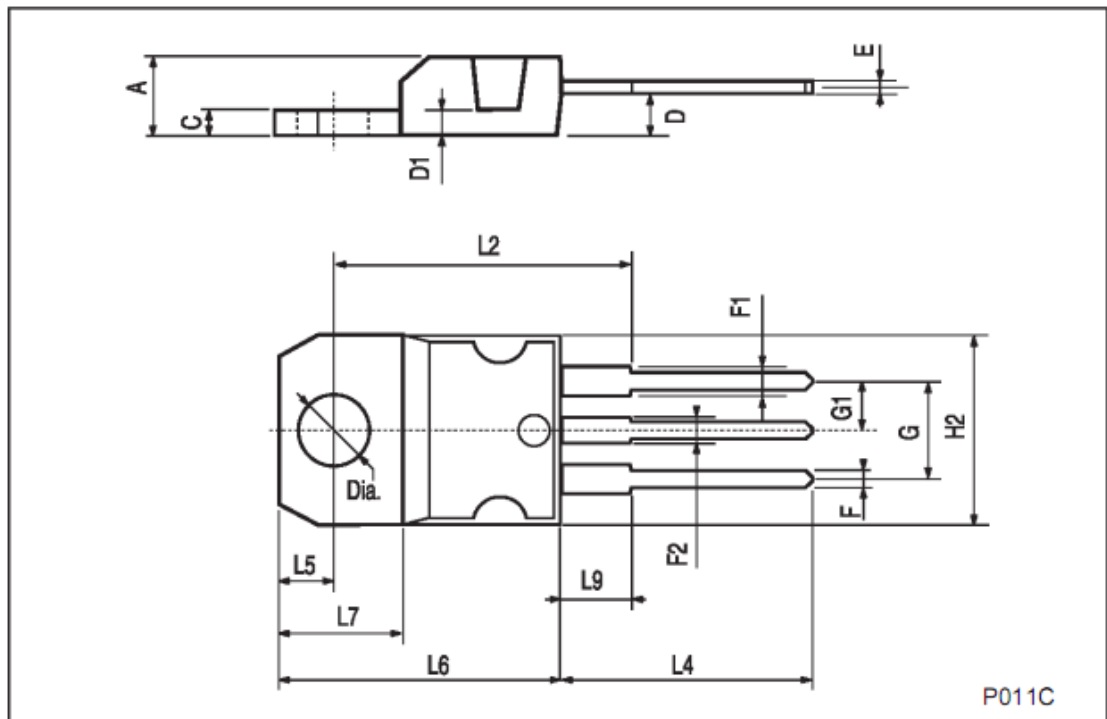


Freewheel Diode Forward Voltage (PNP types)



## TO-220 MECHANICAL DATA

DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A	4.40		4.60	0.173		0.181
C	1.23		1.32	0.048		0.051
D	2.40		2.72	0.094		0.107
D1		1.27			0.050	
E	0.49		0.70	0.019		0.027
F	0.61		0.88	0.024		0.034
F1	1.14		1.70	0.044		0.067
F2	1.14		1.70	0.044		0.067
G	4.95		5.15	0.194		0.203
G1	2.4		2.7	0.094		0.106
H2	10.0		10.40	0.393		0.409
L2		16.4			0.645	
L4	13.0		14.0	0.511		0.551
L5	2.65		2.95	0.104		0.116
L6	15.25		15.75	0.600		0.620
L7	6.2		6.6	0.244		0.260
L9	3.5		3.93	0.137		0.154
DIA.	3.75		3.85	0.147		0.151

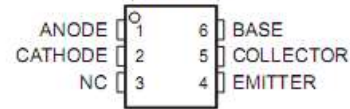


P011C

COMPATIBLE WITH STANDARD TTL INTEGRATED CIRCUITS

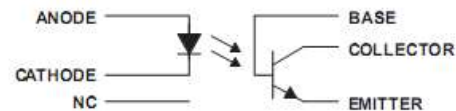
- Gallium-Arsenide-Diode Infrared Source  
Optically Coupled to a Silicon npn  
Phototransistor
- High Direct-Current Transfer Ratio
- High-Voltage Electrical Isolation  
1.5-kV, 2.5-kV, or 3.55-kV Rating
- High-Speed Switching  
 $t_r = 7 \mu s$ ,  $t_f = 7 \mu s$  Typical
- Typical Applications Include Remote  
Terminal Isolation, SCR and Triac Triggers,  
Mechanical Relays and Pulse Transformers
- Safety Regulatory Approval  
UL/CUL, File No. E65085

DCJT OR 6-TERMINAL DUAL-IN-LINE PACKAGE  
(TOP VIEW)



†4N35 only  
NC - No internal connection

schematic



absolute maximum ratings at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)†

Input-to-output peak voltage (8-ms half sine wave):	4N35	3.55 kV
	4N36	2.5 kV
	4N37	1.5 kV
Input-to-output root-mean-square voltage (8-ms half sine wave):	4N35	2.5 kV
	4N36	1.75 kV
	4N37	1.05 kV
Collector-base voltage		70 V
Collector-emitter voltage (see Note 1)		30 V
Emitter-base voltage		7 V
Input-diode reverse voltage		6 V
Input-diode forward current: Continuous		60 mA
Peak (1 $\mu s$ , 300 pps)		3 A
Phototransistor continuous collector current		100 mA
Continuous total power dissipation at (or below) 25°C free-air temperature:		
Infrared-emitting diode (see Note 2)		100 mW
Phototransistor (see Note 3)		300 mW
Continuous power dissipation at (or below) 25°C lead temperature:		
Infrared-emitting diode (see Note 4)		100 mW
Phototransistor (see Note 5)		500 mW
Operating temperature range, $T_A$		-55°C to 100°C
Storage temperature range, $T_{stg}$		-55°C to 150°C
Lead temperature 1.6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds		260°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these conditions is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

- NOTES:
1. This value applies when the base-emitter diode is open-circuited.
  2. Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 1.33 mW/°C.
  3. Derate linearly to 100°C free-air temperature at the rate of 4 mW/°C.
  4. Derate linearly to 100°C lead temperature at the rate of 1.33 mW/°C. Lead temperature is measured on the collector lead 0.8 mm (1/32 inch) from the case.
  5. Derate linearly to 100°C lead temperature at the rate of 6.7 mW/°C.



Please be aware that an important notice concerning availability, standard warranty, and use in critical applications of Texas Instruments semiconductor products and disclaimers thereto appears at the end of this data sheet.

PRODUCTION DATA Information is current as of publication date. Products conform to specifications per the terms of Texas Instruments standard warranty. Production processing does not necessarily include testing of all parameters.

TEXAS  
INSTRUMENTS

POST OFFICE BOX 655303 • DALLAS, TEXAS 75285

Copyright © 1998, Texas Instruments Incorporated

1

## 4N35, 4N36, 4N37 OPTOCOUPERS

SOES021C – NOVEMBER 1981 – REVISED APRIL 1998

### electrical characteristics at 25°C free-air temperature (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$V_{(BR)CBO}$ Collector-base breakdown voltage	$I_C = 100 \mu A$ , $I_E = 0$ , $I_F = 0$	70†			V
$V_{(BR)CEO}$ Collector-emitter breakdown voltage	$I_C = 10 \text{ mA}$ , $I_B = 0$ , $I_F = 0$	30†			V
$V_{(BR)EBO}$ Emitter-base breakdown voltage	$I_E = 100 \mu A$ , $I_C = 0$ , $I_F = 0$	7†			V
$I_R$ Input diode static reverse current	$V_R = 6 \text{ V}$			10†	$\mu A$
$I_{IO}$ Input-to-output current	$V_{IO} = \text{rated peak value}$ , $t = 8 \text{ ms}$			100	mA
$I_{C(on)}$ On-state collector current	$V_{CE} = 10 \text{ V}$ , $I_F = 10 \text{ mA}$ , $I_B = 0$	10†			mA
	$V_{CE} = 10 \text{ V}$ , $I_F = 10 \text{ mA}$ , $I_B = 0$ , $T_A = -55^\circ C$	4†			
	$V_{CE} = 10 \text{ V}$ , $I_F = 10 \text{ mA}$ , $I_B = 0$ , $T_A = 100^\circ C$	4†			
$I_{C(off)}$ Off-state collector current	$V_{CE} = 10 \text{ V}$ , $I_F = 0$ , $I_B = 0$		1	50	nA
	$V_{CE} = 30 \text{ V}$ , $I_F = 0$ , $I_B = 0$ , $T_A = 100^\circ C$			500†	$\mu A$
$h_{FE}$ Transistor static forward current transfer ratio	$V_{CE} = 5 \text{ V}$ , $I_C = 10 \text{ mA}$ , $I_F = 0$		500		
$V_F$ Input diode static forward voltage	$I_F = 10 \text{ mA}$	0.8†		1.5†	V
	$I_F = 10 \text{ mA}$ , $T_A = -55^\circ C$	0.9†		1.7†	
	$I_F = 10 \text{ mA}$ , $T_A = 100^\circ C$	0.7†		1.4†	
$V_{CE(sat)}$ Collector-emitter saturation voltage	$I_C = 0.5 \text{ mA}$ , $I_F = 10 \text{ mA}$ , $I_B = 0 \text{ mA}$			0.3†	V
$r_{IO}$ Input-to-output internal resistance	$V_{IO} = 500 \text{ V}$ , See Note 6	10 <sup>11</sup> †			$\Omega$
$C_{IO}$ Input-to-output capacitance	$V_{IO} = 0$ , $f = 1 \text{ MHz}$ , See Note 6		1	2.5†	pF

† JEDEC registered data

NOTE 6: These parameters are measured between both input-diode leads shorted together and all the phototransistor leads shorted together.

### switching characteristics at 25°C free-air temperature†

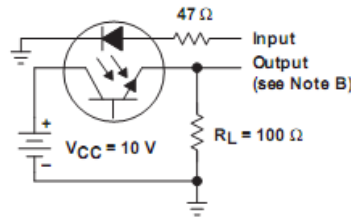
PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$t_{on}$ Time-on time	$V_{CC} = 10 \text{ V}$ , $I_{C(on)} = 2 \text{ mA}$ ,		7	10	$\mu s$
$t_{off}$ Turn-off time	$R_L = 100 \Omega$ , See Figure 1		7	10	

† JEDEC registered data

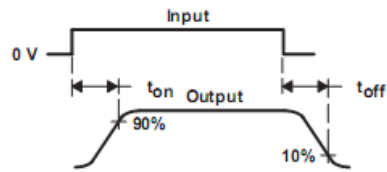


POST OFFICE BOX 855303 • DALLAS, TEXAS 75285

PARAMETER MEASUREMENT INFORMATION



TEST CIRCUIT



VOLTAGE WAVEFORMS

- NOTES: A. The input waveform is supplied by a generator with the following characteristics:  $Z_O = 50 \Omega$ ,  $t_r \leq 15 \text{ ns}$ , duty cycle  $\approx 1\%$ ,  $t_W = 100 \mu\text{s}$ .  
B. The output waveform is monitored on an oscilloscope with the following characteristics:  $t_r \leq 12 \text{ ns}$ ,  $R_{in} \geq 1 \text{ M}\Omega$ ,  $C_{in} \leq 20 \text{ pF}$ .

Figure 1. Switching Times

TYPICAL CHARACTERISTICS

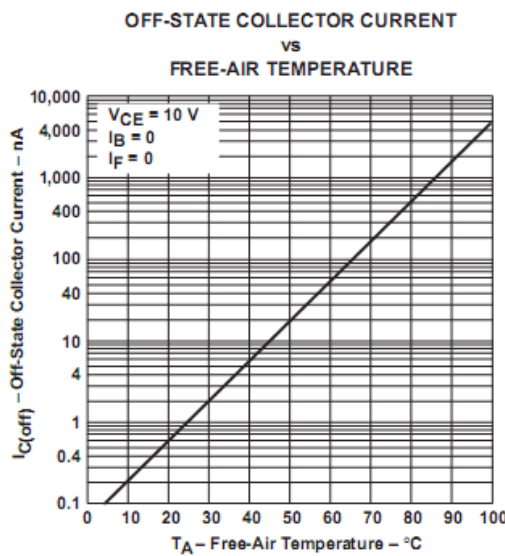


Figure 2

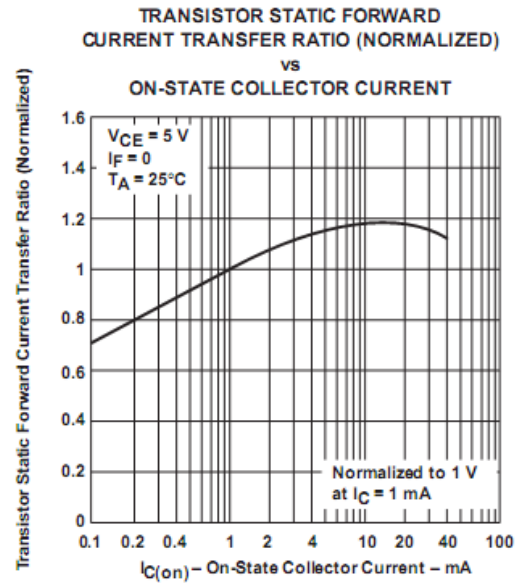
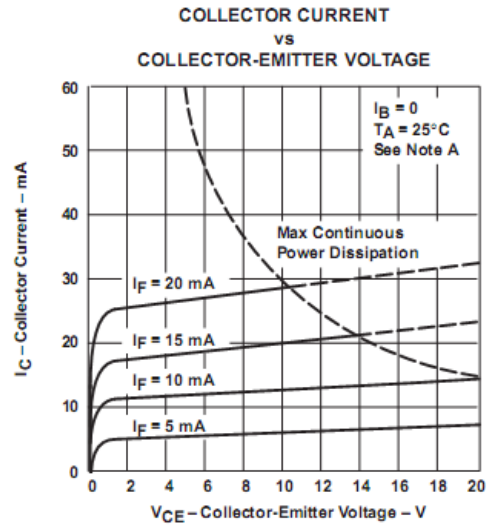
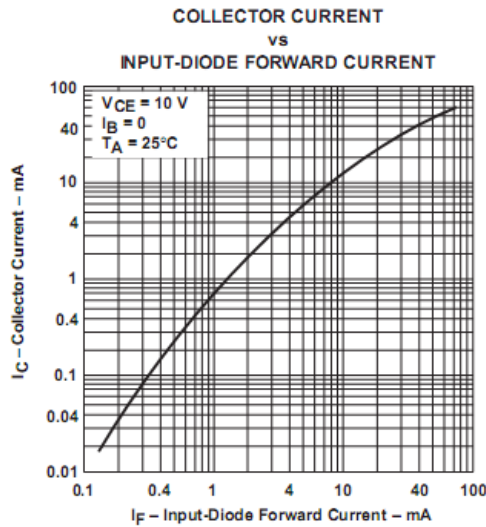
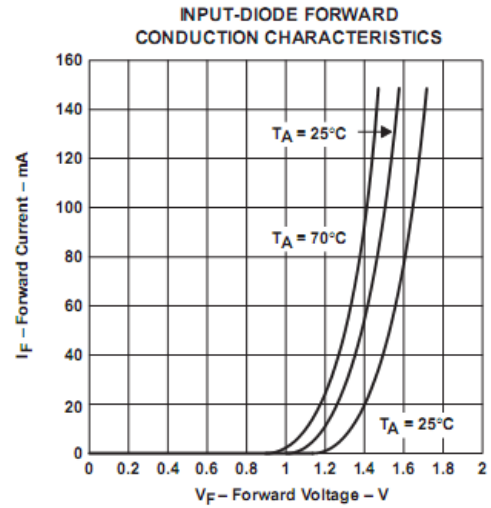
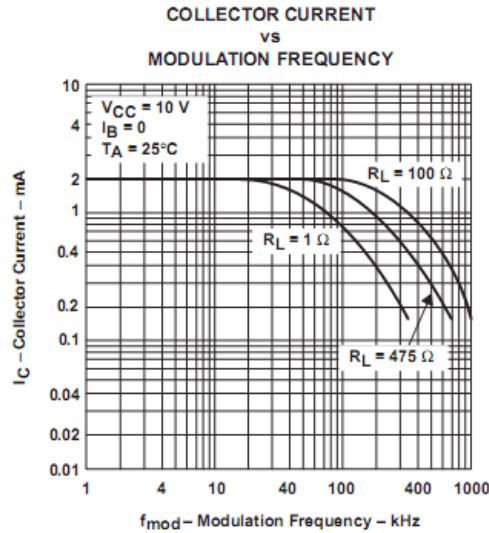


Figure 3

**4N35, 4N36, 4N37  
OPTOCOUPERS**

SOES021C - NOVEMBER 1981 - REVISED APRIL 1998

**TYPICAL CHARACTERISTICS**



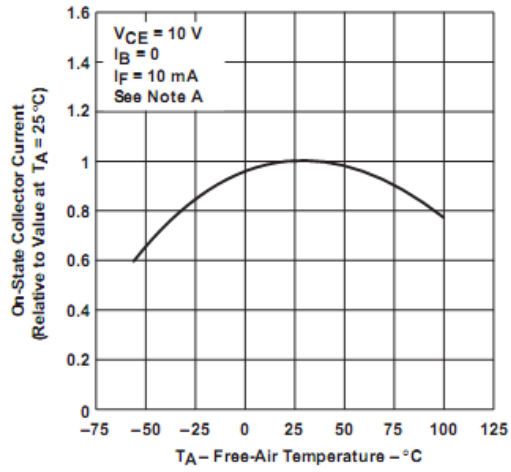
NOTE A. Pulse operation of input diode is required for operation beyond limits shown by dotted lines.



POST OFFICE BOX 855303 • DALLAS, TEXAS 75285

TYPICAL CHARACTERISTICS

ON-STATE COLLECTOR CURRENT  
(RELATIVE TO VALUE AT 25°C)  
vs  
FREE-AIR TEMPERATURE



NOTE A. These parameters were measured using pulse techniques,  $t_w = 1\text{ ms}$ , duty cycle  $\leq 2\%$ .

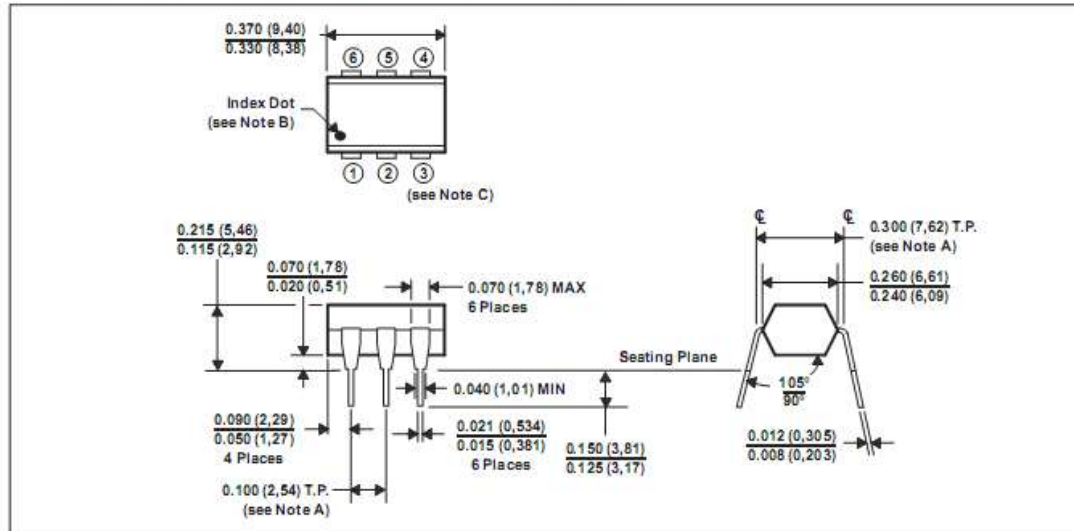
Figure 8

# 4N35, 4N36, 4N37 OPTOCOUPERS

SOES021C – NOVEMBER 1981 – REVISED APRIL 1998

## APPLICATION INFORMATION

The devices consist of a gallium-arsenide infrared-emitting diode and an npn silicon phototransistor. Each device is available in a 6-terminal plastic dual-in-line package, shown in Figure 9, or in a DCJ plastic dual surface-mount optocoupler package (see Mechanical Data).



- NOTES: A. Terminals are within 0.005 (0.13) radius of true position (T.P.) with maximum material condition and unit installed.  
 B. Terminal 1 identified by index dot.  
 C. The dimensions given fall within JEDEC MO-001 AM dimensions.  
 D. All linear dimensions are in inches (millimeters).

Figure 9. Plastic Dual-in-Line Package



POST OFFICE BOX 855303 • DALLAS, TEXAS 75285

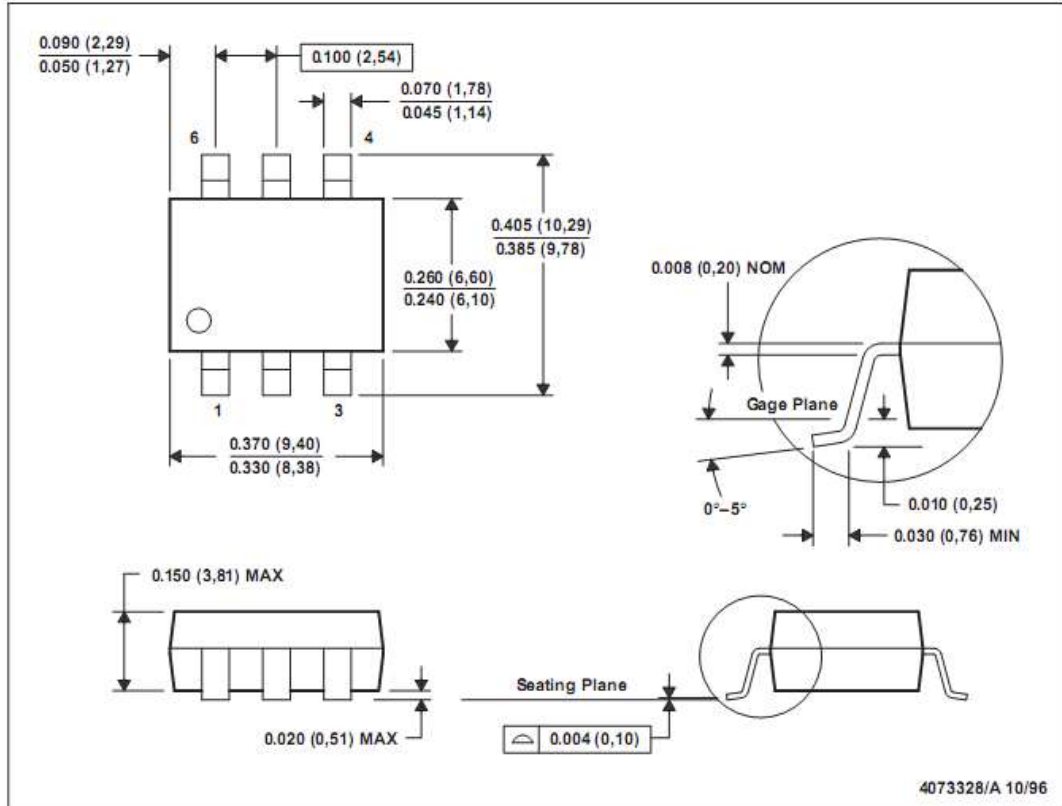
4N35, 4N36, 4N37  
OPTOCOUPERS

SOES021C - NOVEMBER 1981 - REVISED APRIL 1998

MECHANICAL DATA

DCJ (R-PDSO-G6)

PLASTIC DUAL SMALL-OUTLINE OPTOCOUPLER



- NOTES: A. All linear dimensions are in inches (millimeters)  
 B. This drawing is subject to change without notice.  
 C. Terminal 1 identified by index dot.

## Silicon Power Transistors

The MJ15022 and MJ15024 are PowerBase power transistors designed for high power audio, disk head positioners and other linear applications.

- High Safe Operating Area (100% Tested) —  
2 A @ 80 V
- High DC Current Gain —  
 $h_{FE} = 15$  (Min) @  $I_C = 8$  Adc

**NPN**  
**MJ15022**  
**MJ15024\***

\*Motorola Preferred Device

**16 AMPERE**  
**SILICON**  
**POWER TRANSISTORS**  
**200 AND 250 VOLTS**  
**250 WATTS**



**CASE 1-07**  
**TO-204AA**  
**(TO-3)**

### MAXIMUM RATINGS

Rating	Symbol	MJ15022	MJ15024	Unit
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEO}$	200	250	Vdc
Collector-Base Voltage	$V_{CBO}$	350	400	Vdc
Emitter-Base Voltage	$V_{EBO}$	5		Vdc
Collector-Emitter Voltage	$V_{CEX}$	400		Vdc
Collector Current — Continuous Peak (1)	$I_C$	16 30		A dc
Base Current — Continuous	$I_B$	5		A dc
Total Power Dissipation @ $T_C = 25^\circ\text{C}$ Derate above $25^\circ\text{C}$	PD	250 1.43		Watts W/ $^\circ\text{C}$
Operating and Storage Junction Temperature Range	$T_J, T_{stg}$	-65 to +200		$^\circ\text{C}$

### THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	0.70	$^\circ\text{C/W}$

(1) Pulse Test: Pulse Width = 5 ms, Duty Cycle  $\leq 10\%$ .

Preferred devices are Motorola recommended choices for future use and best overall value.

REV 7

© Motorola, Inc. 1995



## MJ15022 MJ15024

### ELECTRICAL CHARACTERISTICS ( $T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
<b>OFF CHARACTERISTICS</b>				
Collector-Emitter Sustaining Voltage (1) ( $I_C = 100\text{ mAdc}$ , $I_B = 0$ )	MJ15022 MJ15024	$V_{CEO(sus)}$	200 250	—
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 200\text{ Vdc}$ , $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$ ) ( $V_{CE} = 250\text{ Vdc}$ , $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$ )	MJ15022 MJ15024	$I_{CEX}$	— —	250 250
Collector Cutoff Current ( $V_{CE} = 150\text{ Vdc}$ , $I_B = 0$ ) ( $V_{CE} = 200\text{ vdc}$ , $I_B = 0$ )	MJ15022 MJ15024	$I_{CEO}$	— —	500 500
Emitter Cutoff Current ( $V_{CE} = 5\text{ Vdc}$ , $I_B = 0$ )		$I_{EBO}$	—	500
<b>SECOND BREAKDOWN</b>				
Second Breakdown Collector Current with Base Forward Biased ( $V_{CE} = 50\text{ Vdc}$ , $t = 0.5\text{ s}$ (non-repetitive)) ( $V_{CE} = 80\text{ Vdc}$ , $t = 0.5\text{ s}$ (non-repetitive))		$I_{S/b}$	5 2	— —
<b>ON CHARACTERISTICS</b>				
DC Current Gain ( $I_C = 8\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 4\text{ Vdc}$ ) ( $I_C = 16\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 4\text{ Vdc}$ )		$h_{FE}$	15 5	60 —
Collector-Emitter Saturation Voltage ( $I_C = 8\text{ Adc}$ , $I_B = 0.8\text{ Adc}$ ) ( $I_C = 16\text{ Adc}$ , $I_B = 3.2\text{ Adc}$ )		$V_{CE(sat)}$	— —	1.4 4.0
Base-Emitter On Voltage ( $I_C = 8\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 4\text{ Vdc}$ )		$V_{BE(on)}$	—	2.2
<b>DYNAMIC CHARACTERISTICS</b>				
Current-Gain — Bandwidth Product ( $I_C = 1\text{ Adc}$ , $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$ , $f_{est} = 1\text{ MHz}$ )		$f_T$	4	—
Output Capacitance ( $V_{CB} = 10\text{ Vdc}$ , $I_E = 0$ , $f_{est} = 1\text{ MHz}$ )		$C_{ob}$	—	500

(1) Pulse Test: Pulse Width = 300  $\mu\text{s}$ , Duty Cycle  $\leq 2\%$ .

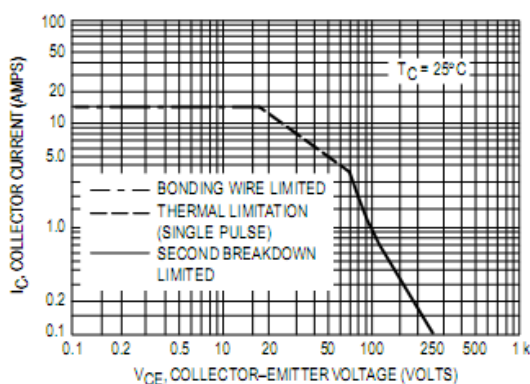


Figure 1. Active-Region Safe Operating Area

There are two limitations on the powerhandling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate  $I_C - V_{CE}$  limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

The data of Figure 1 is based on  $T_{J(pk)} = 200^\circ\text{C}$ ;  $T_C$  is variable depending on conditions. At high case temperatures, thermal limitations will reduce the power that can be handled to values lower than the limitations imposed by second breakdown.

TYPICAL CHARACTERISTICS

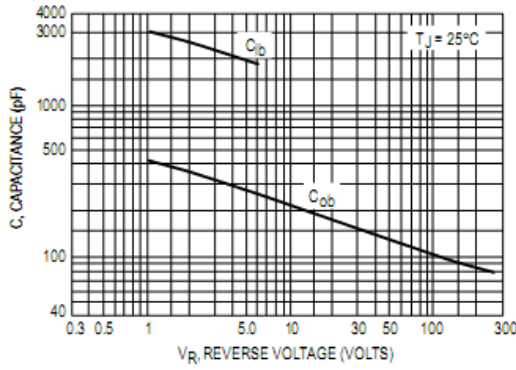


Figure 2. Capacitances

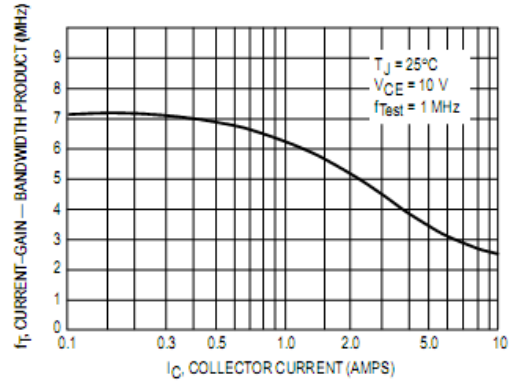


Figure 3. Current-Gain — Bandwidth Product

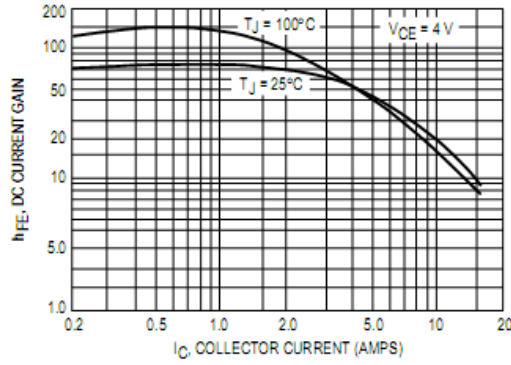


Figure 4. DC Current Gain

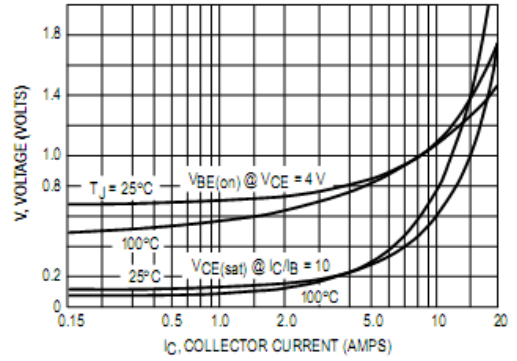


Figure 5. "On" Voltage

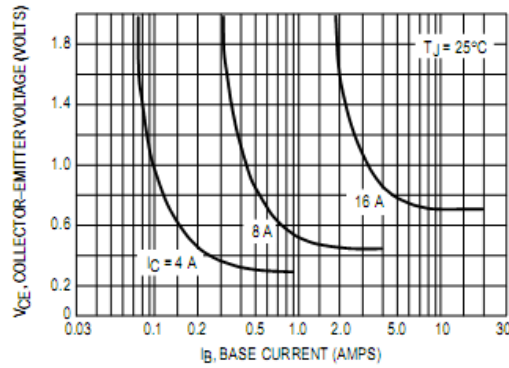
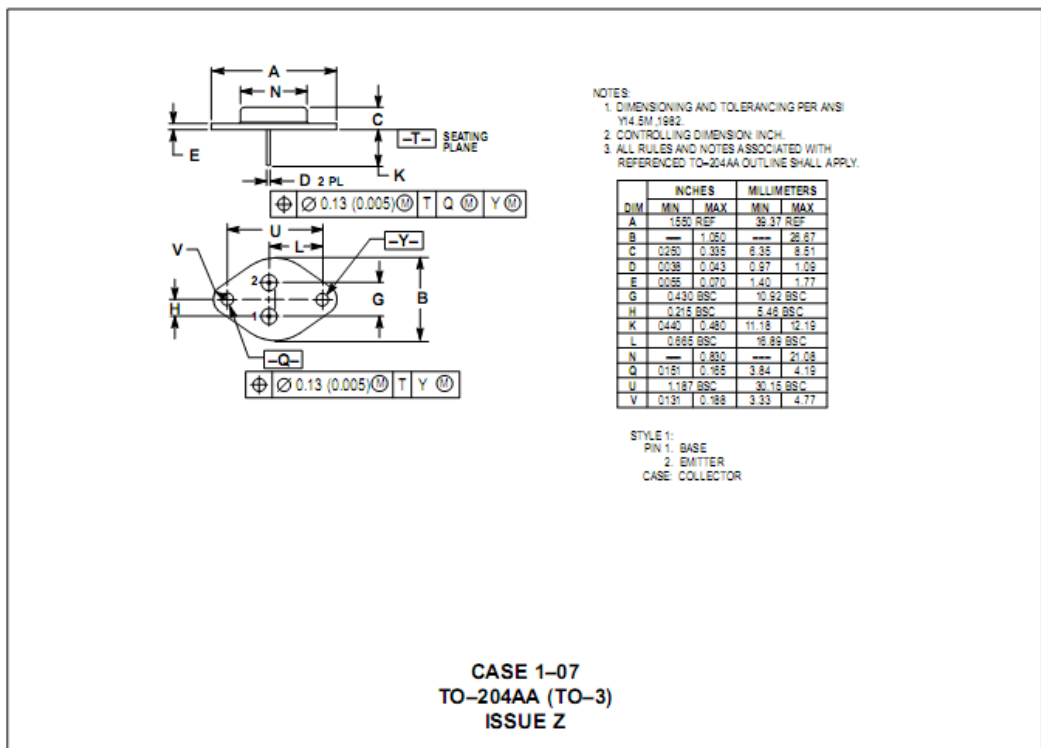


Figure 6. Collector Saturation Region

MJ15022 MJ15024

PACKAGE DIMENSIONS



Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters can and do vary in different applications. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and (M) are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:  
 USA / EUROPE: Motorola Literature Distribution;  
 P.O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, Toshikatsu Otsuki,  
 6F Seibu-Butsuryu-Center, 3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-3521-8315

MFAX: RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE (602) 244-6609  
 INTERNET: http://Design-NET.com

HONG KONG: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,  
 51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629288

